

Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)

J. Evers, I. Dammann, N. König, U. Paar, V. Stüber, A. Schulze, M. Schmidt,
E. Schönfelder, J. Eichhorn



J. Evers, I. Dammann, N. König, U. Paar, V. Stüber, A. Schulze,
M. Schmidt, E. Schönfelder, J. Eichhorn

Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
[Creative Commons](#)
[Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen](#)
[4.0 International Lizenz](#).



erschienen als Band 19 der Reihe
„Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt“
in den Universitätsdrucken im Universitätsverlag Göttingen 2019

J. Evers, I. Dammann, N. König,
U. Paar, V. Stüber, A. Schulze,
M. Schmidt, E. Schönfelder,
J. Eichhorn

Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen

Ergebnisse der zweiten
Bodenzustandserhebung im Wald
(BZE II)

Beiträge aus der
Nordwestdeutschen
Forstlichen Versuchsanstalt
Band 19



Universitätsverlag Göttingen
2019

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Global Forest Decimal Classification: 114.1; 114.2; 114.3; 114.4; 114.7; 160.201; 182.47/48

Herausgeber der Reihe:

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Grätzelstr. 2, D-37079 Göttingen
Tel.: +49 (0)551-69401-0, Fax: +49 (0)551-69401-160
E-Mail: zentrale@nw-fva.de
www.nw-fva.de

Schriftleitung der Reihe: Prof. Dr. Hermann Spellmann

Redaktion der Reihe: Inge Kehr, Ulrike Gaertner

Titelfotos: Waldböden in Niedersachsen und Bremen; *obere Reihe von links nach rechts:*

1. Braunerde Regosol, unverlehmter Sand; 2. Braunerde, schwach verlehmter Sand;
3. Parabraunerde-Braunerde, Lösslehm; 4. Übergangserdmoor, organisch geprägt
untere Reihe von links nach rechts: 1. Rendzina, Kalkstein; 2. Braunerde, Buntsandstein;
3. Podsol-Pseudogley, Kreidesandstein; 4. Podsol-Treposol, unverlehmter Sand
(Thomas Janssen und Heiner Heile, NW-FVA)

Zitervorschlag:

Evers, J.; Dammann, I.; König, N.; Paar, U.; Stüber, V.; Schulze, A.; Schmidt, M.; Schönfelder, E.; Eichhorn, J. 2019: Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der NW-FVA, Band 19, 498 S.

Dieses Buch ist auch als freie Onlineversion über die Homepage der NW-FVA, des Verlags sowie über den Göttinger Universitätskatalog (GUK) bei der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (<http://www.sub.uni-goettingen.de>) erreichbar.
Es gelten die Lizenzbestimmungen der Onlineversion.

© 2019 Universitätsverlag Göttingen

<http://univerlag.uni-goettingen.de>

ISBN: 978-3-86395-388-1

DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2019-1162>

eISSN: 2512-594X

Inhaltsverzeichnis

Vorwort (Johannes Eichhorn)	IX
Zusammenfassung	1
Abstract	6
1 Überblick: Bewertung und Diskussion der bodenkundlichen Ergebnisse (Jan Evers, Uwe Paar)	11
1.1 Vorbemerkungen und Rahmenbedingungen	11
1.1.1 Ländlicher Versorgungswald und Waldboden	12
1.1.2 Säureeintrag und Waldboden	13
1.1.3 Veränderungen des Stickstoffhaushaltes und Waldboden	13
1.1.4 Klimaveränderungen und Waldboden	14
1.2 Repräsentativität der Bodenzustandserhebungen	14
1.3 Geologie, Boden und Bodenentwicklung	15
1.4 Substratgruppen	17
1.5 Substrat-Lagerungstypen	18
1.6 Bodentypen	18
1.7 Trockenrohdichten und Skelettanteile	19
1.8 Austauschkapazität	19
1.9 Status und Veränderung der Bodenversauerung	20
1.9.1 Kationen-Anteile an der Austauschkapazität	21
1.9.2 Basensättigung	21
1.9.3 Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat	23
1.9.4 Pufferbereiche	23
1.9.5 Bewertung	25
1.10 Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf den Waldbodenzustand	26
1.10.1 Umfang durchgeführter Bodenschutzkalkungen	26
1.10.2 Vergleichende Bewertung gekalkter und ungekalkter BZE-Punkte	27
1.10.3 Bewertung	28
1.11 Hauptergebnisse für die Substratgruppen	29
1.11.1 Unverlehmter Sand (37 % der Waldfläche in Niedersachsen und Bremen)	29
1.11.2 Schwach verlehnte Sande (13 % der Waldfläche in Niedersachsen)	31
1.11.3 Verlehnte Sande (2 % der Waldfläche in Niedersachsen)	32
1.11.4 Lösslehm (10 % der Waldfläche in Niedersachsen)	33

1.11.5	Organisch geprägte Standorte (9 % der Waldfläche in Niedersachsen)	34
1.11.6	Kalkstein (8 % der Waldfläche in Niedersachsen)	35
1.11.7	Buntsandstein (6 % der Waldfläche in Niedersachsen)	36
1.11.8	Tonschiefer (4 % der Waldfläche in Niedersachsen)	37
1.11.9	Lehm (4 % der Waldfläche in Niedersachsen)	38
1.11.10	Grauwacke (3 % der Waldfläche in Niedersachsen)	39
1.11.11	Ton(stein) (2 % der Waldfläche in Niedersachsen)	39
1.11.12	Kreidesandstein und Granit (2 % der Waldfläche in Niedersachsen)	40
1.12	Humusformen	41
1.13	Status und Veränderung der Kohlenstoffspeicherung in den Waldböden	43
1.14	Stickstoff	45
2	Kurzportraits der BZE-Punkte („Steckbriefe“)	49
	(Andreas Schulze, Jan Evers, Uwe Paar)	
3	Einleitung	69
3.1	Allgemeine Einführung zum Thema Boden (Uwe Paar, Jan Evers)	69
3.1.1	Bodenbildung	69
3.1.2	Funktionen der Böden	70
3.1.3	Gefährdungen	71
3.2	Geologische und bodenkundliche Verhältnisse in niedersächsischen Wäldern (Volker Stüber, Jan Evers, Uwe Paar)	74
3.2.1	Einleitung	74
3.2.2	Geologische und bodenkundliche Verhältnisse niedersächsischer Waldböden	74
3.2.3	Waldbauliche Gliederung Niedersachsens: Waldbauregionen und Wuchsbezirke	75
	3.2.3.1 <i>Tiefland</i>	76
	3.2.3.2 <i>Bergland</i>	82
3.2.4	Forstliche Standorte in Niedersachsen	89
	3.2.4.1 <i>Wasserhaushalt</i>	89
	3.2.4.2 <i>Nährstoffe</i>	92
	3.2.4.3 <i>Substrate</i>	93
3.3	Forstliches Umweltmonitoring an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) (Johannes Eichhorn, Uwe Paar, Henning Meesenburg, Jan Evers, Birte Scheler, Nils König)	95
3.3.1	Aufgaben	95
3.3.2	Konzept	96

3.4	Befunde des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings zur Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE (Nils König, Heike Fortmann, Birte Scheler, Egbert Schönfelder, Henning Meesenburg)	102
3.4.1	Stoffeintrag-Belastungssituation der Wälder	102
3.4.2	Ergebnisse der Bodeninventuren auf Intensivmonitoringflächen in Nordwestdeutschland	105
3.4.2.1	<i>Bodenversauerung</i>	106
3.4.2.2	<i>Kalkung</i>	113
4	Aufgaben und Ziele der Bodenzustandserhebungen	119
	(Uwe Paar, Jan Evers)	
5	Methoden	121
	(Jan Evers, Uwe Paar, Inge Dammann, Marcus Schmidt)	
5.1	Allgemeine Einführung	121
5.2	Merkmalsgruppen	122
5.3	Untersuchungsdesign und -module am BZE II-Punkt	122
5.3.1	Beprobung und Analyse des Auflagehumus und des Mineralbodens	123
5.3.2	Blatt- und Nadelernährung	124
5.3.3	Vegetationsaufnahmen	126
5.3.4	Waldwachstumskundliche Aufnahmen	127
6	Ergebnisse der Bodenuntersuchungen	129
6.1	Repräsentativität des Erhebungsnetzes (Jan Evers, Uwe Paar, Swen Hentschel)	129
6.1.1	Vergleich BZE II und BÜK 1000 N	129
6.1.2	Vergleich BZE II und Standortskartierung	131
6.1.2.1	<i>Trophiestufen</i>	131
6.1.2.2	<i>Geländewasserhaushalt</i>	132
6.2	Bodenmorphologische Kenngrößen (Jan Evers, Uwe Paar, Jörg Weymar)	133
6.2.1	Substratgruppen	133
6.2.1.1	<i>Verteilung der Substratgruppen der BZE II in Niedersachsen</i>	135
6.2.1.2	<i>Kalkungen und Substratgruppen</i>	135
6.2.2	Substrat-Lagerungstypen	137
6.2.3	Bodentypen	141
6.2.3.1	<i>Bodentypen nach Substratgruppen</i>	145
6.2.4	Humusformen	145
6.2.4.1	<i>Verteilungen der Humusformen</i>	146
6.2.4.2	<i>Veränderung der Trockenmasse im Auflagehumus</i>	148

6.3	Bodenphysikalische Kenngrößen (Jan Evers, Uwe Paar)	151
6.3.1	Trockenrohdichten des Feinbodens	151
6.3.2	Grobbodenanteil	152
6.3.3	Feinbodenvorrat	153
6.3.4	Nutzbare Feldkapazität	154
6.4	Bodenmorphologische und bodenphysikalische Kenngrößen im Ländervergleich Nordwestdeutschlands (Jan Evers, Uwe Paar)	157
6.5	Bodenchemische Kenngrößen in Niedersachsen und Bremen (Jan Evers, Uwe Paar, Egbert Schönfelder)	164
6.5.1	Austauschkapazität	165
	6.5.1.1 <i>Austauschkapazität in den Substratgruppen</i>	169
	6.5.1.2 <i>Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität</i>	183
6.5.2	Basensättigung	184
	6.5.2.1 <i>Basensättigung nach Substratgruppen</i>	187
6.5.3	Vorräte austauschbarer Calcium-, Magnesium- und Kaliumkationen	203
	6.5.3.1 <i>Calcium</i>	203
	6.5.3.2 <i>Magnesium</i>	209
	6.5.3.3 <i>Kalium</i>	214
6.5.4	Vorräte austauschbarer Protonen, Eisen, Mangan und Aluminium	217
6.5.5	pH-Werte und Pufferbereiche	220
	6.5.5.1 <i>pH(H₂O)</i>	222
	6.5.5.2 <i>pH(KCl)</i>	228
6.5.6	Kohlenstoff	230
	6.5.6.1 <i>Kohlenstoffvorräte nach Substratgruppen</i>	235
6.5.7	Stickstoff	238
	6.5.7.1 <i>Stickstoffvorräte nach Substratgruppen</i>	242
6.5.8	C/N-Verhältnisse	245
	6.5.8.1 <i>C/N-Verhältnisse nach Substratgruppen</i>	247
	6.5.8.2 <i>C/N-Verhältnisse im Auflagehumus nach Bestandestypen</i>	249
7	Stickstoffstatus in der Bodenlösung und Stickstoffbilanz (Jan Evers, Bernd Ahrends, Wendelin Weis)	251
8	Waldernährung (Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Ulrike Talkner, Jan Evers, Uwe Paar)	261
8.1	Einleitung	261
8.2	Material und Methoden	262

8.3	Ergebnisse	269
8.3.1	Kiefer	269
8.3.1.1	<i>Ernährungsstatus 2007</i>	269
8.3.1.2	<i>Ernährungssituation in den Waldregionen</i>	273
8.3.1.3	<i>Kalkungsvergleich 2007</i>	275
8.3.1.4	<i>Zeitliche Veränderungen</i>	277
8.3.2	Fichte	280
8.3.2.1	<i>Ernährungsstatus 2007</i>	280
8.3.2.2	<i>Ernährungssituation in den Waldregionen</i>	285
8.3.2.3	<i>Kalkungsvergleich</i>	288
8.3.2.4	<i>Vergleich 1. und 3. Nadeljabrgang 2007</i>	290
8.3.2.5	<i>Zeitliche Veränderungen</i>	291
8.3.3	Buche	296
8.3.3.1	<i>Ernährungsstatus 2007</i>	296
8.3.3.2	<i>Ernährungssituation in den Waldregionen</i>	299
8.3.3.3	<i>Kalkungsvergleich</i>	302
8.3.3.4	<i>Zeitliche Veränderungen</i>	304
8.3.4	Eiche	308
8.3.4.1	<i>Ernährungsstatus 2007</i>	308
8.3.4.2	<i>Ernährungssituation in den Waldregionen</i>	311
8.3.4.3	<i>Kalkungsvergleich 2007</i>	313
8.3.4.4	<i>Zeitliche Veränderungen</i>	315
8.4	Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation	319
8.5	Diskussion und Bewertung der Ernährungssituation	324
8.5.1	Stickstoffeutrophierung und Bodenversauerung	324
8.5.1.1	<i>Stickstoffeutrophierung</i>	324
8.5.1.2	<i>Bodenversauerung</i>	325
8.5.2	Phosphorernährung	330
8.5.3	Bodenschutzkalkung	332
8.5.4	Vollbaumnutzung	335
8.6	Zusammenfassung	337
9	Vegetation	339
	(Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Uwe Paar, Jan Evers)	
9.1	Einführung	339
9.2	Methodik	339
9.2.1	Datenerhebung	339
9.2.2	Datenauswertung	340
9.2.3	Darstellung und Anwendung der Ergebnisse	340

9.3	Ergebnisse und Diskussion	343
9.3.1	pH(H ₂ O)	343
9.3.2	Basensättigung	347
9.3.3	C/N-Verhältnis	351
9.3.4	Basische Kationen (Ca, Mg, K)	353
	9.3.4.1 <i>Calcium</i>	353
	9.3.4.2 <i>Magnesium</i>	357
	9.3.4.3 <i>Kalium</i>	359
9.3.5	Ansprache der Nährstoffversorgung mithilfe von Indikatorarten	362
10	Hauptergebnisse und Folgerungen für die forstliche Praxis	365
	(Jan Evers, Uwe Paar, Inge Dammann, Bernd Ahrends, Johannes Eichhorn)	365
10.1	Wie repräsentativ sind die Bodenzustandserhebungen? Sind die Ergebnisse für die wichtigsten Bodensubstrate in den Wäldern aussagekräftig?	365
10.2	Welche Waldböden können unterschieden werden?	366
10.2.1	Geologie, Boden und Bodenentwicklung	366
10.2.2	Substratgruppen und Substrat-Lagerung	366
10.2.3	Bodentypen	367
10.2.4	Auflagehumus	367
10.2.5	Trockenrohdichten und Skelettanteile	368
10.3	Wie sauer sind die Waldböden? Versauern sie trotz geringerer luftbürtiger Säurebelastungen weiter?	369
10.3.1	Bewertung	372
10.4	Wie hat sich die Bodenschutzkalkung ausgewirkt? Brauchen wir sie auch in Zukunft?	373
10.4.1	Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf die Waldernährung	374
10.4.2	Bewertung aus bodenchemischer Sicht	375
10.5	Wie entwickeln sich die Stickstoffvorräte in Waldböden?	375
10.6	Tragen Waldböden als Kohlenstoffsенke zum Klimaschutz bei?	376
10.7	Auf welchen Standorten ist Trockenstress bei Waldbäumen zu erwarten?	376
10.8	Welche Folgerungen ergeben sich für die Energieholznutzung in Wäldern?	377
10.9	Welche Folgerungen ergeben sich aus den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung II für die Standortskartierung?	378
10.10	Wer nutzt die Informationen der Bodenzustandserhebung (BZE als Informationsplattform)? Braucht die forstliche Umweltbeobachtung (Monitoring) eine Bodenzustandserhebung?	379
10.10.1	Informationen aus der Bodenzustandserhebung als Teil des Forstlichen Umweltmonitorings	379
10.10.2	Nationale/Internationale Partner	379
10.10.3	Gesellschaft, Politik und Verwaltung	380

10.10.4	Forstliche Betriebe verschiedener Waldbesitzarten	380
10.10.5	Wissenschaft	381
11	Qualitätssicherung	383
	(Nils König)	
11.1	Probenvorbereitung und -analyse	383
11.2	Methodendokumentation und Qualitätssicherung in den beteiligten Laboren	422
11.2.1	Umweltlabor der Nordwestdeutschen (früher: Niedersächsischen) Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen	422
11.2.2	Landesanstalt für Forstplanung Brandenburg, Labor Eberswalde (Frank Gutwasser)	423
11.2.3	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL), Standort Kassel (und Vorläufer-Einrichtungen) (Rolf Ellinghaus)	423
11.2.4	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (Levke Godbersen)	424
11.3	Bundesweites BZE II-Qualitätssicherungsprogramm	426
11.4	Bedeutung methodisch bedingter Streuungen und Fehlerquellen	432
11.4.1	Probleme der Probennahme	432
11.4.1.1	<i>Vergleichbarkeit von Beprobungen der Profülgrube und Satelliten- Bohrungen</i>	432
11.4.1.2	<i>Räumliche Variabilität chemischer und physikalischer Kenngrößen</i>	432
11.4.1.3	<i>Nullpunktdefinition</i>	443
11.4.1.4	<i>Verschleppung</i>	445
11.4.1.5	<i>Veränderung der Trockenrohdichte in oberen Bodenschichten („Soufflé-Effekt“)</i>	445
11.4.2	Probleme der Probenanalyse	445
11.4.2.1	<i>Abschätzung der Streuung chemischer Parameter durch kontinuierliches Mitmessen von Kontrollstandards</i>	445
11.4.2.2	<i>Eingeschränkte Repräsentativität von Teilproben</i>	447
12	Aspekte des BZE-Datenmanagements	449
	(Andreas Schulze, Jan Evers)	
12.1	Anforderungen	449
12.1.1	Integration der Merkmalsgruppen	449
12.1.2	Integration der Datenbestände der Bundesländer	450
12.1.3	Integration von BZE I und II	451
12.1.4	Integration von Methodeninformation	451
12.1.5	Externe Fachinhalte	452

12.2	Umsetzung	453
12.2.1	Identifizierung von Informations-Kategorien	454
12.2.2	Integration der Fach-Arbeitsanleitung	454
12.2.3	Projektübergreifende Listen mit projektspezifischen Kodierungen	455
12.2.4	Differenzierung von Fehlwerten	456
12.2.5	Methodendokumentation der Laboranalytik	456
12.2.6	Anwendungsprogrammierung	457
12.3	Praktische Erfahrungen	460
12.4	Fazit	462
	Literatur	465
	Glossar und Abkürzungen	481
	Danksagung	485
	Autoren	487

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

1966, vor 50 Jahren, begann das Solling-Projekt. Das Vorhaben ist untrennbar mit dem Namen von Prof. Dr. Bernhard Ulrich verbunden. Das Solling-Projekt leistete Pionierarbeit auf dem Gebiet der terrestrischen Ökosystemforschung in Deutschland. Aufgrund bodenkundlicher Messungen und Untersuchungen zum Stoffhaushalt lenkte Ulrich bereits 1979 den Blick auf Luftverunreinigungen als wesentliche Ursache für standörtliche Veränderungen in Waldgebieten. Seine Arbeiten stehen für ein neues Verständnis der gegenwärtigen Wachstumsbedingungen der Wälder.

Die ersten Boden-Probennahmen im Solling erfolgten im Oktober 1966. Mit dem dafür erarbeiteten Konzept der Bodeninventuren wurde der Grundstein gelegt für die Bodenzustandserhebungen (BZE) des Bundes und der Länder wie auch für die im Jahr 2011 veröffentlichte BioSoil-Inventur auf europäischer Ebene.

Heute zählen die Flächen des Solling-Projektes ebenso wie die Messnetze der Forstlichen Umweltkontrolle in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zum Verantwortungsbereich der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) in Göttingen.

Die Bodenzustandserhebung ist heute ein Kernelement des Forstlichen Umweltmonitorings. Sie erfasst Zustand und Veränderungen von Waldböden. Mit der Änderung des BWaldG § 41 A Absatz 6 (BWALDG 1975) erhält die Bodenzustandserhebung eine rechtliche Grundlage. Gegenwärtig wird dazu eine Rechtsverordnung erarbeitet, die das weitere Vorgehen regelt. Indem in Niedersachsen auf den gleichen Beobachtungspunkten auch Informationen zu Klima und Wasserhaushalt, zur Waldernährung, zum Baumwachstum, zum Waldzustand und zur Bodenvegetation erhoben werden, ist mit der Bodenzustandserhebung eine wesentliche fachliche Grundlage zur Darstellung von Waldökosystemen entstanden.

Aufgrund der hohen Qualität der Daten und des integrativen Konzepts besteht eine große Nachfrage nach Informationen der Bodenzustandserhebung in Niedersachsen. Die Bodenzustandserhebung wird von der forstlichen Praxis als zahlenmäßige Grundlage für eine nachhaltige Waldwirtschaft, für die forstliche Standortskunde und auch als Basis für Bodenschutzkalkulationen genutzt. Wissenschaftlich werden die Daten beispielsweise als Referenz für Untersuchungen zur standortsbezogenen Leistung von Wäldern, zu standortsbezogenen Risiken der Waldentwicklung beziehungsweise als Referenz für Nährstoffmanagementsysteme herangezogen.

Die Hauptergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung in Niedersachsen sind in den Waldzustandsberichten der NW-FVA beginnend mit dem Jahr 2010 und folgende veröffentlicht. Der vorliegende Band beinhaltet Ziele, Ergebnisse und Bewertungen im Detail. Ein besonderes Augenmerk liegt auf Folgerungen für die Verwaltungen, die forstliche Praxis und für alle am Waldboden in Niedersachsen und Bremen Interessierten.

Längst ist klar, dass sich die Waldböden in den nur 15 Jahren seit der ersten Bodenzustandserhebung chemisch grundlegend verändert haben. Zu nennen sind etwa wesentliche Veränderungen des Versauerungszustandes, der Stickstoff- und auch der Kohlenstoffvorräte in den Waldböden. Es ist deshalb wichtig, die Bodenzustandserhebung als ein periodisch zu wiederholendes Konzept zu verstehen. Für 2022 bis 2024 ist die Bodenzustandserhebung III vorgesehen.

An der Erarbeitung dieses Bandes haben Fachleute aus Wissenschaft und Praxis aus verschiedenen Fachbereichen eng zusammengearbeitet. Zu nennen sind beispielsweise die Disziplinen Bodenkunde, Forstwissenschaft, Hydrologie, Klimatologie, Geografie, Standortkunde, Chemie, Vegetationskunde sowie Datenmanagement und Informationstechnologie. Allen, die an der Erarbeitung des Bandes mitgewirkt haben, sei herzlich gedankt.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre des Bodenzustandsberichtes II für den Wald der Bundesländer Niedersachsen und Bremen.



Prof. Dr. Johannes Eichhorn

Abteilungsleiter Forstliche Umweltkontrolle, NW-FVA

Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)

Forest soil status report for Lower Saxony and Bremen – Results of the second Forest Soil Inventory (BZE II)

Zusammenfassung

Als Bestandteil des Naturhaushalts in Wäldern spielen Waldböden aufgrund ihrer biologischen und chemischen Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften eine zentrale Rolle als Speicher- und Transformationsmedium gegenüber Umwelteinflüssen. Bodendaten sind deshalb ein zentrales Element des Forstlichen Umweltmonitorings. Die erste Bodenzustandserhebung (BZE I) wurde in Niedersachsen und Bremen in der Zeit zwischen 1990 und 1991 durchgeführt. Die Wiederholungsinventur (BZE II) fand schwerpunktmäßig in den Jahren 2006 bis 2008 statt. Beide Erhebungen basieren auf einem systematischen repräsentativen Rasternetz mit insgesamt 272 Aufnahmepunkten.

Bei der BZE II wurden folgende Merkmalsgruppen erfasst: Forstliche Daten und allgemeine Angaben (Punktdaten, raumbezogene Daten, Daten zur Aufnahmesituation und Angaben zu bodenverändernden Ereignissen), Boden (Profilbeschreibung, Bodenchemie inkl. Schwermetalle und Organika sowie Bodenphysik, jeweils getrennt nach Mineralboden und Humusauflage), Nadel-/Blatternahrung, Bestandesdaten, Vitalität (Waldzustandserhebung) und Bodenvegetation. Die Erhebungen und Probennahmen erfolgten nach der bundesweiten Arbeitsanleitung für die BZE II (WELLBROCK et al. 2006). Das umfangreiche Datenmanagement richtete

sich an der Integrierbarkeit der grundlegenden Informations-Kategorien (inhaltliche Merkmalsgruppen wie Erhebungen zum Bestand, Boden, Bodenvegetation sowie Ergebnisse der Laboranalytik; zeitliche Aspekte wie BZE I vs. BZE II; länderübergreifende Betrachtungen; Methoden-Dokumentation zu Beprobungs- und Analyseverfahren) und an der Implementierung zentraler, einheitlicher und übergreifender Verarbeitungs- und Auswertungsfunktionen aus.

Voraussetzung für die Ermittlung zeitlicher Veränderungen bei Folgeinventuren ist grundsätzlich die Anwendung gleicher Erhebungsprinzipien – hier insbesondere Erhebungsraster, Stichprobenkonzept und Methoden. Bei der konzeptionellen Ausgestaltung der BZE II wurden daher möglichst viele methodische Vorgaben aus der BZE I übernommen.

Für länderübergreifende Vergleiche war es weiterhin von Bedeutung, unterschiedliche Definitionen der Standortselemente der Partnerländer der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) zu vereinheitlichen. Dazu wurde durch eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern, jedem der BZE-Punkte in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt eine Substratgruppe zugeordnet. Die Generierung der länderübergreifenden Substratgruppen erfolgte nach den Merkmalen Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Die Substratgruppen sind als operationale Regionalisierungseinheiten anzusehen, d. h. über die Ergebnisse für die Substratgruppen können die Befunde in Größenordnungen in die Standortskartierung und damit in die Fläche übertragen werden. Insgesamt wurden 16 Substratgruppen für Nordwestdeutschland unterschieden. Von den 13 im niedersächsischen BZE II-Kollektiv ausgeschiedenen Substratgruppen ist der unverlehnte Sand mit 37 % die am häufigsten vorkommende Substratgruppe. Alle vier BZE II-Punkte in Bremen gehören dieser Substratgruppe an.

Die prozentuale Verteilung der Substratgruppen innerhalb der BZE II entspricht der Verteilung der wichtigsten Bodeneinheiten im Wald nach den Legendeinheiten der Bodenübersichtskarte „BÜK 1000 N“ (BGR 2007) recht gut. Auch die Verteilung der Nährstoffgruppen sowie der Wasserhaushaltsstufen der forstlichen Standortskartierung im Landes- und Betreuungswald in Niedersachsen zeigt ein ähnliches Muster wie die BZE II. Die BZE-Stichprobe bildet damit die Verhältnisse des Waldes in Niedersachsen insgesamt sehr gut ab. Mit den zusätzlichen Informationen zur Nährstoffversorgung aus der Laboranalyse kann die Trophieeinschätzung an den BZE II-Punkten insgesamt feiner differenziert werden als in der Standortskartierung. Entsprechend ist die prozentuale Belegung vor allem der gut mesotrophen, aber auch der schwach mesotrophen Nährstoffversorgungsklasse zu Lasten der mesotrophen Klasse in der BZE II höher im Vergleich zur Standortskartierung. Die jedoch insgesamt gute Übereinstimmung der Trophiestufenverteilung in der Standortskartierung und BZE II spricht für die Aussagekraft und Qualität beider Verfahren.

Bodenchemie

Aufgrund der standörtlichen Vielfalt, die von basenreichen Tonen und Lehmen bis hin zu überwiegend nährstoffarmen Sandstandorten reicht, weisen die bodenchemischen Parameter weite Spannen auf. Für die BZE II-Punkte in Niedersachsen und Bremen ergeben sich im Mittel für die effektive Austauschkapazität mittel-hohe, für die Basensättigung noch mittlere, die Calciumvorräte hohe und die Magnesiumvorräte mittel-hohe Bewertungsbereiche. Die Kaliumvorräte befinden sich im geringen Bereich. Die Böden sind überwiegend dem Austauscher-Pufferbereich zuzuordnen. Die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte liegen im mittleren Bewertungsbereich. Im Ländervergleich ist die mittlere Nährstoffversorgung der Waldstandorte in Niedersachsen deutlich schwächer als die in Hessen und Sachsen-Anhalt. Die mittleren Kohlenstoffvorräte sind jedoch in Niedersachsen am höchsten.

Durch die Einteilung der Böden in Substratgruppen werden Muster deutlich, die zeigen, wie die bodenchemische Situation je nach Standortseinheit variiert. So befinden sich die Böden aus unverlehmtem Sand, Buntsandstein und Granit unterhalb einer Basensättigung von 20 % und damit lediglich im geringen Bewertungsbereich, wogegen Böden aus Kalkstein, Ton(stein) und Lehm mit Werten über 60 % Basensättigung in hohe Bewertungsbereiche fallen.

Darüber hinaus zeigt die Einteilung nach dem Kalkungsstatus der BZE-Punkte, dass sich die gebildeten Kollektive seit der BZE I unterschiedlich entwickelt haben. Ausgeschieden wurden die Gruppen (1) „entfällt“, zu der die Substratgruppen gehören, die nicht für eine Kalkung vorgesehen sind (Kalkstein, organisch geprägte Standorte, Mergel) und (2) die Kalkungskulisse, zu der die Substratgruppen gehören, die für eine Kalkung vorgesehen sind. Diese Kalkungskulisse beinhaltet die gekalkten Punkte, an denen vor der Probennahme der BZE II Kalkungen stattgefunden haben, und die ungekalkten Punkte, an denen zuvor noch keine Kalkung stattgefunden hat.

Die Auswertungen zu der Wirkung von Bodenschutzkalkungen zeigen, dass Basenverluste, vor allem infolge hoher Säureeinträge, aber auch durch Sulfatausträge, Biomassenentzug und verringerte basische Einträge aus der Luft, durch die Kalkung kompensiert werden können. Auf den gekalkten Standorten zeigt sich eine Verbesserung der durchschnittlichen Basensättigung im Oberboden. Die Bodenschutzkalkung hat einen langfristig positiven Einfluss auf den chemischen Bodenzustand und auf die Sicherung der Nährstoffverfügbarkeit. Die Ergebnisse der BZE II zeigen des Weiteren deutliche Risiken vor allem für schwach nährstoffversorgte Standorte auf, die bislang nicht gekalkt wurden. Diese Waldböden in Niedersachsen und Bremen verarmen weiter im Unterboden, hier hat die Basensättigung zwischen der BZE I und BZE II deutlich abgenommen.

Knapp 30 % der Waldböden in Niedersachsen und Bremen weisen zum Zeitpunkt der BZE II Mull und Mullartigen Moder als dominierende Humusform auf, was eine rasche Streuzersetzung und gute Humus-Bodendurchmischung durch Bodenwühler anzeigt. Dieser Anteil hat sich im Vergleich zur BZE I nicht verändert.

Der Anteil von BZE-Punkten mit Rohhumus-Humusformen dagegen, der eine stark reduzierte Streuzersetzung und Einarbeitung in den Mineralboden kennzeichnet, hat sich von 14 % in der BZE I auf 5 % in der BZE II verringert. Damit ist insgesamt eine qualitative Verbesserung der Humusformen vom Rohhumus zu Moder-Humusformen verbunden. In dieses Bild passt auch die leichte Abnahme der durchschnittlichen Trockenmasse im Mittel aller Humusaufgaben zwischen der BZE I und II und die deutliche Abnahme der Trockenmassen im Auflagehumus bei gekalkten Beständen um 12 % bezogen auf die BZE I. Die geringeren Trockenmassen im Auflagehumus in der BZE II können jedoch auch im Zusammenhang mit den hohen Stickstoffeinträgen, höheren Temperaturen bei ähnlichem Niederschlag, stärker durchforsteten Beständen mit mehr Laubholz und Waldkalkungsmaßnahmen stehen.

Niedersächsische Waldböden stellen eine bedeutende Kohlenstoffsene dar. Der mittlere Kohlenstoffvorrat von 180 t pro Hektar im Waldboden (inkl. organisch geprägter Standorte) zeugt von dieser langfristigen Nettospeicherung. Der Auflagehumus hat dabei einen Anteil von rund 14 %. Sehr hohe Kohlenstoffvorräte sind in organisch geprägten Böden gespeichert; hier ist mit Vorräten zwischen 200 und 600 t Kohlenstoff je Hektar zu rechnen. Im Zeitraum zwischen 1991 (BZE I) und 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in niedersächsischen Waldböden um insgesamt 21,7 t je Hektar zugenommen (+16 %), dies entspricht einer jährlichen Rate von 1,35 t je Hektar (ohne Moorstandorte). Diese jährliche Speicherrate von Kohlenstoff resultiert nur aus Zunahmen im Mineralboden, vorwiegend bis 30 cm Bodentiefe. Die Kohlenstoffvorräte in der Auflage haben dagegen um 3 t je Hektar abgenommen (-10 %). Die Ergebnisse geben Hinweise auf einen positiven Einfluss der Kalkung auf den Kohlenstoffhaushalt: Zwar wird durch die Waldkalkung der Kohlenstoffvorratsabbau im Auflagehumus deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch diese Kohlenstoffverluste über einen Vorratsaufbau im Mineralbodenhumus im Oberboden mehr als kompensiert. Die Kalkung hat somit die Senkenfunktion für Kohlenstoff der niedersächsischen Waldböden verbessert.

Bei einem modellierten mittleren luftgetragenen Gesamteintrag an anorganischem Stickstoff von ca. 22 kg pro Hektar und Jahr für Niedersachsens Waldbestände in der Zeit von 1991-2007 haben sich die Stickstoffvorräte auf Profilebene im gleichen Zeitraum insgesamt tendenziell erhöht, im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe signifikant. Durch die Abnahmen im Unterboden und im Auflagehumus ergibt sich auf Gesamtprofilebene im Vergleich zur BZE I jedoch keine signifikante Veränderung. Der mittlere Nitrataustrag wird auf ca. 6 kg pro Hektar und Jahr geschätzt, sodass in Niedersachsens Wäldern grundsätzlich Stickstoff gespeichert wird. Teilweise kommt es jedoch auch zu hohen Stickstoffausträgen, insbesondere unter Kiefer und Fichte in Gebieten mit hoher Stickstoffdeposition wie dem Westniedersächsischen Tiefland, aber auch im Bergland, vor allem nach Sturmwurfereignissen. Hier kann Stickstoff nicht mehr vollständig im System gespeichert werden, sondern

wird mit dem Sickerwasser in Form von Nitrat ausgewaschen. Diese Wälder können als stickstoffgesättigt angesehen werden.

Waldernährung

Fast die Hälfte der BZE-Kiefernpunkte (47 %, ohne organisch geprägte Standorte) ist 2007 gut (mindestens im Normalbereich) mit den Hauptnährstoffen Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium und Schwefel versorgt und ausgewogen ernährt. Mangelernährung ist bei der Kiefer sehr selten (2 BZE-Punkte). Latenter Magnesiummangel tritt an einem Drittel der BZE-Kiefernpunkte auf. Zwischen den Substratgruppen bestehen kaum Unterschiede in der Ernährungssituation der Kiefer.

Die Ernährungssituation der Fichte ist deutlich angespannter. Nur 5 % der BZE-Fichtenpunkte sind ohne (latenten) Mangel an Hauptnährstoffen und weisen ausgewogene Elementverhältnisse auf (ohne organisch geprägte Standorte). An 20 % der Fichtenpunkte wird die Mangelgrenze für ein Hauptnährelement unterschritten. Besonders häufig sind (latenter) Kaliummangel und unausgewogene N/K-Quotienten. Latenter Schwefelmangel tritt an 45 % der Fichtenpunkte auf.

Bei der Buche treten besonders häufig Ernährungsdefizite auf. Lediglich an einem BZE-Punkt wird eine gute und ausgewogene Ernährung festgestellt, Mangelernährung zeigt sich dagegen an 42 % der erfassten Buchen-Punkte. Ein Großteil der Buchenbestände weist substratübergreifend (latenten) Phosphormangel auf. Zusätzlich besteht eine angespannte Ernährungssituation für Kalium und Schwefel an rund der Hälfte der BZE-Buchenpunkte und an einem Drittel der Punkte ist die Versorgung mit Magnesium unzureichend. Analog hierzu sind unausgewogene Stickstoffquotienten weit verbreitet.

Die Versorgung der Eichen mit den Hauptnährelementen ist 2007 nur an 10 % der BZE-Eichenpunkte gut und ausgewogen, an 8 % wird die Mangelgrenze unterschritten. Phosphordefizite sind bei der Eiche häufig, zusätzlich tritt latenter Magnesium- und Calciummangel auf. Relativ am besten ist die Ernährungssituation der Eiche auf Lösslehm.

Insgesamt bilden die drei (bei der Fichte vier) landesweiten Inventuren für die Waldernährung in Niedersachsen und Bremen die Veränderungen der anthropogenen Stoffeinträge und die Bodenschutzkalkung sehr gut ab. Die Maßnahmen zur Luftreinhaltung haben zu einer deutlichen Absenkung der Schwefelgehalte in den Nadeln und Blättern aller vier Hauptbaumarten geführt. Die Überversorgung der Bäume mit Stickstoff auf allen Substraten ist ein Beleg für den immer noch hohen Einfluss anthropogener Stickstoffeinträge in die Wälder, insbesondere im Nordwestniedersächsischen Tiefland. Mit der Bodenschutzkalkung hat sich die Magnesiumernährung der Kiefern, Fichten und Eichen verbessert.

Bodenvegetation

Der direkte Vergleich der BZE II-Vegetationsdaten mit den erhobenen bodenchemischen Kenngrößen ermöglichte Analysen zu den Zusammenhängen zwischen der Pflanzenartenzusammensetzung der Waldbestände und dem Bodenzustand (pH(H₂O)), der Basensättigung und dem C/N-Verhältnis sowie zu den austauschbaren Vorräten der basischen Kationen Calcium, Magnesium und Kalium aus der effektiven Kationenaustauschkapazität, jeweils bezogen auf den mineralischen Oberboden (0-5 cm Bodentiefe). Auf der Grundlage dieser Ergebnisse konnten Zeigerarten identifiziert werden, die operationale Hilfestellungen für die Trophieabschätzung von Waldstandorten in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Bremen bieten.

Standortskartierung

Bodenchemische Analysen sind von besonderer Wichtigkeit für eine differenzierte Standortdiagnostik. Sie können die Nährstoffeinschätzung der Standortskartierung präzisieren, um das standörtliche Potenzial einzelner Standorte besser abschätzen zu können. Dadurch lassen sich forstliche Maßnahmen (u. a. Baumartenwahl, Waldkalkungen und Vollbaumnutzungen) näher am Standortspotenzial orientieren und nachhaltiger ausrichten.

Die Themenschwerpunkte Schwermetalle, Organika und Bestandeswachstum werden in gesonderten Veröffentlichungen publiziert.

Stichworte: Bodenzustandserhebung, Waldkalkung, Substratgruppen, Waldernährung, Waldvegetation, Kohlenstoff

Abstract

The chemical and biological filter and buffer capacity of forest soils, as well as their role as a medium for the storage and turnover of nutrients, mean that forest soils are vital in reducing the impact of environmental influences. Soil data are, therefore, a central element in environmental monitoring. The first National Forest Soil Inventory (BZE I) in Lower Saxony and Bremen was carried out between 1990 and 1991. The second National Forest Soil Inventory (BZE II) followed between 2006 and 2008. Both inventories were based on a systematic, representative raster net with 272 sampling plots.

For the BZE II the following groups of characteristics were recorded: Forestry data and general information (plot data, spatial data, data on the survey situation and information on soil changing events), soil data (separate for humus layer and mineral soil: profile description, soil chemistry, including heavy metals and organics, as well as soil physical properties), foliar nutrient status, stand data, vitality (forest condition survey), and forest floor vegetation. The inventory and sample collection followed the methods described in the national field survey guide for the BZE II (WELL-BROCK et al. 2006). The extensive data management was aimed at ensuring the easy

integration of the basic information categories (e.g. stand data, soil data, forest floor vegetation, analytical data, temporal aspects such as BZE I vs. BZE II, inter-state considerations, documentation of the sampling and analytical methods) and in the implementation of central, standardised and universal processing and evaluation functions.

In order to be able to determine temporal changes, the repeat inventory has to follow the same basic monitoring principles – especially the same sampling raster, sampling design and methods should be used. In designing the BZE II, therefore, as many of the methodical specifications as possible were adopted from the BZE I.

With a view to being able to compare results between federal states it was also important to standardise the different site element definitions of the Northwest German Forest Research Institute (NW-FVA) partner states. Through a panel of experts, consisting of soil scientists and experienced soil classifiers, each of the BZE plots in Lower Saxony, Hesse and Saxony-Anhalt were assigned to a substrate group. The generation of substrate groups common to all the federal states was based on the following characteristics: initial substrate (bedrock), stratification (substrate stratification), soil texture, soil morphology and soil physical properties. The substrate groups can be viewed as operational regionalising units, i.e. using the results for the substrate groups the findings can be transferred to the site maps and applied to the larger area. In all, 16 substrate groups were distinguished for northwest Germany. From the 13 BZE II substrate groups that apply in Lower Saxony, pure sand, with 37 %, occurs most frequently. All four BZE II-plots in Bremen belong to this substrate group.

The share (%) of the substrate groups within the BZE II corresponds well with the distribution of the most important soil types in the forests, according to the soil map “BÜK 1000 N” (BGR 2007). The distribution of nutrient groups and water regime types on the forestry site maps for state forests (and other forests managed by the state forestry service) also show a similar pattern to the BZE II. The BZE survey, on the whole, represents the actual forest conditions in Lower Saxony very well. With the additional information on nutrient regimes gleaned from laboratory analyses, the estimation of trophic levels can be more finely differentiated at the BZE II sample plots than on site maps. For this reason, the percentage of sites with “good mesotrophic” or “weak mesotrophic” nutrient regimes had increased at the expense of the “mesotrophic” class in the BZE II, in comparison with the site maps. Overall, though, there is good agreement between site maps and the BZE II on the distribution of trophic classes, which speaks for the informational quality of both methods.

Soil chemistry

Because of the diversity of sites, ranging from base-rich clays and loams to predominantly nutrient poor sands, soil chemical parameters display a wide range of values. On average, across the BZE II plots in Lower Saxony and Bremen, the value ranges for effective cation exchange capacity are medium to high, for base saturation medium, for calcium stocks high and magnesium stocks medium to high. Potassium stocks are, however, low. The soils are predominantly in the exchange-buffer range and there are medium levels of carbon and nitrogen stocks. The mean nutrient supply of the forest sites in Lower Saxony is considerably lower than that in Hesse and Saxony-Anhalt. The mean carbon stocks are, however, highest in Lower Saxony.

With the classification according to substrate groups, clear patterns are recognizable and show how the soil chemistry situation varies by site type. For instance, pure sands, soils on red sandstone and granite have a base saturation of under 20 %, and are classified as low, whereas limestone, clay (mudstone) and loam soils, with over 60 %, have high base saturation values (classified as high).

Beyond that, a classification of the BZE-plots into categories according to liming status shows that limed and non-limed sites have developed differently since the BZE I. Two categories were separated out: (1) “omitted”, to which those substrate groups belong, which are not designated to be limed (limestone, organic soils, marl) and (2) substrate groups that are scheduled to be limed. The latter category contains the limed plots (which had already been limed prior to the BZE II) and the not yet limed plots.

An assessment of the effectiveness of soil liming shows that the loss of bases (primarily as a result of high acid input but also through sulfate outputs, biomass removal and reduced atmospheric input of bases) can be compensated by liming. There is an improvement in the average base saturation of the upper soil at the limed sites. The soil liming has a long term positive influence on the soil chemical status and on securing and maintaining the nutrient balance. The results of the BZE II also show clear risks for those sites with low nutrient supply which have, to date, not been limed. For this category of forest soils in Lower Saxony and Bremen, the lower soil is still degrading. Between the BZE I and BZE II, the base saturation has deteriorated clearly.

Almost 30 % of forest soils in Lower Saxony and Bremen had, at the time of the BZE II survey, mull or mull/moder as the dominant humus form, which indicates rapid litter decomposition and good humus-soil mixing by soil dwelling and burrowing organisms. The proportion of sites with these humus forms had not changed compared to BZE I. The proportion of BZE plots with raw humus forms (mor), which are characterised by slow litter decomposition and little mixing of the litter layer with soil, had, on the other hand, decreased from 14 % in BZE I to 5 % in BZE II. This is due to an improvement from mor to moder humus forms and could be the reason for a slight reduction overall in mean humus dry weight between BZE I and BZE II, and a sharp reduction of humus dry weight of ca. 12 % at limed

sites compared to BZE I. The reduced dry weight of humus layers in BZE II could, however, also be due to higher nitrogen deposition, higher temperatures in conjunction with unchanged precipitation, more intensely logged stands with more broad-leaved species, and forest soil liming.

The forest soils in Lower Saxony are an important carbon sink. An average of ca. 180 t per hectare stored carbon (including sites with organic soils), 14 % of which is in the humus layer, attests to a long term net carbon storage. Organic soils contain very high amounts of carbon; the carbon stock in these soils can lie between 200 and 600 t carbon per hectare. In the period between 1991 (BZE I) and 2007 (BZE II), the carbon stocks in the forest soils of Lower Saxony have increased by around 21.7 t per hectare (+16 %); this equates to an annual increase of 1.35 t per hectare (not including moor sites). This annual storage rate of carbon is the result of increased carbon storage in the mineral soil, predominantly in the upper 30 cm. The carbon stocks in the humus layer have, in contrast, fallen by around 3 t per hectare (-10 %). The results indicate that liming has a positive influence on the carbon balance. Although liming clearly increases the decomposition of carbon stocks in the humus layer, these losses are overcompensated by increased carbon storage in the upper mineral soil. Liming has improved the carbon sink function of forest soils in Lower Saxony.

Model calculations predict a mean atmospheric anorganic nitrogen deposition rate of 22 kg per hectare and year for forests in Lower Saxony between 1991 and 2007. Nitrogen stocks in the soil profile have, in fact, tended to increase in this period; this increase is significant in the upper 30 cm of soil. A reduction of nitrogen stocks in the lower soil and in the humus layer mean, however, that in comparison with BZE I there has been no significant change. The mean nitrogen discharge is estimated to be ca. 6 kg per hectare and year, so that there is a net nitrogen storage in the forests of Lower Saxony. There are, however, also instances of high nitrogen discharge, particularly at pine and spruce sites with high atmospheric nitrogen deposition, such as the lowlands of western Lower Saxony, but also in the mountains, above all after windthrow events. In these cases, nitrogen can no-longer be fully stored in the system and is leached out of the soil as nitrate. These forests can be considered to be nitrogen saturated.

Forest nutrition

In 2007, almost half of pine BZE plots (47 %, not including plots where the soils have a pronounced organic character) show good (at least in normal range), balanced foliar contents of the main nutrients – nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sulphur. Nutrient deficiencies are rare (two plots) but latent magnesium deficiency was found at a third of pine plots. Between the substrate groups, there is almost no difference in the nutritional status for pine.

At spruce plots, the nutritional status is more serious. Only 5 % of the spruce plots are without (latent) deficiencies of the main nutrients and have balanced element ratios (not including plots where the soils have a pronounced organic

character). For 20 % of plots, the content of a main nutrient is in the deficiency range. (Latent) potassium deficiency and an unbalanced N/K ratio are particularly frequent. Latent sulphur deficiency was detected at 45 % of spruce plots.

Nutrient deficiency is especially frequent for beech. A good, balanced nutrient status was found at only one plot. On the other hand, nutrient deficiencies are evident at 42 % of beech plots. The majority of beech plots exhibited, independent of substrate, (latent) phosphorus deficiency. The supply of potassium and sulphur at half of beech plots is low, while magnesium supply at one third of plots is insufficient. Unbalanced nitrogen ratios are widespread.

In 2007, the supply of the main nutrient elements was good and balanced at only 10 % of oak plots but the supply was only considered deficient at 8 % of the plots. Phosphorus deficiencies are frequent. In addition, latent magnesium and calcium deficiencies are apparent. The nutritional status for oaks is, by comparison, best on loess loam soils.

Overall, the three state inventories (four for spruce) reflect the changes in the foliar nutritional status in Lower Saxony and Bremen due to anthropogenic deposition and soil liming well. The measures taken to improve air quality have led to a considerable reduction in the sulphur content in the needles and leaves of all four main tree species. The oversupply of nitrogen to trees, on all substrates, is evidence of anthropogenic nitrogen deposition in forests, particularly in the northwest lowlands. Liming has improved the magnesium foliar content of pine, spruce and oak.

Forest floor vegetation

A direct comparison of the BZE II vegetation data with the sampled soil chemical parameters enables an analysis of the relationship between plant species composition and the soil chemical status in the upper mineral soil layer (0-5 cm). Thus, the effect of the soil status (pH(H₂O)), base saturation and the C/N ratio, as well as the exchangeable stocks of the base cations calcium, magnesium and potassium from the effective cation exchange capacity on the forest floor vegetation can be analysed. On the basis of these results, indicator species have been identified which will help in the estimation of the trophic status of forest sites in Lower Saxony, Hesse, Saxony-Anhalt, Schleswig-Holstein and Bremen.

Site mapping

Soil chemical analyses are especially important for a differentiated site diagnostic. They can make the nutrient estimation in forest site mapping more precise and thus enable a better estimation of the potential of individual forest sites. In this way, the planning of forestry measures (e.g. choice of tree species, liming and whole-tree harvest) can be better aligned with the site potential and thus be more sustainable.

The topics heavy metals, organics and stand growth will be published separately.

Keywords: Forest Soil Inventory, forest soil liming, substrate groups, forest nutrition, forest floor vegetation, carbon sequestration

1 Überblick: Bewertung und Diskussion der bodenkundlichen Ergebnisse

Jan Evers, Uwe Paar

1.1 Vorbemerkungen und Rahmenbedingungen

Der forstliche Standort ist definiert als die „Gesamtheit der für das Wachstum der Waldbäume wichtigen Umweltbedingungen, wie sie im Gelände durch Lage, Klima und Boden bestimmt wird“ (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Insofern ist die Kenntnis der Böden, ihrer Entwicklung und Gefährdung sowie der Einflussfaktoren, die auf sie wirken, die Grundlage für eine multifunktionale, nachhaltige Forstwirtschaft.

Der Wald in Niedersachsen und Bremen wächst auf Böden, deren Vielfalt durch verschiedenste geologische Ausgangsgesteine, Umlagerungen und Bodenentwicklungen geprägt ist. Hinsichtlich der Veränderungen von Waldböden ist allgemein festzuhalten, dass durch die Bildung von Kohlensäure und organischen Säuren die Böden in Mitteleuropa „von Natur aus“ dazu tendieren, allmählich zu versauern, sofern keine ausreichende Säurepufferung durch Verwitterung erfolgt. Neben diesen natürlichen Prozessen hat der Mensch direkt und indirekt insbesondere in Niedersachsen und Bremen in der Vergangenheit einen erheblichen Einfluss auf die Waldböden ausgeübt, der weit über die natürliche Versauerung hinausgeht. So haben sowohl die historischen Waldnutzungen wie Waldweide, Plaggen- und Streunutzung als auch intensive Holznutzung durch Köhlerei, Glashütten oder Eisenerzgewinnung die Waldböden stark verändert. Vielerorts sind in jüngerer Vergangenheit zudem Waldstandorte melioriert, tiefgepflügt oder mit dem Waldstreifenpflug, Grubber bzw. Fräsen bearbeitet worden. Hinzu kommen hohe atmogene Säure-, Stickstoff-, Staub- und Schwermetalleinträge, die die Waldböden flächenübergreifend stark belastet haben bzw. immer noch belasten. Die Bemühungen der bundesweiten Luftreinhaltepolitik konnten die Einträge in den Wald zwar deutlich verringern, doch vor allem die Stickstoffeinträge sind immer noch zu hoch.

Die Waldböden in Niedersachsen und Bremen sind insgesamt sehr heterogen. Wald stockt zumeist auf den Flächen, die sich in der Vergangenheit weniger gut für die landwirtschaftliche Nutzung eigneten, weil die Witterung zu ungünstig, das Gelände zu steil, der Boden zu steinig, nass oder nährstoffarm war.

Vor dem Hintergrund der aufgezeigten Einflussfaktoren auf die Waldböden ist ein wesentliches Ziel der Waldbodenzustandserhebungen, den aktuellen Bodenzustand zu beschreiben und zu bewerten sowie bodenkundliche Veränderungen zahlenmäßig in Raum und Zeit abzubilden. Die Bodenzustandserhebungen sollen

zu einem vertieften Verständnis von Ausmaß, Fortschritt und Ursachen der chemischen und physikalischen Bodenveränderungen beitragen. Daraus ergibt sich auch die Notwendigkeit, Standortbedingungen als Grundlage forstlichen Handelns in Zukunft präziser zu fassen.

1.1.1 Ländlicher Versorgungswald und Waldboden

Bis ins 18. Jahrhundert war Wald als ländlicher Versorgungswald (Prinzip der Bedarfsdeckung) essentieller Bestandteil des ländlichen Lebens. Neben der Produktion von Holz war die Nutzung anderer Güter aus dem Wald bedeutend. Im Einzelnen kompensierte die Waldweide die nur knapp verfügbare Offenlandweide, die Eichelschweinemast das knappe Schweinefutter, die Waldstreunutzung das fehlende Stroh, die Futterlaubgewinnung den Heuengpass und der Waldfeldbau den Mangel an Ackerfläche und Dünger. Köhlerei produzierte Holzkohle als Hochtemperatur-Energiequelle (HMLWLFN 1994, STUBER u. BÜRGI 2011).

Waldgüter sicherten die Ernährung der Viehbestände in der Übergangszeit vom Winter zum Frühling, wenn der Heuvorrat aufgebraucht und das Gras noch nicht ausgetrieben war (IRNIGER 1993). Die historische Bedeutung der landwirtschaftlichen Nutzungen im ländlichen Versorgungswald kann kaum überschätzt werden.

Gleichwohl entstanden durch diese Waldinanspruchnahme Veränderungen der Standorte und des Stoffhaushalts, die teilweise bis heute nachwirken. Über langjährige Nutzungen der Waldstreu wurden beispielsweise bis zu 2.000 kg N/ha (KREUTZER 1972) entnommen. Derartige Eingriffe lassen sich bis heute in Stickstoffbilanzen nachweisen. Schäden durch Viehweide im Wald bewirkten für forstliche Böden und Standorte oft lang anhaltende Bodenverdichtungen und Erosionen mit Spätfolgen für den Jungwuchs und den Baumzuwachs (GROSSMANN 1927).

In Niedersachsen herrschten im 19. Jahrhundert häufig Heiden und übernutzte Wälder als Folge übermäßiger Holznutzung durch Salinen, Glas- und Eisenhütten, Holzkohlewirtschaft sowie Gruben- und Brennholznutzung vor. Umfangreiche Kahlschläge während und infolge des 2. Weltkrieges reduzierten die Holzvorräte erheblich. Wiederbewaldungen erfolgten vor allem mit Kiefer und Fichte zur Deckung des hohen Bauholzbedarfes, auch nach verheerenden Sturmkatastrophen wie 1972 und nach großen Waldbränden 1975 und 1976 (NLF 2018). Die Wiederbewaldung veränderte und verbesserte vielerorts die forstlichen Standortseigenschaften. Mit großflächigen, reinen Nadelbeständen in Altersklassenwäldern entstand ein neuer Waldaufbau, aber auch eine neue Qualität von Risiken. Zu den Risiken zählen insbesondere eine langsame Zersetzung von Nadelstreu, Insektenbefall, Stürme und Bodenfreilagen mit entsprechenden Folgen für Humus, Mineralboden und Standort.

1.1.2 Säureeintrag und Waldboden

Mitte der 1970er-Jahre erreichte die Belastung der Wälder durch die aus der Nutzung fossiler Energieträger emittierten Luftschadstoffe Schwefel und Stickstoff ihren Höhepunkt.

ULRICH et al. (1979) wiesen auf Grundlage zehnjähriger Messreihen zum Stoffhaushalt von Wäldern im Solling nach, dass in einer als Reinluftgebiet ausgewiesenen Region, fernab von Siedlungen und Industrie, hohe atmogene Säure- und Stickstoffbelastungen aus der Luft auftraten. Diese Einträge führten nachweisbar zu einer fortlaufenden Versauerung der Böden unter Freisetzung toxisch wirkender Substanzen, zur Verarmung der Böden an den Nährstoffen Magnesium, Calcium und Kalium bei gleichzeitiger Stickstoff-Eutrophierung der Waldökosysteme (BEESE 1992).

Die Reaktionsmuster der Böden auf Stoffeinträge unterschieden sich auf verschiedenen Standorten vor allem nach ihrem chemischen und biologischen Ausgangszustand. ULRICH (1981) beschrieb diese Muster als Puffersysteme. Er entwickelte zudem ein methodisches Konzept von Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldökosystemen (ULRICH et al. 1984).

Wesentlich geprägt durch die Ergebnisse der Waldökosystemforschung in Göttingen fand Ende der 1970er- und Anfang der 1980er-Jahre eine politische Entscheidungsfindung zur Verbesserung der Luftqualität statt. Die Genfer Luftreinhaltekonvention der Vereinten Nationen UNECE (1979) und die Großfeuerungsanlagen-Verordnung (BIMSCHV 2013) bewirkten den drastischen Rückgang der SO₂-Emissionen. Ein verändertes waldbauliches Grundverständnis im Sinne eines an natürliche Prozesse angenäherten Waldbaus (LÖWE-Programm: NLR 1991, ML 2013 und NLF 2016) in Verbindung mit Bodenschutzkalkungen stützte den Zustand der niedersächsischen Wälder in einer Zeit hoher Säureeinträge. Mit dem Nachlassen der Säureeinträge stellte sich eine Entlastung der Waldböden ein. Nachwirkungen der hohen Säureeinträge zeigen sich allerdings bis heute in bodenchemischen Prozessen des Schwefel- und Säurehaushalts der Waldböden.

1.1.3 Veränderungen des Stickstoffhaushaltes und Waldboden

In früheren Zeiten war Stickstoff stets ein Mangel-element für forstliche Standorte. Durch Wald- und Streunutzungen verarmten die forstlichen Standorte an diesem Element. Im 20. Jahrhundert stiegen jedoch die Stickstoffeinträge aus der Verbrennung fossiler Energieträger und aus der intensiven Landwirtschaft an und erreichten Ende der 1970er-Jahre maximale Werte. In den nachfolgenden Jahrzehnten sind Reduktionen der zu hohen Einträge nachweisbar (ANDREAE et al. 2016). Stickstoff hat in Wäldern eine Zweigesichtigkeit (SRU 2015). Er fördert das Wachstum, verändert aber gravierend eine Vielzahl standörtlicher Bedingungen (EICHHORN 1995, KÖLLING 1991, DE VRIES et al. 2007).

1.1.4 Klimaveränderungen und Waldboden

Messdaten von rund 130 niedersächsischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zeigen für den Zeitraum 1961-2017 seit 1988 eine gegenüber der Referenzperiode (1961-1990) erhöhte mittlere Monatstemperatur. In der forstlichen Vegetationszeit (Mai bis September) wurde seit 1988 in 27 von 30 Jahren der Durchschnittswert überschritten, in der Nichtvegetationszeit (Oktober bis April) war dies in 24 von 30 Jahren der Fall. Mit deutlichen Abweichungen vom langjährigen Mittel waren die Vegetationsperioden 1992, 1997, 1999, 2002 und 2003 sowie 2006, 2016 und 2018 sowie die Nichtvegetationszeit 1990, 2006 und 2014 die wärmsten (SUTMÖLLER 2017). Klimaprojektionen gehen davon aus, dass dieser Trend anhält.

Bei den im Zeitraum 1960-2017 gemessenen Niederschlagswerten bestehen zwischen den einzelnen Jahren zum Teil starke Schwankungen. Bei den über diesem Zeitraum gemessenen Niederschlagswerten wird keine klare Tendenz deutlich. Besonders niederschlagsreich war die Vegetationsperiode 2007, besonders trocken die Nichtvegetationsperiode 1995/96 (SUTMÖLLER 2017).

Klimaänderungen wirken sich auf den Stoffhaushalt und den Wasserhaushalt von Waldböden aus. Neben der Verfügbarkeit von Nährstoffen ist eine ausreichende Wasserversorgung Grundvoraussetzung für das Wachstum der Wälder. Obwohl die allgemeinen klimatischen Bedingungen der vergangenen Jahrzehnte in Niedersachsen als ausreichend feucht angesehen werden können, trat infolge seltener, extremer Trockenjahre das Wasserangebot als limitierender Faktor für den Zuwachs der Bäume in Erscheinung. Der projizierte Klimawandel lässt aus heutiger Sicht für Niedersachsen eine Zunahme der Lufttemperatur während der Vegetationsperiode erwarten. Für den überwiegenden Teil Niedersachsens wird mit einem leichten Anstieg der mittleren Jahresniederschläge gerechnet. Das wird regional aber sehr verschieden sein; in den schon heute niederschlagsarmen Gebieten des Ostniedersächsischen Tieflandes wird mit keinem Anstieg gerechnet, was in Kombination mit steigender Temperatur deutlich gesteigerte Risiken durch unzureichende Wasserversorgung und veränderte Stoffhaushalte der Waldökosysteme erwarten lässt. Nach den Klimaszenarien verändert sich die saisonale Verteilung der Niederschläge: in der Vegetationszeit sind ausgeprägte Rückgänge, in der Nichtvegetationszeit Zunahmen zu verzeichnen (NMUEBK 2018a).

1.2 Repräsentativität der Bodenzustandserhebungen

Die Bodenzustandserhebung ist wie die Waldzustandserhebung (WZE) ein Stichprobenverfahren, das die gesamte Waldfläche des Landes Niedersachsen umfasst. Inwieweit die Ergebnisse der BZE II als repräsentativ für die Waldfläche Niedersachsens gewertet werden dürfen, wurde über den Vergleich mit der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte (BÜK 1000 N; BGR 2007) und durch die Gegenüberstellung der Standortelemente „Trophie“ sowie „Geländewasserhaushalt“ für

den Landes- und Körperschaftswald mit Ergebnissen der niedersächsischen Standortkartierung überprüft. Der Vergleich mit der BÜK 1000 N und der Verteilung der Substratgruppen in der BZE II zeigt eine recht gute Übereinstimmung. Die prozentualen Anteile der häufigsten Einheiten der Sande (unverlehmt, schwach verlehmt oder verlehmt), aber auch die Anteile seltenerer Substratgruppen wie Buntsandstein, Lehm und Granit stimmen gut überein. Unterschiede finden sich bei den Lösslehmen, die in der BZE II häufiger ausgewiesen wurden als in der BÜK 1000 N. Dies liegt an der bevorzugten Zuweisung der BZE-Punkte zu dieser Substratgruppe, wenn der überwiegende Anteil bis 90 cm Bodentiefe überwiegend durch Löss geprägt ist. In der BÜK 1000 N erfolgte die Zuordnung stärker anhand der Ausgangssubstrate.

Vergleicht man die Verteilung der aktuellen Trophiestufen für die BZE-Punkte mit denen der Standortkartierung des Landeswaldes, so dokumentieren die Ergebnisse eine bemerkenswert hohe Übereinstimmung und damit eine gute Repräsentativität des BZE-Rasternetzes für das flächenhafte Vorkommen der Trophiestufen. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Einbeziehung der chemischen Analyseergebnisse der Bodenfestphase bei der BZE zu einer deutlich feineren Differenzierung der Trophiestufen an den BZE-Punkten führt und damit die forstlichen Standorte präziser einordnet.

Ähnlich positiv sind die Befunde zur Repräsentativität des Geländewasserhaushalts im BZE-Kollektiv. Damit zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung der Standortkartierung mit den Einschätzungen am BZE-Punkt, was für die Aussagekraft und Qualität sowohl der Standortkartierung als auch der BZE spricht. Die Ergebnisse der BZE sind somit grundsätzlich auf die niedersächsische Waldfläche übertragbar.

Mit dem Stichprobennetz wird eine Vielfalt von unterschiedlichen Standorten erfasst. Am aussagekräftigsten sind die Ergebnisse für die am häufigsten in Niedersachsen vertretenen Substratgruppen der unverlehmtten und schwach verlehmtten Sande, Lösslehm sowie für Kalkstein und Buntsandstein. Die teilweise hohen Streuungen der Ergebnisse bei einigen Substratgruppen zeigen aber auch, dass das BZE-Raster nicht die ganze standörtliche Vielfalt abbilden kann.

1.3 Geologie, Boden und Bodenentwicklung

Die historische Entwicklung der Landnutzung zeigt, dass bessere Böden eher landwirtschaftlich und ärmere, zu steile oder trockene Böden waldwirtschaftlich genutzt werden. Dies spiegelt sich in den Befunden der BZE: Mit Ausnahme der Kalksteingebiete und einiger nur kleinräumig und selten vorkommender Standorte (z. B. Oberer Buntsandstein, Mergel, Zechstein, Ton, Diorit, Gabbro) stockt der Wald in Niedersachsen vor allem auf Böden, deren geologische Ausgangsgesteine im Bereich

der mittleren bzw. schwachen Nährstoffversorgung einzuordnen sind. Hierzu zählen die unverlehnten und schwach verlehnten Sande, Buntsandstein, Lösslehm, Tonschiefer, Grauwacke, Quarzit und Granit.

Niedersachsen und damit auch Niedersachsens Wälder lassen sich klimatisch und geologisch in zwei große Räume gliedern: das mit eiszeitlichen Ablagerungen bedeckte niedersächsische Tiefland und das aus den Gesteinen des Erdaltertums aufgebaute südniedersächsische Bergland.

Der Küstenraum wird von den Ablagerungen des Quartärs geprägt, wobei als Besonderheit die verbreiteten Moorflächen hervorzuheben sind. Im Zuge der Vereisungen abgelagerte Grundmoränen wurden im Periglazial geformt, fluviatil verlagert oder durch starke Winde verblasen. Sich langsam absetzende Schmelzwässer hinterließen einen Beckenton, der als Lauenburger Ton den Rohstoff für die dortige Ziegelindustrie liefert und mit Pseudo- und Stagnogleyen Standorte für Eichen-Edellaubholzwälder bildet. Auf den Grundmoränenresten der Geestflächen bildeten sich Braunerde-Podsole, Podsol-Braunerden, Pseudogleye und Mischformen aus diesen Bodentypen, zwischen den Geestrücken Podsole, Gleye, Pseudogleye und deren Kombinationen in unterschiedlichen Ausprägungen. Nach Rodung der ursprünglichen nacheiszeitlich gebildeten Bestockungen konnte die Degradation dieser von Natur aus schon armen Standorte sehr schnell fortschreiten. Unter der vor- und frühgeschichtlichen Kultivierung, der Plaggen- und Heidschnucken-Wirtschaft sowie kleinflächigen Ackernutzungen mit mittelalterlicher Plaggendüngung (Esch-Böden) differenzierten sich die Böden weiter.

Südlich anschließend liegt das Mittel-Westniedersächsische Tiefland mit der Hohen Heide als Übergangsbereich zwischen dem atlantisch geprägten Küstenraum und dem stärker subatlantisch geprägten östlichen Teil des niedersächsischen Tieflandes. Es wird ebenfalls von den Ablagerungen des Quartärs bestimmt, wobei die sandigen Anteile gegenüber den lehmig-tonigen Materialien überwiegen. Umlagerungen durch Schmelzwässer führten zu fein sortierten Terrassensanden und weiten Dünenfeldern. Auf den Geesthochflächen kommen auch unsortierte Schmelzwasser- und Geschiebedecksande vor, die nur von einem dünnen Schleier von Flugdecksanden bedeckt sind.

Das Süd-Ostniedersächsische Tiefland zeichnet sich durch markante Endmoränenzüge (bis 170 m ü. NN) und einige höhere Zeugenberge mit Höhen bis zu 90 bis 95 m ü. NN sowie die tief eingeschnittenen Urstromtäler der Aller und der Elbe aus. Abgesehen von den Endmoränenstapeln handelt es sich vorwiegend um ein flachwelliges, von vielen Abflussrinnen zerteiltes Geestgebiet, das insgesamt der planaren bis untersten kollinen Stufe zuzurechnen ist und allgemein subkontinentaler getönt ist als die anderen Waldbauregionen des Tieflandes. Ausgangsmaterialien für die bodenbildenden Prozesse sind überwiegend die sehr mächtigen, aber silikatarmen und unverlehnten Schmelzwassersande, die nur örtlich Einlagerungen von zerschwemmten Geschiebelehm und -sanden aufweisen.

Im Übergang zum Bergland liegt die stark lössbeeinflusste, flachwellige Berglandschwelle, die überwiegend landwirtschaftlich genutzt wird. Das geologisch vielgestaltige Bergland mit Gesteinen aus Trias, Jura und Kreide sowie dem Niedersächsischen Harz mit Gesteinen aus dem Paläozoikum ist bodenkundlich außerordentlich vielgestaltig und die Standorte wechseln – auch in Folge des Reliefs – auf kleinstem Raum. Häufig finden sich Lössfließerden über Buntsandstein oder auch Muschelkalk, mächtige Lössdecken sind verbreitet. Es überwiegen schluffig-lehmige bis sandige, basenarme Silikatverwitterungsböden. Die unterschiedlichen geologischen Ausgangsmaterialien bedingen vielfältige Böden: Auf carbonathaltigen Gesteinen bilden sich Rendzinen, seltener *Terrae fuscae*, die oftmals flachgründig und steinig sind. Basenarme Braunerden, die z. T. podsolig sind, und Podsole sind dominierende Bodentypen auf Kreidesandsteinen. Auf Buntsandstein treten großflächig basenarme, bei höherem Tongehalt aber auch basenreiche Braunerden auf. Wo der Obere Buntsandstein bodenbildend ansteht, kommen Pelosole vor. Auf Löss haben sich großflächig Parabraunerden entwickelt. Ausgeprägte Pseudogleye sind typisch in flachen Hangmulden mit Fließerden oder alten Verwitterungsdecken. Gleye unterschiedlicher Ausprägung treten in den Bach- und Flussauen auf. Durch intensive Landnutzung in historischen Zeiten sind viele Böden, auch Waldböden, anthropogen überprägt.

1.4 Substratgruppen

Eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern, wies sämtlichen 388 BZE II-Punkten der Länder Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt Substratgruppen zu. Die Gruppierung der Waldböden in Substratgruppen erfolgte nach den Merkmalen Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Dabei prägt das Ausgangsgestein der Bodenbildung die Substratgruppen ganz wesentlich. Die Substratgruppen ermöglichen länderübergreifende Auswertungen (EVERS et al. 2013b). Darüber hinaus können die länderspezifischen Standorteinheiten den generierten Substratgruppen zugeordnet werden, sodass eine operationale Übertragung der Ergebnisse auf Standorts-Polygone der Standortskartierung gewährleistet ist bzw. erfolgen kann.

In Niedersachsen kommen 13 der für Nordwestdeutschland insgesamt definierten 16 Substratgruppen vor. Für 63 BZE-Punkte (36 %) wurde die Substratgruppe „unverlehnte Sande“ ausgewiesen. 23 BZE-Punkte (13 %) wurden als „schwach verlehnte Sande“ eingruppiert. 10 % der BZE-Punkte werden standörtlich von Lösslehm-Vorkommen bestimmt. An weiteren 16 BZE-Punkten (9 %) finden sich organisch geprägte Standorte (v. a. ehemalige Moore). Kalkstein- und Buntsandsteinstandorte kommen im BZE-Kollektiv mit einem Anteil von 8 % bzw. 6 % vor. Vier Prozent der BZE-Punkte gehören zu den Tonschieferstandorten. Die Substratgruppen „Granit“, „Grauwacke“, „Kreidesandstein“, „Lehm“, „Ton(stein)“ und „verlehnte Sande“ sind jeweils mit Anteilen von 1-3 % vertreten.

Die vier BZE-Punkte in Bremen gehören der Substratgruppe „unverlehmter Sand“ an.

1.5 Substrat-Lagerungstypen

Der Begriff „Substrat-Lagerung“ umfasst die Angaben zur Bodenart (wie Sand, Schluff oder Ton) und den Lagerungsverhältnissen. Mit rund 20 % aller niedersächsischen BZE-Profile bilden die unverlehmten Sandsubstrate des Tieflandes die größte Gruppe: mächtigere Flugsande, fluvioglaziale Tal- und Schmelzwassersande, Sander sowie auch sehr silikatarme, Geschiebe führende Sande. Etwas stärker geschichtete Sande kommen auf gut 15 % der Standorte vor, z. B. Talsande mit schluffigen Einlagerungen oder auch mit zwischengeschalteten, stark zerschwemmten Geschiebelehmen, teils überlagert von Flugsanddecken oder mit Moorauflagen bei Grundwassereinfluss. Schwach verlehnte über unverlehmten Sanden bilden eine Gruppe von 11 % aller BZE-Standorte. Geschiebelehme unter schwächer verlehnten Geschiebedecksanden oder unter Sandlöss (bis zu 70 cm) bzw. fluviatile Lehme mit lehmiger Sandüberlagerung stehen wurzelerreichbar auf gut 4 % aller Standorte an.

Im Bergland bilden die basenarmen Silikatgesteine eine heterogene und weit verbreitete Gruppe an Ausgangsgesteinen, wie z. B. Sandstein (aus dem Buntsandstein, aber auch anderen Formationen), Quarzit, Kieselschiefer, Granit, Grauwacke und Tonschiefer, aber auch basenarme Fließerden. Zweischichtige Böden aus lehmig-sandigen bis schluffig-lehmigen Decken über basenarmen Silikatgesteinen kommen auf über 12 % aller BZE-Standorte vor. Mächtigere Lösslehmstandorte (> 70 cm) über basenarmen Silikatgesteinen treten auf 7 % auf, dabei überwiegen durch Fließerde-Bildung mit Fremdmaterial vermengte Lösslehme. Darüber hinaus kommen typische, unvermengte Lösslehme und Feinlehme mit Staukörper vor. Mächtigere Mischlehme über Kalksteinen unterschiedlicher Formationen bzw. Kalk-Verwitterungsprodukten (häufig in Fließerden und mit Löss-Einfluss von 20 cm bis 70 cm) bilden Waldstandorte auf knapp 6 % der BZE II-Punkte.

1.6 Bodentypen

Auf den niedersächsischen Waldstandorten treten vor allem zwei Bodentypen auf. 33 % der BZE-Standorte sind durch den Bodentyp Braunerde und 24 % durch den Bodentyp Podsol charakterisiert. Für 8 % der BZE-Punkte ist der Bodentyp Pseudogley, für 6 % die Parabraunerde ausgewiesen. Treposole und Gleye finden sich jeweils an 6 % der BZE-Punkte. Diese Hauptbodentypen kommen somit insgesamt auf 83 % der niedersächsischen BZE-Punkte vor. Auf den restlichen BZE-Standorten finden sich Moore, Pelosole, Ranker, Kolluvisole, Regosole, Rendzinen und Terrae fuscae sowie Plaggeneschböden mit prozentualen Anteilen von jeweils 1-4 %.

1.7 Trockenrohdichten und Skelettanteile

Hinsichtlich bodenphysikalischer Eigenschaften sind Steingehalte (Groboden) vom Feinboden zu unterscheiden. Je nach Korngrößen- und Mineralzusammensetzung, Verdichtung, Bodentiefe sowie organischer Beimischung unterscheidet sich die Dichte des Mineralbodens. Der Unterboden weist in der Regel höhere Trockenrohdichten als der Oberboden auf. Im Vergleich der Substrate finden sich sehr geringe Trockenrohdichten bei organisch geprägten Standorten, aber auch bei Tonschiefer, Grauwacke, Kreidesandstein und Granit mit Werten von unter $0,8 \text{ g/cm}^3$ in 0-5 cm und 5-10 cm Bodentiefe. Sie sind Ausdruck der hohen Humusgehalte und des lockeren Mineralbodens direkt unterhalb des Auflagehumus. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Trockenrohdichten des Feinbodens dieser Substratgruppen auf bis zu $1,2\text{-}1,4 \text{ g/cm}^3$ an, der Granit erreicht $1,6 \text{ g/cm}^3$ in 60-90 cm Bodentiefe. Besonders auffällig sind die hohen Werte für die unverlehmten und schwach verlehnten Sande mit Trockenrohdichten des Feinbodens um $1,1 \text{ g/cm}^3$ im Oberboden. Alle Trockenrohdichten des Feinbodens dieser Substrate steigen mit zunehmender Bodentiefe an und erreichen mit Werten zwischen $1,4$ und $1,6 \text{ g/cm}^3$ die höchsten Werte in der Tiefenstufe 60-90 cm.

Die Trockenrohdichten in Waldböden, vor allem im Oberboden, sind verhältnismäßig gering und wesentlich geringer als die landwirtschaftlicher Ackerflächen. Für 144 landwirtschaftliche Flächen in Niedersachsen wurden im Pflughorizont beispielsweise mittlere Trockenrohdichten von rund $1,6 \text{ g/cm}^3$ ermittelt (LEBERT et al. 2004). Die BZE-Landwirtschaft für Niedersachsen ($n = 491$) ergab für Ackerflächen im Oberboden von 0-10 cm eine Trockenrohdichte des Feinbodens von $1,3$ und in 10-30 cm von $1,41 \text{ g/cm}^3$. Unter Grünland lagen die Werte bei $0,87$ (0-10 cm) und $1,0 \text{ g/cm}^3$ (10-30 cm) und waren damit den Waldböden näher (HEIDKAMP, A. 2018: mündliche Mitteilung, Thünen-Institut für Agrarklimaschutz).

Auch die Grobbodenanteile nehmen mit zunehmender Bodentiefe zu. Die Profile der Substratgruppe Grauwacke weisen mit 36 Vol.-% in 0-5 cm und 54 Vol.-% in 60-90 cm Bodentiefe die insgesamt höchsten Grobbodenanteile auf. Der Granit hat in der Tiefenstufe 60-90 cm mit 71 % noch höhere Grobbodenanteile. Geringere Grobbodenanteile wurden in den Substratgruppen Kalkstein, Tonschiefer, Kreidesandstein und Buntsandstein mit Grobbodenanteilen zwischen 12 und 20 Vol.-% in 0-5 cm und zwischen 40 und 50 Vol.-% in 60-90 cm Bodentiefe festgestellt. Geringe Grobbodenanteile von meist unter 10 Vol.-% weisen die Sande, Tone, Lösslehme und organisch geprägten Standorte auf.

1.8 Austauschkapazität

Die Fähigkeit von Mineralböden und Humus zum Austausch von Kationen bestimmt wesentlich deren Puffereigenschaften und die mittelfristige Speicherkapazität für die Nährstoffkationen Calcium, Magnesium und Kalium und die sauren

Kationen Aluminium, Eisen, Mangan sowie Protonen. Insgesamt liegt die Austauschkapazität in den Waldböden Niedersachsens im Mittel aller BZE II-Punkte mit rund 560 kmol_c/ha noch im mittel-hohen Bewertungsbereich nach AK STANDORTSKARTIERUNG (2003). Damit haben die Waldböden in Niedersachsen, bedingt durch die eher ärmeren Böden im Tiefland, im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt, die geringsten Austauschkapazitäten.

Mit durchschnittlich 23 kmol_c/ha trägt der Auflagehumus, bedingt durch seine in der Regel geringe Mächtigkeit, durchschnittlich nur zu etwa 4 % der gesamten Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe bei. Die höchste Austauschkapazität (bezogen auf jeweils 5 cm Bodenschicht) mit 46 kmol_c/ha findet sich aufgrund hoher Humusgehalte in den oberen 5 cm des Mineralbodens.

Die mittlere Austauschkapazität ist vor dem Hintergrund der weiten Spanne der vorkommenden Substrate nicht sehr aussagekräftig. Die signifikante (leichte) Zunahme um 20 kmol_c/ha (+10 % bezogen auf die BZE I) zwischen der BZE I und BZE II im oberen Mineralboden ist durch die Waldkalkung erklärbar, die zu einer Zunahme der organischen Substanz mit ihrer variablen Ladung im oberen Mineralboden führt. Der Einfluss der Waldkalkung auf die Austauschkapazität reicht bis in 30 cm Bodentiefe. Damit werden die Ergebnisse aus Kalkungsversuchen durch die BZE in Niedersachsen bestätigt.

Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass mit dem Verfahren der BZE trotz standörtlicher Variabilität landesweit bestimmte Bodenzustände abbildbar sind und sich räumliche und zeitliche Veränderungen nachweisen lassen. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung der Stratifizierungsmerkmale Substratgruppe und Kalkung.

1.9 Status und Veränderung der Bodenversauerung

Durch die Bildung von Kohlensäure und organischen Säuren (Huminsäuren) kommt es in Böden Mitteleuropas zur allmählichen Versauerung. Hinzu kommen anthropogen verursachte Säureeinträge, deren Säurewirkung seit Jahrzehnten die ökosysteminterne Versauerung übersteigt. Der Eintrag stärkerer Säuren, insbesondere der Schwefel- und Salpetersäure, bewirkt hauptsächlich eine Versauerung auf unter pH(H₂O) 5. In diesem bodenchemischen Milieu werden die Kationen Calcium, Magnesium und Kalium am Austauscher von Aluminium, Eisen und Mangan sowie Protonen verdrängt und mit Nitrat, Sulfat und organischen Säuren mit dem Sickerwasser ausgewaschen. Je nach Mineralisierungsraten und Einträgen mit dem Niederschlag verlieren Waldökosysteme damit Nährstoffe. Der Eintrag von starken Säuren sowie säurewirksame Stickstoffeinträge haben daher in vielen Waldökosystemen zu gravierenden bodenchemischen Veränderungen geführt (COOLS et al. 2016, MEESENBURG et al. 2016, DE VRIES et al. 2014, ULRICH 1981, ULRICH 1986). Trotz der erheblichen Verringerung der Säureeinträge seit Mitte der 1980er-Jahre liegt die Gesamtsäuredeposition weiterhin über dem natürlichen Puffervermögen der meisten nährstoffarmen niedersächsischen Waldböden (NAGEL et al. 2004).

Die Anlagerung von Sulfat an Tonmineralen und Oxiden sowie die Bildung von Aluminium-Hydroxo-Sulfaten sind weitere Pufferreaktionen im Boden, die Sulfat aus der Bodenlösung binden und somit die Sulfatfracht im Sickerwasser unter Protonenverbrauch mindern. Diese Reaktion findet überwiegend im Austausch-Pufferbereich statt, in dem sich die meisten Bodenschichten in Niedersachsen befinden (MEIWES et al. 1980, KHANNA et al. 1987, ALEWELL 1995, PRIETZEL u. KÖLLING 1999). Diese Reaktionen führen zu teilweise erheblichen Schwefelakkumulationen in Böden, wenn die Schwefeldeposition, und damit die Sulfatfracht im Sickerwasser, langanhaltend hoch ist. Bei verminderter Sulfatfracht und in der Folge ansteigenden pH-Werten ist diese Reaktion teilweise reversibel. Sulfat und Protonen gelangen in das Bodenwasser, Sulfat wird mit dem Sickerwasser verlagert, Protonen gelangen über Pufferreaktionen an den Austauscher. Dies erklärt, warum die Sulfatfrachten im Sickerwasser trotz zurückgehender Schwefeleinträge weiterhin auf hohem Niveau bleiben. Entsprechend werden Kationen wie Calcium, Magnesium und Kalium ausgewaschen. Vor allem Sulfat kann dabei vor Nitrat den Nährstoffaustrag steuern und ist daher als Altlast des „sauren Regens“ anzusehen (LÜKEWILLE 1995, NAGEL et al. 2014).

Generell ist der Säure-Basen-Status von übergeordneter Bedeutung für sämtliche Bodenfunktionen. Zur Beschreibung des Status und der Veränderung des Säure-Basen-Zustandes der niedersächsischen Waldböden werden nachfolgende Kenngrößen herangezogen.

1.9.1 Kationen-Anteile an der Austauschkapazität

Die Besetzung der Austauscherplätze durch unterschiedliche Kationen steuert den Versauerungszustand von Waldböden und beeinflusst die Ernährungsbedingungen für die Waldbäume am Standort ganz wesentlich. Häufigstes basisch wirkendes Kation im Mittel Niedersachsens ist Calcium mit 16-33 % an der Austauschkapazität. Deutlich niedriger liegen die Anteile von Magnesium in Höhe von 4-9 % sowie Kalium und Natrium in Höhe von bis zu 3 %. Aluminium ist in niedersächsischen Waldböden in jeder Bodentiefe das bestimmende Kation mit Anteilen in Höhe von 32-68 %. Protonen belegen Anteile zwischen 2 und 19 %. Die Kationenbelegung niedersächsischer Waldböden wird demnach von sauer wirkenden Kationen, vor allem wurzeltoxischem Aluminium dominiert.

1.9.2 Basensättigung

Die Basensättigung gibt den prozentualen Anteil der basischen Kationen (Mb) bezogen auf die effektive Kationenaustauschkapazität an. Sie ist damit eine der wichtigsten Kenngrößen für die Versauerung von Waldböden. Ihr Rückgang kann Folgen der Bodenversauerung anzeigen.

In Niedersachsen wird das Gesamtkollektiv der BZE nach gekalkt, ungekalkt und entfällt unterschieden. Die zu kalkenden Standorte (kalkungsempfohlene Substrate) werden auch als Kalkungskulisse bezeichnet. Hierzu zählen vor allem die Substratgruppen der Sande, Lösslehm, Buntsandstein, Grauwacke, Tonschiefer und Quarzit, also Böden aus überwiegend saurem Ausgangsgestein, die vor allem im Hauptwurzelraum stark versauert und gegenüber Versauerung empfindlich sind. Die als entfällt bezeichneten Substratgruppen umfassen die nicht als kalkungsbedürftig bewerteten Standorte wie z. B. Kalkstein und Mergel, also reiche Standorte mit meist hoher Austauschkapazität und Basensättigung.

Die Gruppe der kalkungsempfohlenen, aber bislang noch ungekalkten Standorte kann am ehesten zur Beantwortung der Frage herangezogen werden, ob die Säureinträge auch heute noch das Puffervermögen von Waldstandorten übersteigen. Tatsächlich sind in dieser Gruppe die Waldböden zwischen BZE I und BZE II (1991 und 2007) weiter versauert. Über alle Tiefenstufen hat die Basensättigung zwischen BZE I und BZE II deutlich abgenommen. Die weiteren Basenabnahmen sind allerdings aufgrund Variabilität und Stichprobengröße nur für den unverlehmten Sand (Tiefe: 30-90 cm) signifikant. Im ungekalkten Kollektiv erreicht die Basensättigung über alle Böden für die Tiefenstufen bis 60 cm mit Werten von unter 20 % einen kritischen Bereich.

Für die ungekalkten unverlehmten Sande wurde im Mineralboden zwischen 10 und 90 cm Tiefe durchgängig eine Basensättigung von unter 10 % festgestellt. Die Werte haben sich vor allem im Unterboden seit der BZE I deutlich verschlechtert. Ähnliche Befunde ergaben sich für den Buntsandstein in Hessen (PAAR et al. 2016). In Niedersachsen sind alle Buntsandstein-Standorte der BZE gekalkt, zumeist auch schon vor und während der BZE I. Hierin kann die Ursache dafür liegen, dass sich die mittlere Basensättigung der Buntsandstein-Standorte in Niedersachsen im Gegensatz zu Hessen zwischen der BZE I und II nicht signifikant geändert hat.

Bodenchemisch abgeleitet und in Versuchen nachgewiesen tritt unter einer Basensättigung von 15 bis 20 % Aluminium als dominierendes Kation in der Bodenlösung auf und wirkt auf Waldökosysteme destabilisierend (REUSS 1983, REUSS u. JOHNSON 1985, 1986). Zugleich weisen diese Böden nur noch geringe austauschbare Anteile an den wichtigen Nährstoffen Calcium und Magnesium auf. Ein Ziel der Bodenschutzkalkung liegt darin, für definierte Standorte ein Absinken unter eine Basensättigung von 20 % zu verhindern bzw. den Versauerungsprozess zu verlangsamen und die durch Säure ausgewaschenen Nährstoffe Calcium und Magnesium zu ergänzen (MEIWES 1995, BEESE u. MEIWES 1995).

Nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand und den Grundsätzen einer verantwortungsbewussten, ökologischen und nachhaltigen Waldbewirtschaftung ist eine Kompensationskalkung auf Standorten erforderlich, deren Böden im Hauptwurzelraum stark versauert sind, d. h. eine Basensättigung von unter 15 % im unteren Hauptwurzelraum (30-60 cm) aufweisen, und bei denen kein Ausschlussgrund für eine Kalkung vorliegt (NW-FVA 2010).

1.9.3 Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat

Zur umfassenden ökologischen Bewertung chemischer Kenndaten ist die Ermittlung raumbezogener Vorratswerte erforderlich (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Calcium hat im Allgemeinen die höchsten Anteile unter den basischen Kationen am Austauscher und demzufolge einen hohen Indikatorwert für die Nährstoffausstattung der Waldböden. Zu weiteren, sehr wichtigen basischen Kationen gehören Magnesium und Kalium.

Relativ geringe Calcium- und Magnesiumvorräte bestehen bei Standorten mit Granit, unverlehmtem und schwach verlehmtem Sand sowie organisch geprägten Standorten, vereinzelt auch beim verarmten Lösslehm. Schwach (gering) mit Kalium versorgt sind über die bereits bei Calcium und Magnesium genannten Standorte hinaus der Kalkstein, Kreidesandstein, Tonschiefer und Grauwacke. Hohe Vorräte an basischen Kationen finden sich dagegen beim Ton(stein), Kalkstein (nicht Kalium), Lehm, Mergel und teilweise beim verlehmtten Sand.

Zwischen der BZE I und der BZE II haben die Calciumvorräte auf den für eine Bodenschutzkalkung vorgesehenen, aber noch ungekalkten BZE-Punkten tendenziell abgenommen, bei den gekalkten BZE-Punkten leicht zugenommen. Die Tendenz ist für Magnesium ähnlich, signifikante Unterschiede gab es jedoch nur vereinzelt in den unterschiedlichen Tiefenstufen. In den Substratgruppen unverlehmter Sand, Tonschiefer und Lösslehm konnten deutliche Zunahmen des Magnesiumvorrates auf die Waldkalkung zurückgeführt werden. Die Kaliumvorräte haben insgesamt um 20 % abgenommen, dies vor allem im Unterboden. Ein Kalkungseffekt zeigte sich dabei nicht.

1.9.4 Pufferbereiche

Hinsichtlich der pH-Wert-Analysen ist einschränkend festzustellen, dass aus dem Aciditätsstatus nur sehr begrenzt auf den chemischen Bodenzustand und sein Ursachen-Wirkungs-Geflecht geschlossen werden darf (ULRICH 1966).

Der pH-Wert ist eine Kenngröße für die Konzentration der H_3O^+ -Ionen in der Bodenlösung und somit für den Versauerungszustand der Böden. Die in wässrigen Bodensuspensionen gemessenen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte erlauben eine Zuordnung zu den verschiedenen Pufferbereichen (ULRICH 1981, BLOCK et al. 2000). Je nach Kationenbelegung des Austauschers sowie der Säuredeposition laufen unterschiedliche Säure-Basen-Reaktionen und damit Pufferreaktionen ab (NÄTSCHER u. SCHWERTMANN 1991, SÜSSER u. SCHWERTMANN 1991, KHANNA et al. 1987, PRENZEL 1982, ULRICH 1981).

Die Anteile der Kationen an den Humus- und Tonmineraloberflächen bestimmen damit wesentlich das Pufferungsverhalten von Waldböden gegenüber Säureein-

trägen und geben eine Zuordnung zu Resilienzeigenschaften und zur Ernährungssituation von Waldböden. Eine wesentliche Grenze stellt der Übergang vom Austauscher-Pufferbereich zum Aluminium-Pufferbereich dar. Im Aluminium-Pufferbereich verändern sich die Nährstoffbedingungen, ihre Wechselwirkungen und damit auch die Bodeneigenschaften und -funktionen.

Bei durchschnittlichen Werten zwischen 4,2 und 5,1 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ befinden sich zum Zeitpunkt der BZE II die meisten Böden in Niedersachsen überwiegend im Austauscher- und teilweise sogar im günstigeren Silikat-Pufferbereich. Die Mittelwerte je Tiefenstufe und auch die Streuungswerte liegen im Mittel Niedersachsens oberhalb der Grenze zum Aluminium-Pufferbereich. Im Unterschied zu Hessens Waldböden (PAAR et al. 2016) befinden sich in Niedersachsen einige Standorte im Aluminium-Pufferbereich. Es sind dies die schwach- und unverlehmten Sande, organisch geprägte Standorte und auch der Buntsandstein im Bergland mit $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten unter 4,2 im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe. Vereinzelt trifft dies auch auf Oberböden von verlehmtten Sanden, Lösslehmen, Grauwacken und Tonen zu. In diesem Pufferbereich ist mit einer Auflösung sekundärer Tonminerale und Tonzerstörung, Freisetzung von Aluminium-Ionen und Protonen in die Bodenlösung sowie einer zunehmenden Einschränkung der Wachstumsleistung durch den bodenchemischen Zustand zu rechnen (ULRICH 1981). Im Vergleich zum Bundesmittel der BZE II sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in Niedersachsen wesentlich geringer (WELLBROCK et al. 2016), was mit den hohen Anteilen der sauren Sandstandorte erklärt werden kann. Die teilweise bis weit in den Eisen-Pufferbereich hineinreichenden $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte belegen eine historisch hohe Säurebelastung und erschöpfte Pufferreserven des Mineralbodens, vor allem der betreffenden Oberböden.

Grundsätzlich steigen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte mit zunehmender Bodentiefe des Mineralbodens in den unteren Tiefenstufen 10-30, 30-60 und 60-90 cm kontinuierlich an.

Im Auflagehumus ist eine Zunahme der pH -Werte (H_2O und KCl) und somit eine geringere Säurebelastung festzustellen: Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus sind von durchschnittlich 4,2 bei der BZE I auf 4,4 bei der BZE II gestiegen. Diese Entwicklung lässt sich nur auf den gekalkten BZE-Punkten statistisch absichern, welches die kompensatorische Wirkung der Kalkung belegt. Diese Ergebnisse lassen auch darauf schließen, dass sich zwischen der BZE I und BZE II in Niedersachsen die Gesamtsäurebelastung nicht gravierend geändert hat, denn bei deutlich geringeren Säureeinträgen hätte mit einem Anstieg der mittleren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in der Bodenlösung und der $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte auch auf ungekalkten Standorten gerechnet werden können. Der überwiegende Säureeintrag in Niedersachsen resultiert aus anorganischen Stickstoffeinträgen, die sich zwischen der BZE I und II in Niedersachsen erhöht haben, was diese Interpretation stützt (s. Kap. 3.4). Neben dem Säureeintrag über Luftschadstoffe sind jedoch auch weitere Säurequellen zu beachten, die die pH -Werte mit beeinflussen. Entkopplungen des Stickstoffkreislaufes, rückläufige Pufferreaktionen bei Aluminiumsulfaten, Basenverluste über Nitrat- und

Sulfatausträge sowie Entzüge mit der Biomasse führen zu weiterer Versauerung (ULRICH 1983, ULRICH et al. 1994, KHANNA et al. 1987, PRIETZEL u. KÖLLING 1999).

Im Hinblick auf die Zuordnung der Pufferbereiche nach dem $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert zeichnet sich für Niedersachsen zwischen der BZE I und BZE II ebenfalls eine Verbesserung des bodenchemischen Zustandes ab: Die Anteile der ökologisch ungünstig zu beurteilenden Aluminium-Eisen- und Aluminium-Pufferbereiche haben im oberen Mineralboden zugunsten des Austauscher- und Silikat-Pufferbereiches abgenommen. Die Anteile im Carbonat-Pufferbereich haben sich dagegen kaum verändert.

Die prozentuale Verteilung der Pufferbereiche in den Tiefenstufen wird durch die Waldkalkung wesentlich beeinflusst. Im gekalkten Kollektiv zeigt sich bei der BZE II eine deutlich günstigere Verteilung der Pufferbereiche. Die Anteile des Austauscher-Pufferbereiches über $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 4,2 und besser haben im gekalkten Kollektiv in allen Tiefenstufen gegenüber dem Aluminium-Pufferbereich und schlechter deutlich höhere Anteile. Auffällig sind auch die im gekalkten Kollektiv deutlich geringeren Anteile im Aluminium- und Aluminium-Eisen-Pufferbereich bis 10 cm Bodentiefe bei der BZE II im Vergleich zur BZE I. Im ungekalkten Kollektiv dagegen kam es kaum zu Veränderungen.

1.9.5 Bewertung

Die seit Mitte der 1980er-Jahre ergriffenen Maßnahmen zur Luftreinhaltung in Deutschland verringerten vor allem die Emissionen von Schwefeldioxid erheblich. Die Messungen des Intensiven Monitorings zum Stoffeintrag in Niedersachsen belegen einen deutlichen Rückgang der Gesamtsäureeinträge in niedersächsische Wälder. Im Solling verringerte sich der Schwefeleintrag in Buchen- und Fichtenwäldern im Vergleich zu den 1970er-Jahren um 90 %. Der Gesamtsäureeintrag bei Buche sank um 70 % und bei Fichte um 75 %, jeweils bezogen auf die höchsten Einträge seit 1975. Parallel dazu ging aber auch die Deposition der basisch wirkenden Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium in den Luftstäuben zurück. Bei der Fichte im Solling z. B. reduzierte sich der Calciumeintrag ebenfalls um rund 90 %. Auch die Stickstoffeinträge haben sich verringert, bei Fichte im Harz beispielsweise um 38-60 %, bei Buche im Göttinger Wald um ca. 40 % und unter Eiche in Ehrhorn (Lüneburger Heide) um ca. 35 %, jeweils bezogen auf das Mittel der 1980er-Jahre. Dennoch verbleiben die Stickstoffeinträge zwischen der BZE I und II auf einem hohen Niveau und sind mit 13-28 kg/ha und Jahr höher als der mittlere Bedarf der Waldbestände. Dies kann zu Bodenversauerung, Nährelementverlusten mit dem Sickerwasser, Änderungen des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Waldbäumen, Waldbodenvegetation und Bodenorganismen führen (vgl. Kap. 3.4 und MEESENBURG et al. 2016). 80 % des Gesamtsäureeintrags wird heute durch anorganische Stickstoffeinträge verursacht. Insgesamt werden die Critical Loads für

Säure und Stickstoffeinträge nach wie vor an vielen Standorten in Nordwestdeutschland überschritten (MEESENBURG et al. 2015, NAGEL et al. 2004).

Die Versauerung betrifft vor allem den Auflagehumus und Mineralboden der Tiefenstufen von 30 cm bis 90 cm. Versauerungsprozesse im obersten Mineralboden werden vermutlich durch Humusumsetzungen überlagert. Die Versauerung zeigt sich als Abnahme der Basensättigung bis 90 cm Mineralbodentiefe und Abnahme von Nährstoffkationen aus dem ungekalkten Mineralboden, insbesondere von Magnesium und Calcium. Die Abnahmen erreichen bei Magnesium ein Viertel, bei Calcium ungefähr ein Drittel der Vorräte bezogen auf 90 cm Bodentiefe.

Die weitere Nährstoffverarmung von ungekalkten Waldflächen in Niedersachsen ist zum einen eine Folge der überhöhten Säure- und Stickstoffeinträge, zum anderen aber auch mit den Umsetzungsprozessen von teilweise erheblichen Schwefelakkumulationen im Boden („Sulfatdynamik“) verbunden. Die Schwefelanreicherung im Boden kann als ein Memory-Effekt für jahrzehntelange hohe Schwefel einträge angesehen werden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass auf niedersächsischen Intensivmessflächen in den 1980er-Jahren zwischen 9 % und 20 % der eingetragenen Säuren durch ebenfalls eingetragene Basen neutralisiert wurden, im Zeitraum 2006-2016 dagegen nur noch 5-11 % (s. Kap. 3.4).

Die Ergebnisse belegen insgesamt, dass das Thema Bodenversauerung auch heute noch aktuell ist.

1.10 Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf den Waldbodenzustand

Bodenschutzkalkungen dienen der Kompensation von Säureeinträgen und der Verbesserung der Puffereigenschaften von Waldböden. Die Chancen und Risiken von Bodenschutzkalkungen, aber auch das Verfahren und die Beschränkungen sind in einem Merkblatt für Niedersachsen und Sachsen-Anhalt beschrieben (NW-FVA 2010).

1.10.1 Umfang durchgeführter Bodenschutzkalkungen

Umfangreiche und intensive Nachforschungen haben ergeben, dass bis zum Zeitpunkt der BZE II 55 % der BZE II-Punkte in Niedersachsen mindestens einmal gekalkt wurden. Nur bei zwei Flächen blieb der Status unklar. Bei 16 % der BZE-Punkte ist grundsätzlich keine Waldkalkung vorgesehen, da diese Standorte genügend Pufferkapazität gegenüber Säureeinträgen aufweisen oder sonstige Ausschlussgründe (z. B. Moorböden, oligotrophe Sandstandorte, Erlenbruch) vorliegen. Die restlichen Standorte sind bisher noch nicht gekalkt worden. Die BZE-Punkte im Bergland der Substratgruppen aus basenarmem Festgestein wie Buntsandstein, Ton-schiefer, Grauwacke, Granit und Kreidesandstein sind vollständig gekalkt, zumeist auch schon vor der BZE I und vereinzelt auch einmal wiederholt. Mehrfachkalkungen (3 Kalkungen) gab es insgesamt nur zweimal. Gut die Hälfte der gekalkten BZE-

Punkte in Niedersachsen sind Sande, wobei der unverlehmte Sand den höchsten Anteil hat. Von den BZE-Punkten der Substratgruppen schwach- und (un)verlehmter Sand sind 43 % ungekalkt.

1.10.2 Vergleichende Bewertung gekalkter und ungekalkter BZE-Punkte

In Niedersachsen wurde 1975 mit der Waldkalkung begonnen. Bereits 1991 zum Zeitpunkt der BZE I waren rund 200.000 Hektar Waldfläche im niedersächsischen Staatswald gekalkt (MINDRUP 2001), mittlerweile sind es 595.000 Hektar (JACOB u. ANDREAE 2013). Da zum Zeitpunkt der BZE I über 50 % der BZE-Punkte in Niedersachsen gekalkt waren, sind die Kalkungseffekte in der BZE II im Vergleich zur BZE I abgeschwächt. Langfristige Effekte werden aber im Vergleich mit dem ungekalkten Kollektiv deutlich. Da aber viele Substratgruppen im BZE-Kollektiv mittlerweile zu 100 % gekalkt sind, fehlt ein entsprechendes Vergleichskollektiv. Dies ist beispielsweise bei den basenarmen Silikatgesteinen im Bergland der Fall.

Die Austauschkapazität bei den gekalkten BZE II-Punkten hat sich in den Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-30 cm seit der BZE I signifikant erhöht. Auf Profilebene erhöhte sich für das gekalkte Kollektiv die Austauschkapazität um 40 kmol_c/ha. Dies entspricht einer Zunahme von 8 % gegenüber der BZE I, was auf die Zunahme an organischer Substanz im Oberboden und der variablen Ladung infolge höherer pH-Werte zurückzuführen ist. Beides verbessert die Bodeneigenschaften. Zum einen erhöht sich die Fähigkeit, Nährstoffkationen zu speichern, zum anderen wird das Wasserhaltevermögen gesteigert. Weiterhin erhöhten sich die pH(H₂O)-Werte in allen Tiefenstufen des gekalkten Kollektivs und die pH(KCl)-Werte im Auflagehumus und der Tiefenstufe 0-5 cm. Hinsichtlich der Belegung der Austauscher mit Kationen zeigt sich, dass sich in dem kurzen Zeitraum zwischen BZE I und BZE II (15 Jahre) im gekalkten Kollektiv die Basensättigung bis 30 cm Bodentiefe deutlich verbesserte (+12 %-Punkte in 0-5 cm und +5 %-Punkte jeweils in 5-10 und 10-30 cm), während im ungekalkten Kollektiv die Basensättigung tendenziell abnahm, signifikant in den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm. Positive Effekte der Waldkalkung zeigten sich insbesondere für den unverlehmten und schwach verlehmten Sand, für den Lösslehm und Tonschiefer. Auch für die Bundesebene (WELLBROCK et al. 2016), Hessen (PAAR et al. 2016), Rheinland-Pfalz (BLOCK u. GAUER 2012) sowie Baden Württemberg (HARTMANN et al. 2016) ist dieser signifikante Anstieg der Basensättigung in den obersten Tiefenstufen infolge der Kalkung belegt.

Mit der Kompensationskalkung werden den Böden u. a. die Kationen Calcium und Magnesium zugeführt. Dadurch verändern sich die Calciumvorräte im Auflagehumus und im Mineralboden und gleichen Verluste früherer Versauerungsphasen aus. Im gekalkten Kollektiv ergibt sich in Niedersachsen im Auflagehumus bezogen auf den Vorrat der BZE I eine signifikante Abnahme um ungefähr 50 % und im oberen Mineralboden bis in 30 cm Bodentiefe eine signifikante Zunahme der

Calciumvorräte (+40 %). Bezogen auf das Gesamtprofil veränderten sich die Calciumvorräte nach den Bodenschutzkalkungen zwischen der BZE I und BZE II aber nur geringfügig. Im ungekalkten Kollektiv dagegen kommt es zu einer geringen Zunahme im Auflagehumus (+50 kg, +19 %), aber deutlichen Abnahmen bis 30 cm Bodentiefe (-300 kg, -42 %). Im Gegensatz zum gekalkten Kollektiv nehmen die Calciumvorräte im ungekalkten Kollektiv bis in 90 cm Bodentiefe weiter ab, in der Tiefenstufe 30-60 cm auch signifikant. Im ungekalkten Kollektiv ergeben sich insgesamt rund 30 % geringere Calciumvorräte. Der Unterschied ist nicht signifikant und kann nur als Tendenz angesehen werden.

Die Ergebnisse für Magnesium sind weitgehend ähnlich zu denen des Calciums. Im gekalkten Kollektiv gehen die Magnesiumvorräte im Auflagehumus signifikant zurück, demgegenüber stehen signifikante Zunahmen im Mineralboden bis in 90 cm Bodentiefe. Die Abnahmen im Auflagehumus gleichen sich mit den Zunahmen im Mineralboden aus. Im ungekalkten Kollektiv dagegen gibt es Abnahmen um 25 %, die aber nicht signifikant sind. Auch die Auswertungen für Experimentalflächen der Forstlichen Umweltkontrolle an der NW-FVA von GUCKLAND et al. (2012) belegen für gekalkte Flächen im Vergleich zu ungekalkten Kontrollflächen eine Erhöhung der Calcium- und Magnesiumvorräte sowie der Basensättigung bis in eine Mineralbodentiefe von 60 cm.

Bei Kalium zeigen sich keine Kalkungseffekte, in beiden Kollektiven gekalkt und ungekalkt nehmen die Kaliumvorräte zwischen 13 und 15 % ab. Mit der Bodenschutzkalkung wird den Böden kein zusätzliches Kalium zugeführt. Kalium zählt zu den Hauptnährelementen, weicht aber in seinen Eigenschaften sowohl im Ökosystem als auch in seiner physiologischen Bedeutung für Bäume deutlich von anderen Elementen ab (TRIPLER et al. 2006). Weder in Hessen (PAAR et al. 2016), Rheinland-Pfalz (BLOCK u. GAUER 2012), Baden-Württemberg (HARTMANN et al. 2016) noch auf Bundesebene (WELLBROCK et al. 2016) zeigen sich im Rahmen der BZE-Auswertungen signifikante Veränderungen der austauschbaren Kaliumvorräte im Mineralboden im Zusammenhang mit der Waldkalkung.

1.10.3 Bewertung

Auf den gekalkten Standorten zeigt sich eine Verbesserung der durchschnittlichen Basensättigung bis 30 cm Mineralbodentiefe. Bereits eingetretene Nährstoffverluste infolge hoher Säureeinträge, Sulfatausträge, Biomasseentzug und verringerter basischer Einträge aus der Luft können ausgeglichen werden. Eine Bodenschutzkalkung hat somit einen langfristig positiven Einfluss auf den chemischen Bodenzustand und auf die Stabilisierung des Nährstoffhaushaltes. Die Ergebnisse der BZE II zeigen darüber hinaus die Risiken für schwach nährstoffversorgte Standorte auf, die bislang nicht gekalkt wurden. Für das Kollektiv der ungekalkten, aber kalkungsempfohlenen Standorte und insbesondere für die Basensättigung in der Sub-

stratgruppe unverlehmter Sand zeigt sich sehr deutlich, dass sich der schon jetzt kritische bodenchemische Zustand im Hauptwurzelraum bis 90 cm Bodentiefe ohne eine Bodenschutzkalkung weiter verschlechtert. Von besonderer Dringlichkeit erscheint deshalb die Kalkung dieser Standorte. Die Ergebnisse der BZE II belegen, dass die Versauerung und Nährstoffverarmung dieser Standorte seit der BZE I vor allem im Unterboden weiter vorangeschritten ist.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich das bisherige Konzept der Bodenschutzkalkung bewährt hat. Es sollte standorts- und bedarfsangepasst mit fachlicher Sorgfalt weitergeführt werden.

Unter Forschungsaspekten sind kalkungswürdige, aber bis heute nicht gekalkte Referenzflächen (außerhalb der Rasterflächen der Übersichtserhebung) für die Zukunft zu sichern.

1.11 Hauptergebnisse für die Substratgruppen

Waldregionen werden standörtlich weitgehend durch ihre Ausgangsgesteine und die dazugehörigen Substratgruppen geprägt. Zu nennen sind etwa das überwiegend durch Sande geprägte niedersächsische Tiefland oder das aus den Gesteinen des Erdaltertums aufgebaute Bergland. Im Interesse einer Anwendbarkeit der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung für konkrete forstliche Fragestellungen auf über-regionaler, regionaler oder lokaler Ebene sind Befunde für konkrete Substratgruppen von Bedeutung.

1.11.1 *Unverlehmter Sand (37 % der Waldfläche in Niedersachsen und Bremen)*

Die Standorte der unverlehmten Sande gehören zu den ärmeren Standorten in Niedersachsen und kommen mit einer Ausnahme im niedersächsischen Tiefland vor. Zusätzlich gehören alle vier BZE II-Punkte in Bremen dieser Substratgruppe an, weshalb die Ergebnisse für den unverlehmten Sand am besten die Verhältnisse in Bremen widerspiegeln. Diese Standorte weisen die höchsten Trockenrohdichten, die geringsten Skelettanteile und mit den Lehmen, unverlehmten und verlehmten Sanden die höchsten Feinbodenvorräte auf. Die mittlere nutzbare Feldkapazität liegt mit 100 mm bis 90 cm Bodentiefe im mittleren Bewertungsbereich und hat im Vergleich zu den anderen Substratgruppen in Niedersachsen die geringste Wasserspeicherkapazität.

Mit einer Austauschkapazität von rund 340 kmol_c/ha (summiert bis 90 cm Bodentiefe) liegen die BZE II-Punkte dieser Substratgruppe im mittleren Bewertungsbereich. Dieser Durchschnitt ist höher als die mittleren Vergleichswerte in Hessen (220 kmol_c/ha) und Sachsen-Anhalt (255 kmol_c/ha) und liegt um 40 % unter dem Landesmittel in Niedersachsen.

Die durchschnittliche Basensättigung von knapp 15 % auf Profilebene liegt im geringen Bewertungsbereich, und damit nur halb so hoch wie der Landesdurchschnitt. Der mittlere Calciumvorrat auf Profilebene beträgt 900 kg/ha und ist damit als mittel einzustufen, der Magnesiumvorrat mit knapp 170 kg/ha als gering-mittel und der Kaliumvorrat mit 210 kg/ha als gering. Im Vergleich zum Landesmittel liegen die Nährelementvorräte dieser Substratgruppe bei 23 % (Calcium), 29 % (Magnesium) und 63 % (Kalium).

Die oberen 10 cm des Mineralbodens der unverlehmten Sande liegen überwiegend im Aluminium-Pufferbereich, die tieferen Bodenschichten mit wenigen Ausnahmen im Austauscher-Pufferbereich. Im Vergleich zur BZE I sind die pH(H₂O)-Werte im Auflagehumus unverändert und im Mineralboden leicht angestiegen. Die pH(KCl)-Werte haben ebenfalls in fast allen Tiefenstufen (Ausnahme 0-5 cm) seit der BZE I leicht zugenommen.

Durch die Bodenschutzkalkung haben sich einige bodenchemische Kennwerte verändert. Im gekalkten Kollektiv hat sich die Austauschkapazität um 10 % erhöht, vor allem im Oberboden bis 30 cm. Dies steht im engen Zusammenhang mit der Zunahme von Kohlenstoff in diesen Tiefenstufen und einer Zunahme der variablen Ladung in Verbindung mit höheren pH-Werten. In den gekalkten BZE II-Profilen ist die Basensättigung seit der BZE I im Oberboden signifikant angestiegen und hat sich im Unterboden nicht signifikant verändert, bei den ungekalkten Profilen dagegen verringerte sich die Basensättigung deutlich im Unterboden ab 30 cm Bodentiefe und liegt dort im geringen Bewertungsbereich.

Damit zeigt sich für die Substratgruppe unverlehmter Sand bereits sehr deutlich, dass sich bis 90 cm Bodentiefe im Hauptwurzelraum ohne eine Bodenschutzkalkung der schon kritische bodenchemische Zustand weiter verschlechtert.

Die Calciumvorräte bei den gekalkten BZE-Punkten dieser Substratgruppe erhöhten sich seit der BZE I signifikant um gut 30 % und verringerten sich im ungekalkten Kollektiv um 25 %, allerdings nicht signifikant. Die Tendenz der Calciumvorratsverluste zwischen den BZE-Erhebungen im ungekalkten Kollektiv ist vor dem Hintergrund der ebenfalls sehr geringen Werte der Basensättigung bedenklich. Diese Einschätzung bezieht sich sowohl auf den Status als auch auf die Dynamik, die in einem für Waldökosysteme recht kurzen Zeitraum von 15 Jahren stattgefunden hat.

Beim Magnesiumvorrat zeigt sich ebenfalls deutlich der Einfluss der Waldkalkung: Im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe kommt es an den gekalkten Punkten zwischen der BZE I und der BZE II zu einer signifikanten Zunahme von 38 kg/ha (+120 %). Bei den ungekalkten ergab sich keine signifikante Veränderung, in der Tendenz jedoch ebenfalls eine Zunahme um 9 kg/ha (+33 %). Für die Kaliumvorräte konnte keine Veränderung festgestellt werden, außer einer Zunahme in der Tiefenstufe 0-5 cm, was möglicherweise mit der Zunahme von Kohlenstoff zusammenhängt.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte der unverlehmten Sande auf Profilebene liegen mit rund 180 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und über dem Mittel von Niedersachsen. Hinsichtlich der Speicherraten für Kohlenstoff erwies sich die Waldkalkung in dieser Substratgruppe als bedeutender Faktor: Im gekalkten Kollektiv stiegen die Kohlenstoffvorräte um knapp 20 % an, im ungekalkten Kollektiv gab es nur einen nicht signifikanten Anstieg um knapp 5 %.

Mit rund 7 t/ha auf Profilebene liegen die mittleren Stickstoffvorräte im unverlehmten Sand im mittleren Bewertungsbereich und sind geringer als das Mittel Niedersachsens. In dieser Substratgruppe finden sich die für Niedersachsen am geringsten mit Stickstoff versorgten Standorte. Zur BZE II gab es eine leichte, nicht signifikante Abnahme um 3 %. Kalkungseffekte auf die Veränderungsraten der Stickstoffvorräte ergaben sich nicht.

Aufgrund der Abnahme der Basensättigung auf den ungekalkten unverlehmten Sanden seit der BZE I sind diese Standorte bei der Kalkungsplanung mit Priorität zu berücksichtigen.

1.11.2 Schwach verlehmtte Sande (13 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Die Standorte der schwach verlehmten Sande gehören ebenfalls zu den ärmeren Standorten in Niedersachsen und kommen ausschließlich im niedersächsischen Tiefland vor. Typisch sind Geschiebedecksande und Sandlössen mit schwach verlehmten und schluffigen Sanden, die sich im Vergleich zu den unverlehmten Sanden vor allem durch eine höhere nutzbare Feldkapazität auszeichnen, die im Mittel Niedersachsens auf Profilebene bis 90 cm Bodentiefe 156 mm beträgt. Die Trockenrohdichten, Skelettanteile und Feinbodenvorräte sind mit denen der unverlehmten Sande vergleichbar.

Mit einer Austauschkapazität von rund 420 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe weisen die BZE II-Punkte dieser Substratgruppe eine mittlere Austauschkapazität auf, die 30 % unter dem Mittel Niedersachsens liegt. Die Austauschkapazität ist aber deutlich höher als die der unverlehmten Sande (340 kmol_c/ha).

Mit 27 % mittlerer Basensättigung auf Profilebene liegen die schwach verlehmten Sande noch im gering-mittleren Bewertungsbereich, weisen damit aber eine fast doppelt so hohe Basensättigung auf wie die unverlehmten Sande. Der mittlere Calciumvorrat auf Profilebene ist mit 2100 kg/ha doppelt so hoch wie der der unverlehmten Sande und bereits als mittel-hoch einzustufen. Der Magnesiumvorrat mit 340 kg/ha liegt im mittleren Bewertungsbereich und der Kaliumvorrat mit 330 kg/ha ist als gering zu bewerten. Im Vergleich zum Landesmittel liegen die Nährelementvorräte dieser Substratgruppe bei 53 % (Calcium), 58 % (Magnesium) und 98 % (Kalium). Die höheren Nährstoffvorräte gegenüber den unverlehmten Sanden bilden den höheren Verlehmungsgrad sehr gut ab.

Die oberen 10 cm des Mineralbodens der schwach verlehmten Sande liegen überwiegend im Aluminium-Pufferbereich, die tieferen Bodenschichten mit

wenigen Ausnahmen im Austausch-Pufferbereich. Die Verteilungen der pH-Werte unterscheiden sich nur geringfügig vom unverlehmten Sand. Im Vergleich zur BZE I sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus unverändert und im Mineralboden leicht, aber nicht signifikant angestiegen. Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte haben im Auflagehumus und im Oberboden bis 30 cm seit der BZE I leicht signifikant zugenommen.

In den gekalkten BZE II-Profilen ist die Basensättigung seit der BZE I signifikant um 11 %-Punkte angestiegen, bei den ungekalkten Profilen dagegen verringerte sich die Basensättigung leicht.

Die Calciumvorräte auf den gekalkten BZE-Punkten dieser Substratgruppe erhöhten sich seit der BZE I signifikant um 66 % im Mineralboden und verringerten sich um rund die Hälfte im Auflagehumus. Im ungekalkten Kollektiv kam es zu hohen Verlusten, die sich aber aufgrund zu weniger BZE-Punkte in diesem Kollektiv nicht absichern ließen. Beim Magnesiumvorrat zeigt sich ebenfalls deutlich der Einfluss der Waldkalkung: Im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe kommt es auf den gekalkten Punkten zwischen der BZE I und der BZE II zu einer signifikanten Zunahme von 55 kg/ha (+125 %). Bei den ungekalkten ergab sich keine signifikante Veränderung, in der Tendenz jedoch ebenfalls eine Zunahme um 3,5 kg/ha (+16 %). Bei den Kaliumvorräten ergaben sich keine Unterschiede zur BZE I, auch nicht unter Berücksichtigung der Waldkalkung.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene der schwach verlehnten Sande liegen mit rund 160 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und damit über dem Mittel von Niedersachsen. Die Vorräte sind um 20 t/ha geringer als das Mittel der unverlehnten Sande.

Mit rund 7,5 t/ha mittlerem Stickstoffvorrat auf Profilebene sind die schwach verlehnten Sande etwas besser mit Stickstoff bevorratet als die unverlehnten Sande, liegen aber ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich und damit unter dem Mittelwert Niedersachsens. In dieser Substratgruppe gab es mit Ausnahme von signifikanten Abnahmen im Unterboden um 30 % keine Veränderungen zur BZE I. Kalkungseffekte auf die Veränderungsraten der Stickstoffvorräte ergaben sich nicht.

Aufgrund der relativ geringen Basensättigung der ungekalkten schwach verlehnten Sande sind diese Standorte bei der Kalkungsplanung mit zu berücksichtigen.

1.11.3 Verlehmte Sande (2 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Die verlehnten Sande zeichnen sich im Vergleich zu den unverlehnten und schwach verlehnten Sanden durch eine höhere Austauschkapazität (rund 700 kmol_c/ha), höhere Basensättigung (35 %) und um 30 bis 50 % höhere Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte aus. Die Calcium- und Magnesiumvorräte liegen im mittel-hohen Bewertungsbereich, die Kaliumvorräte im mittleren Bewertungsbereich. Die Mediane der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte aller Tiefenstufen befinden sich im Austausch-Pufferbereich. Die Trockenrohdichten dieser Substratgruppe sind im

Oberboden etwas geringer, die Skelettgehalte etwas höher im Vergleich zu den unverlehmten- und schwach verlehmten Sanden, die Feinbodenvorräte daher etwas geringer. Die nFK ist mit rund 150 mm bis 90 cm Bodentiefe mit den schwach verlehmten Sanden vergleichbar. Die Kohlenstoffvorräte sind mit rund 130 t/ha bis 90 cm Bodentiefe deutlich geringer als bei den anderen Sanden, die Stickstoffvorräte sind mit 7,4 t/ha ähnlich hoch. Signifikante Veränderungen zur BZE I traten nicht auf.

Die unterschiedlichen Verlehmungsgrade der verlehmten Sande und die daraus folgenden Nährstoffpotenziale sind bei der Kalkungsplanung einzubeziehen.

1.11.4 Lösslehm (10 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Der Lösslehm prägt den mitteleuropäischen Lössgürtel mit der Hildesheimer Börde und der Berglandschwelle und wird dort überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Das lockere, durch Wind abgelagerte Sediment stellt mit den lehmigen Schluffen bis schwach tonigen Lehmen aber auch hervorragende Waldstandorte dar, die sowohl im Tief- als auch im Bergland Niedersachsens vorkommen. Die Trockenrohdichten sind mit den verlehmten Sanden vergleichbar, die Skelettgehalte sind sehr gering. Entsprechend sind die Feinbodenvorräte relativ hoch und mit den Sanden vergleichbar. Aufgrund des hohen Schluffanteils im Boden ist die nFK mit knapp 200 mm bis 90 cm Bodentiefe sehr hoch. Daher zählen diese Standorte hinsichtlich des Wasserhaushaltes zu den besten Waldstandorten.

Die Substratgruppe Lösslehm umspannt einen weiten Rahmen bodenchemischer Eigenschaften. Teilweise kommen tief versauerte und an Nährstoffen verarmte (Solling) oder noch kalkhaltige Löss-Standorte (z. B. bei Salzgitter) vor. Mit einer Austauschkapazität von rund 770 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe sind die BZE II-Punkte dieser Substratgruppe mit einer mittleren bis hohen Austauschkapazität ausgestattet, die 25 % über dem Mittel Niedersachsens liegt.

Mit 33 % mittlerer Basensättigung auf Profilebene befinden sich die Lösslehme im mittleren Bewertungsbereich und sind mit den verlehmten Sanden vergleichbar. Der mittlere Calciumvorrat auf Profilebene ist mit 4.600 kg/ha aber wesentlich höher als bei den verlehmten Sanden und wird bereits im hohen Bewertungsbereich eingruppiert. Der Magnesiumvorrat mit 740 kg/ha liegt im mittel-hohen und der Kaliumvorrat mit 580 kg/ha im gering bis mittleren Bewertungsbereich. Im Vergleich zum Landesmittel befinden sich die mittleren Närelementvorräte der Substratgruppe Lösslehm bei 114 % (Calcium), 128 % (Magnesium) und 174 % (Kalium).

In der Substratgruppe Lösslehm verteilen sich die pH(H₂O)-Werte im Austauscher-Pufferbereich und sind gegenüber der BZE I in der Tendenz angestiegen, vor allem im Auflagehumus und oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe. Die pH(KCl)-Werte stiegen signifikant im Auflagehumus, im Mineralboden kam es zu keinen Veränderungen.

Hinsichtlich der Basensättigung konnte nur ein leichter Kalkungseinfluss festgestellt werden. In der Tiefenstufe 0-5 cm erhöhte sich im gekalkten Kollektiv die Basensättigung signifikant um 14 %-Punkte. Bei den Calcium- und Magnesiumvorräten nahmen die Vorräte im Oberboden zu, im Unterboden unter 30 cm ab. Auf Profilebene kam es in der Tendenz zu einer Abnahme der Calcium- und Magnesiumvorräte. Die Kaliumvorräte verringerten sich signifikant um knapp 30 % bezogen auf die BZE I, ein Kalkungseinfluss war nicht festzustellen.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene liegen mit rund 130 t/ha im mittleren Bewertungsbereich, rund 30 % unter dem Mittel von Niedersachsen. Die Kohlenstoffvorräte nahmen im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe um gut 30 % signifikant zu. Auf Profilebene gab es keine signifikanten Veränderungen zur BZE I. Kalkungseffekte auf den Kohlenstoffvorrat zeigten sich in dieser Substratgruppe nicht.

Mit rund 7,6 t/ha mittlerem Stickstoffvorrat auf Profilebene sind die Lösslehme mit den verlehmtten Sanden vergleichbar. Sie liegen im mittleren Bewertungsbereich und unter dem Mittelwert Niedersachsens. In dieser Substratgruppe gab es im Auflagehumus im gekalkten Kollektiv signifikante Abnahmen, im Oberboden bis 30 cm signifikante Zunahmen und im unteren Mineralboden 60-90 cm signifikante Abnahmen. Für die Profilsomme bis 90 cm gab es keine Veränderung von Stickstoff. Eindeutige Kalkungseffekte auf die Veränderungsraten der Stickstoffvorräte ergaben sich nicht.

Die ausgeprägte Heterogenität der Lösslehme und die Nährstoffpotenziale im Unterboden sind bei der Kalkungsplanung für die Lösslehme zu berücksichtigen.

1.11.5 Organisch geprägte Standorte (9 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Organisch geprägte Standorte umfassen ehemalige Hoch- und Niedermoore im Tiefland, Anmoore überwiegend im Bergland und Brüche, die überwiegend mit Erle (reiche Niedermoore) bzw. mit Birke (nährstoffarme ehemalige Hochmoore) bestockt sind. Kennzeichnend ist die mehr oder weniger mächtige, überwiegend organisch zusammengesetzte Schicht aus ehemaligen Torfmoosen, die jetzt mit Wald bestockt ist, zunehmend verdichtet und weiter mineralisiert wird. Die Trockenrohdichten sind im Oberboden sehr gering und steigen im Unterboden auf mittlere Werte, die Grobbodengehalte sind im ganzen Profil gering. Die Brüche haben im Gegensatz zu den ehemaligen Mooren deutlich höhere mineralische Anteile, zeichnen sich aber ebenfalls durch hohe Anteile organischer Komponenten im Boden aus.

Entsprechend hoch sind die Kohlen- und Stickstoffvorräte: Mit 460 t/ha Kohlenstoff und 16 t/ha Stickstoff bis 90 cm Bodentiefe speichern diese Standorte mehr als doppelt so viel dieser Elemente wie ein durchschnittlicher Waldstandort in Niedersachsen. Vorratsdifferenzen bezüglich dieser Elemente konnten mit dem BZE-Verfahren u. a. aufgrund der hohen Mineralisierungsraten nicht berechnet werden.

Die mittlere Austauschkapazität mit Werten um $600 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ bis 90 cm Bodentiefe entspricht ungefähr dem mittleren niedersächsischen Waldstandort, die mittlere Basensättigung sowie die Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte sind deutlich geringer. Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung bei rund 20 % und damit im geringen Bewertungsbereich. Die Calciumvorräte befinden sich im mittel-hohen, die Magnesiumvorräte im mittleren und die Kaliumvorräte im sehr geringen bis geringen Bewertungsbereich. Wesentliche Veränderungen gegenüber der BZE I haben sich nicht vollzogen. Die organisch geprägten Standorte befinden sich bis 30 cm Bodentiefe mit den $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten im Aluminium-Eisen-Pufferbereich und zählen damit zu den am stärksten versauerten Standorten Niedersachsens. Dies ist für ehemalige Hochmoore typisch. In tieferen Bodenschichten wird der Aluminium-, ab 60 cm Bodentiefe der Austauscher-Pufferbereich erreicht. Auffällige Veränderungen zur BZE I sind nicht aufgetreten. Niedermoore und Brücher weisen wesentlich höhere Nährstoffvorräte, pH-Werte und Basensättigungen auf als die ehemaligen Hochmoore.

Die organisch geprägten Standorte sind nicht für eine Kalkung vorgesehen.

1.11.6 Kalkstein (8 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Kalkstein-Standorte kommen ausschließlich im niedersächsischen Bergland vor, in dieser Substratgruppe sind neben dem Muschelkalk auch Jurakalk, Dolomit oder Kreidekalk vertreten.

Die Oberböden sind in der Regel locker mit Trockenrohdichten um $0,8 \text{ g}/\text{cm}^3$. Im Unterboden liegen die Trockenrohdichten mit $1,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ im mittleren Bereich für niedersächsische Waldböden. Die Grobbodengehalte im Oberboden sind gering und steigen mit zunehmender Bodentiefe auf durchschnittlich 40 Vol.-% an. Aufgrund der hohen Grobbodenanteile sind die durchschnittlichen Feinbodenvorräte der Kalksteine vergleichsweise gering. Die nFK mit mittleren 150 mm bis 90 cm Bodentiefe liegt im hohen Bewertungsbereich.

Die mittlere Austauschkapazität von rund $1.200 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ bis 90 cm Bodentiefe ist hoch. Mit den Lehmen und Ton(steinen) weisen die Kalksteine die höchsten Werte für die Waldböden in Niedersachsen auf und liegen im Mittel rund doppelt so hoch wie der Durchschnittswert für das Land. Die durchschnittliche Basensättigung ist mit über 90 % sehr hoch. Die Calciumvorräte liegen mit über $18.000 \text{ kg}/\text{ha}$ im sehr hohen Bewertungsbereich und entsprechen damit mehr als dem Vierfachen des Landesmittels, die Magnesiumvorräte mit $1.100 \text{ kg}/\text{ha}$ im hohen Bewertungsbereich ungefähr dem Doppelten. Die Kaliumvorräte liegen mit $330 \text{ kg}/\text{ha}$ jedoch im geringen Bewertungsbereich, sie entsprechen ungefähr dem Mittelwert für Niedersachsen. Damit zählen die Kalkstein-Standorte mit Ausnahme der Kaliumvorräte zu den am besten mit austauschbaren Nährstoffen versorgten Waldstandorten.

Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte verteilen sich im Oberboden bis 10 cm überwiegend im Silikat-Kohlensäure-, in tieferen Bodentiefen dann im Carbonat-Pufferbereich. In

der Tiefenstufe 0-5 cm stiegen die pH(H₂O)-Werte im Vergleich zur BZE I signifikant an, sonst gab es keine eindeutigen Veränderungen. Die Basensättigung blieb ebenso wie die Calcium- und Magnesiumvorräte unverändert hoch, die Kaliumvorräte verringerten sich deutlich um 70 %-Punkte von 740 auf 220 kg/ha vom mittleren in den geringen Bewertungsbereich. Diese Abnahme ist für den Auflagehumus und jede Tiefenstufe bis einschließlich 60 cm signifikant.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene liegen mit rund 120 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und rund 20 % unter dem Mittel von Niedersachsen. Die Stickstoffvorräte sind mit rund 9 t/ha rund 10 % höher als das Landesmittel. Signifikante Veränderungen der Kohlen- und Stickstoffvorräte auf Profilebene gab es beim Kalkstein nicht.

Die Kalkstein-Standorte werden in Niedersachsen nicht gekalkt.

1.11.7 *Buntsandstein (6 % der Waldfläche in Niedersachsen)*

Die Standorte dieser Substratgruppe kommen ausschließlich im niedersächsischen Bergland vor, typisch sind sie für den Solling und das Weserbergland.

Die Oberböden sind mit Trockenrohdichten um 0,9 g/cm³ in der Regel locker. Im Unterboden liegen die Trockenrohdichten bei mittleren 1,5 g/cm³ und damit im mittleren Bereich für niedersächsische Waldböden. Der Oberboden hat Grobbodenanteile von ungefähr 10-15 Vol.-%. Die Gehalte steigen im Unterboden auf durchschnittlich 40 Vol.-% an und sind damit vergleichsweise relativ hoch. Aufgrund der hohen Grobbodenanteile sind die durchschnittlichen Feinbodenvorräte beim Buntsandstein meist gering. Die nFK mit mittleren 140 mm bis 90 cm Bodentiefe liegt im hohen Bewertungsbereich.

Die mittlere Austauschkapazität von rund 600 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe ist mittel-hoch und entspricht ungefähr dem Mittel von Niedersachsens Waldböden. Die durchschnittliche Basensättigung ist mit 18 % gering. Die mittleren Calciumvorräte von 1.400 kg/ha sind rund 2/3 niedriger als das Landesmittel, aber noch im mittleren Bewertungsbereich. Die Magnesiumvorräte liegen mit rund 400 kg/ha ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich und unterhalb des Landesmittels. Kalium ist mit rund 500 kg/ha im gering-mittleren Bewertungsbereich und damit über dem Landesmittel, was vor allem in den tonigen Ausprägungen des Buntsandsteins begründet ist. Die Buntsandstein-Standorte zählen zu den empfindlich auf Versauerung reagierenden Waldböden.

Die pH(H₂O)-Werte verteilen sich im Oberboden bis 10 cm überwiegend im Aluminium- und Austauscher-, in den tieferen Bodenschichten dann nur noch im Austauscher-Pufferbereich und sind von daher ungefähr mit den unverlehmten Sanden zu vergleichen. Im Auflagehumus stiegen die pH(H₂O)-Werte im Vergleich zur BZE I signifikant an. Sonst gab es keine eindeutigen Veränderungen, auch nicht bei den pH(KCl)-Werten. Die Basensättigung blieb – ebenso wie die Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte – im Vergleich zur BZE I nahezu unverändert.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene sind mit rund 110 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und rund 30 % unter dem Mittel von Niedersachsen. Die Stickstoffvorräte sind mit 7 t/ha rund 15 % geringer. Sowohl die Kohlenstoff- als auch die Stickstoffvorräte sind vor allem im Oberboden seit der BZE I signifikant angestiegen (+30 % und +12 %).

Die Buntsandstein-Standorte sind für die Waldkalkung vorgesehen, alle BZE-Punkte dieser Substratgruppe sind bereits gekalkt worden.

1.11.8 Tonschiefer (4 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Die Standorte des Tonschiefers befinden sich im niedersächsischen Harz und zählen eher zu den basenarmen Gesteinen, können aber auch je nach Zusammensetzung auch besser mit Nährstoffen versorgt sein.

Die Oberböden des Tonschiefers weisen sehr geringe Trockenrohdichten um 0,5 g/cm³ auf und sind sehr locker. Im Unterboden steigen die Werte auf 1,2 g/cm³. Dies sind – jeweils bezogen auf die Tiefenstufen im Vergleich aller Waldböden in Niedersachsen – mit die geringsten Trockenrohdichten. Die Grobbodengehalte zählen mit 20 Vol.-% im Oberboden und rund 50 Vol.-% im Unterboden zu den höchsten. Noch höhere Gehalte weisen nur die Grauwacke und der Granit auf. Entsprechend gering sind die Feinbodenvorräte, die z. B. im Vergleich zu den Sanden nur halb so hoch sind. Die nFK mit mittleren 150 mm bis 90 cm Bodentiefe liegt im hohen Bewertungsbereich und über dem Mittel niedersächsischer Waldböden.

Die mittlere Austauschkapazität von rund 480 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe liegt im mittleren Bewertungsbereich und erreicht rund 80 % des Mittelwerts von Niedersachsens Waldböden. Die durchschnittliche Basensättigung ist mit 21 % als gering-mittel zu bewerten und nur geringfügig höher als beim Buntsandstein. Die mittleren Calciumvorräte von 1.850 kg/ha sind halb so hoch wie das Landesmittel und liegen im mittleren Bewertungsbereich. Die Magnesiumvorräte mit rund 440 kg/ha übertreffen die des Buntsandsteins. Sie liegen ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich und unterhalb des Landesmittels. Kalium fällt mit rund 330 kg/ha in den geringen Bewertungsbereich und liegt damit auf dem Niveau des Landesmittels. Die Tonschiefer-Standorte zählen zu den empfindlich auf Versauerung reagierenden Waldböden.

Die pH(H₂O)-Werte liegen in allen Bodentiefen mit wenigen Ausnahmen im Austauscher-Pufferbereich und sind damit vor allem im Oberboden besser zu beurteilen als beispielsweise die unverlehmten und schwach verlehmten Sande oder der Buntsandstein. Signifikante Veränderungen gab es bei den pH-Werten im Vergleich zur BZE I nicht. Die Basensättigung stieg auf Profilebene um 10 %-Punkte an. Bei den Calcium- und Magnesiumvorräten kam es zwischen 10 und 60 cm Bodentiefe zu signifikanten Zunahmen, die aber nicht auf Profilebene deutlich wurden. Bei Kalium ergaben sich keine Veränderungen zur BZE I.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene sind mit rund 160 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und etwas oberhalb des Mittels von Niedersachsens Waldböden. Die Stickstoffvorräte sind mit 9,8 t/ha rund 17 % höher als das niedersächsische Mittel. Signifikante Veränderungen ergaben sich weder beim Kohlenstoff- noch beim Stickstoffvorrat.

Die Tonschiefer-Standorte sind für die Waldkalkung vorgesehen, alle BZE-Punkte dieser Substratgruppe sind bereits gekalkt worden.

1.11.9 Lehm (4 % der Waldfläche in Niedersachsen)

In der BZE umfassen die Standorte des Lehms Böden mit stark lehmigen Sanden bis tonigen Lehmen, also beispielsweise Geschiebelehme, Hochflut- oder Auenlehme sowie Marschen, Moränenablagerungen oder auch Kolluvien mit entsprechenden Bodenarten. Diese Standorte finden sich sowohl im niedersächsischen Tiefland als auch im Bergland.

Die Trockenrohdichten dieser Lehm Böden sind relativ hoch, sie reichen von 1,1 g/cm³ im Oberboden bis 1,5 g/cm³ im Unterboden und sind mit den Sanden vergleichbar. Grobboden ist in diesen Böden kaum vorhanden. Die Lehme weisen damit mit den Sanden die höchsten Feinbodenvorräte auf. Die nFK liegt mit mittleren 160 mm bis 90 cm Bodentiefe im hohen Bewertungsbereich und über dem Mittel niedersächsischer Waldböden.

Die durchschnittliche Austauschkapazität von rund 1.300 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe liegt im hohen Bewertungsbereich und ist mehr als doppelt so hoch wie das Mittel niedersächsischer Waldböden. Dieser Wert wird in Niedersachsen nur von den Tonen übertroffen. Die durchschnittliche Basensättigung von über 80 % ist hoch und wird nur noch von den Kalksteinen erreicht. Die mittleren Calciumvorräte von über 18.000 kg/ha gleichen den Vorräten auf Kalkstein und entsprechen dem Vierfachen des mittleren Calciumvorrats für niedersächsische Waldböden. Die Magnesiumvorräte übertreffen mit rund 1.600 kg/ha den Kalkstein, liegen im hohen Bewertungsbereich und ungefähr beim Dreifachen des Landesmittels. Kalium liegt mit rund 440 kg/ha im gering-mittleren Bewertungsbereich und rund 25 % über dem mittleren Kaliumvorrat des Landesmittels.

Die pH(H₂O)-Werte verteilen sich bis 10 cm Bodentiefe im Austauscher-, bis 60 cm im Kohlensäure/Silikat- und ab 90 cm im Carbonat-Pufferbereich und zählen mit den Tonen und Kalksteinen zu den seltenen Standorten mit diesen Pufferbereichen in Niedersachsen. Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene fallen mit rund 160 t/ha in den mittleren Bewertungsbereich und liegen etwas oberhalb des Mittels von Niedersachsens Waldböden. Die Stickstoffvorräte sind mit 11,6 t/ha knapp 40 % höher. Signifikante Veränderungen bei den bodenchemischen Parametern im Vergleich zur BZE I gab es nicht.

Die Lehm-Standorte sind nicht für die Waldkalkung vorgesehen.

1.11.10 Grauwacke (3 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Die in der BZE II ausgewiesenen Standorte der Grauwacke in Niedersachsen befinden sich im Harz und bilden skelettreiche Braunerden aus schluffigen bis tonigen Lehmen.

Die Trockenrohdichten dieser Böden sind im Oberboden relativ gering. Sie schwanken zwischen 0,6 und 0,8 g/cm³ und liegen damit in der Gruppe der Standorte des Tonschiefers, der Kreidesandsteine und Tone. Im Unterboden steigen die Werte auf ungefähr 1,2 g/cm³ an. Mit Ausnahme des Granits im Unterboden weisen die Grauwacke-Standorte die höchsten Grobbodenanteile mit Werten zwischen 40 und 50 Vol.-% auf. Damit ergeben sich für die Grauwacke-Standorte die insgesamt geringsten Feinbodenvorräte auf Profilebene in Niedersachsen. Die nFK liegt mit mittleren 130 mm bis 90 cm Bodentiefe im hohen Bewertungsbereich und entspricht ungefähr dem Mittel niedersächsischer Waldböden.

Die mittlere Austauschkapazität von rund 470 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe liegt im mittleren Bewertungsbereich und ist niedriger als das Mittel niedersächsischer Waldböden. Die durchschnittliche Basensättigung von 36 % fällt in den mittleren Bewertungsbereich. Die mittleren Calciumvorräte von 2.500 kg/ha befinden sich im mittel-hohen Bewertungsbereich, erreichen aber nur rund 60 % des mittleren Calciumvorrats für niedersächsische Waldböden. Die Magnesiumvorräte mit rund 760 kg/ha liegen ebenfalls im mittel-hohen Bewertungsbereich, entsprechen ungefähr den Magnesiumvorräten des Lösslehms und 130 % des Landesmittels. Kalium liegt mit rund 370 kg/ha im geringen Bewertungsbereich und etwas oberhalb des mittleren Kaliumvorrats für Niedersachsens Waldböden.

Die pH(H₂O)-Werte verteilen sich bis 5 cm Bodentiefe im Aluminium- und bis 90 cm im Austauscher-Pufferbereich. Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene befinden sich mit rund 136 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und etwas unterhalb des Mittels von Niedersachsens Waldböden. Die Stickstoffvorräte liegen mit 8,9 t/ha etwas höher als das Mittel. Für die Berechnung belastbarer Veränderungen von bodenchemischen Parametern gibt es in diesem Kollektiv zu wenig Stichprobenpunkte.

In Abhängigkeit von der Nährstoffziffer sind die Grauwacke-Standorte für eine Waldkalkung vorgesehen, im BZE II-Kollektiv sind alle Punkte bereits gekalkt worden.

1.11.11 Ton(stein) (2 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Die Substratgruppe Ton(stein) setzt sich in Niedersachsen in der BZE II aus Standorten des Oberen Buntsandsteins (Röt), Keuper- und Juratonen des niedersächsischen Berglands zusammen. Die Braunerden oder auch Pelosole mit teilweiser Pseudovergleyung mit vorherrschenden schluffig bis tonigen Lehmen im Oberboden und Tonen im Unterboden weisen Trockenrohdichten im Oberboden

zwischen 1,0 und 1,4 g/cm³ auf, sie sind mit den Sanden und Lehmen vergleichbar. Im Unterboden steigen die Trockenrohdichten auf Werte um 1,4 g/cm³. Die Skelettgehalte sind überwiegend recht gering und liegen zwischen 5 und 20 Vol.-%, entsprechend hoch sind die Feinbodenvorräte. Mit den Sanden und Lehmen zählen die Ton(steine) zu den Böden mit den höchsten Feinbodenvorräten in Niedersachsen. Die nFK liegt mit mittleren 150 mm bis 90 cm im hohen Bewertungsbereich und entspricht in etwa dem Mittel für Niedersachsens Waldböden (156 mm). In dieser Substratgruppe befinden sich die untersuchten Bodenkennwerte meist im hohen Bewertungsbereich und übersteigen die jeweiligen Mittel in Niedersachsen.

Die Austauschkapazität liegt bei rund 1.500 kmol_c/ha und damit im hohen Bewertungsbereich. Die Werte der Basensättigung zeigen eine weite Spanne von mittel-hoch bis sehr hoch. Der Mittelwert liegt bei 60 %. Die BZE II-Punkte der Substratgruppe Ton(stein) sind hinsichtlich der Calcium- und Magnesiumvorräte als sehr hoch zu bewerten. Als einzige Substratgruppe liegen beim Ton(stein) auch die Kaliumvorräte im mittel-hohen Bewertungsbereich. Diese Substratgruppe hat die höchsten mittleren Kaliumvorräte in der BZE II.

Die Ton(steine) befinden sich bis 30 cm Bodentiefe überwiegend im Austausch-, teilweise auch im Aluminium-Pufferbereich. Im Unterboden ab 30 cm steigen die pH(H₂O)-Werte deutlich an. Hier werden der Kohlensäure-Silikat- und ab 60 cm der Carbonat-Pufferbereich erreicht. Diese Pufferbereiche kommen in Niedersachsen sonst nur bei den Kalksteinen und Lehmen vor.

Die Kohlenstoffvorräte liegen zum Zeitpunkt der BZE II mit rund 150 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und nahe am Mittel für niedersächsische Waldböden. Die Stickstoffvorräte sind mit rund 11 t/ha im Vergleich der Substratgruppen recht hoch und im mittel-hohen Bewertungsbereich.

Für die Berechnung belastbarer Veränderungen von bodenchemischen Parametern gibt es in diesem Kollektiv zu wenig Stichprobenpunkte.

Ton(stein) wird aktuell aufgrund der hohen Basensättigung im Unterboden nicht gekalkt.

1.11.12 Kreidesandstein und Granit (2 % der Waldfläche in Niedersachsen)

Diese Substratgruppen sind bei der BZE II-Stichprobe nur in geringer Anzahl vertreten. Die folgenden Angaben haben daher nur Beispielcharakter.

Sowohl der Kreidesandstein als auch der Granit zählen zu den basenarmen Silikatgesteinen, die zwar mittlere Austauschkapazitäten, aber mit 24 bzw. 14 % auf Profilebene eher geringe bis sehr geringe Basensättigungen aufweisen. Die Nährstoffvorräte von Calcium liegen beim Kreidesandstein im mittleren und bei Granit im gering-mittleren Bewertungsbereich. Bei beiden Substratgruppen befindet sich Magnesium im mittleren und Kalium im geringen Bewertungsbereich. Die Standorte

sind alle gekalkt worden. Die nFK ist mit Werten zwischen 130 und 150 mm bis 90 cm hoch.

1.12 Humusformen

20 % der niedersächsischen BZE II-Punkte weisen den Humustyp Mull auf, der die günstigsten Mineralisierungsbedingungen für den Waldboden kennzeichnet. Der Waldboden wird intensiv von Regenwürmern gelockert, die Streuzersetzung verläuft rasch im oberen Mineralboden, der meist ein krümeliges Gefüge aufweist. Der mullartige Moder, der ebenfalls noch relativ günstige Zersetzungsbedingungen anzeigt, ist mit 9 % in der BZE II vertreten. Moder-Standorte haben insgesamt einen Anteil von 40 % (feinhumusarm: 17 %, feinhumusreich: 23 %). Hier sind Regenwürmer seltener, Arthropoden wie Tausendfüßler oder Asseln sind häufiger. Die Streuzersetzung verläuft langsamer und nicht mehr im Mineralboden, sondern in der organischen Auflage. Rohhumusartige Humusformen mit gestörter Streuzersetzung sind auf 9 % der Inventurpunkte festzustellen. Gestörte Streuzersetzung anzeigende Auflagehumusformen (typischer Rohhumus-feinhumusarm bzw. feinhumusreich) sind auf 5 % der niedersächsischen BZE-Punkte ausgeprägt. Auf 10 % der BZE-Punkte findet sich die Sonderform „Graswurzelfilzmoder“, vor allem unter Kiefernbeständen auf unverlehmtem Sand. Hydromorphe Humusformen wie Feuchtmoder (5 %) und Anmoor (1 %) kommen vereinzelt ebenfalls vor, bei zwei BZE-Punkten (1 %) gab es keine Angabe zur Humusform aufgrund erheblicher Störungen (Vollumbruch und Humusabschiebung).

Im Vergleich zu Hessens Waldböden, bei denen die günstigsten Mull-Humusformen auf gut 40 % der BZE II-Standorte vorkommen (PAAR et al. 2016), weisen Niedersachsens Waldböden deutlich schlechtere Humusformen auf. Dies steht im engen Zusammenhang mit dem hohen Anteil unverlehmter Sande und den Nadelholzbeständen in Niedersachsen, vor allem im Tiefland.

Der Anteil der Mull-Humusformen hat sich von der BZE I zur BZE II in Niedersachsen nicht verändert. Deutlich verringert hat sich dagegen der Anteil von Standorten mit Rohhumus von 14 % in der BZE I auf 5 % in der BZE II. Neben dem moderaten Abbau der Auflagehumusdecken zwischen den Inventuren ist damit auch eine qualitative Verbesserung der Humusformen vom Rohhumus zu besseren Humusformen im Moder festzustellen.

Die Tendenz zum Humusabbau kann zum einen mit den langjährig hohen Stickstoffeinträgen, zum anderen auch mit insgesamt höheren Temperaturen bei ähnlichem Niederschlag, stärker durchforsteten Beständen mit höheren Laubholzanteilen und Waldkalkungsmaßnahmen zusammenhängen.

Die durchschnittliche Trockenmasse im Auflagehumus von 75,5 t/ha in Niedersachsen hat sich bezogen auf die BZE I leicht um 5 % verringert. Diese Differenz ist jedoch nicht signifikant. Auf den gekalkten BZE-Standorten, also vor allem den

Standorten der unverlehmten und schwach verlehnten Sande, Lösslehme, Buntsandsteine, Tonschiefer und Grauwacken, zeigt sich ein signifikanter Rückgang von 10,3 t/ha (12 % bezogen auf die Trockenmasse dieses Kollektives bei der BZE I). Im ungekalkten Vergleichskollektiv wurde bezogen auf die BZE I dagegen ein nicht signifikanter Anstieg der Trockenmasse um 23 % zur BZE II festgestellt.

Die Trockenmasse vom Auflagehumus wird wesentlich von der Baumartenzusammensetzung beeinflusst. Mit zunehmendem Anteil von Nadelholz erhöht sich i. d. R. die Trockenmasse: In den von Laubholz bestimmten Bestandestypen Buche, Eiche und sonstiges Laubholz (z. B. Birke, Erle, Roteiche, Ahorn oder Esche) liegen die durchschnittlichen Trockenmassen des Auflagehumus überwiegend zwischen 20 und 40 t/ha, im Laubmischwald (bis 30 % Nadelholzanteil möglich) bei 62 t/ha und in den von Nadelholz bestimmten Bestandestypen zwischen 70 und 105 t/ha. Hohe Trockenmassen im Auflagehumus können aber auch unter Laubwald auftreten, wie die Extremwerte bei Buche und Eiche zeigen. Ebenso sind geringe Werte im Auflagehumus unter Nadelholz möglich.

Die Trockenmassen im Auflagehumus sind in den Substratgruppen sehr unterschiedlich. Die geringsten Auflagen finden sich auf den besser versorgten Standorten des Kalksteins mit durchschnittlich 18 t/ha. Es folgen die Substratgruppen Lehm, Buntsandstein und Ton(stein) mit Auflagen um 30 t/ha Trockenmasse. Deutlich mächtigere Auflagen um knapp 50 t/ha durchschnittlicher Trockenmasse finden sich bei den Lösslehmen und verlehnten Sanden. Mit Werten um 70 t/ha folgen Tonschiefer und Grauwacke. Die mächtigsten Auflagen mit Werten zwischen 80 und 90 t/ha durchschnittlicher Trockenmasse finden sich bei den Substratgruppen Granit, schwach verlehnter Sand, Kreidesandstein, unverlehmter Sand und auf den organisch geprägten Standorten (ohne Berücksichtigung der Torfauflage). Auf diesen Standorten sind die Nadelholzanteile in der Regel höher, daher gibt es Korrelationen zwischen den Substratgruppen und Bestandestypen zu den Trockenmassen im Auflagehumus.

Insgesamt zeigt sich eine Entwicklung der morphologischen Humusformen hin zu besseren Zersetzungsbedingungen: Der Anteil von Rohhumus hat deutlich abgenommen. Neben der großflächigen Bodenschutzkalkung könnten langjährig hohe Stickstoffeinträge, mehr Wärme und die Erhöhung des Laubholzanteils eine Förderung der bodenbiologischen Aktivität bewirkt haben. Auch für Bayern wird im Rahmen der BZE-Auswertungen eine tendenzielle Verbesserung der Humusformen festgestellt (SCHUBERT et al. 2015). In Rheinland-Pfalz dagegen, wo viele Waldstandorte gekalkt wurden, fand zwischen der BZE I und der BZE II nur eine Verschiebung innerhalb der Moderhumusformen statt (BLOCK u. GAUER 2012). Deutlich geringere Mächtigkeiten beim Auflagehumus wurden nach Kalkung in Hessen (PAAR et al. 2016) und auf Bundesebene festgestellt (WELLBROCK et al. 2016). Die Kohlenstoffverluste im Auflagehumus werden jedoch in Niedersachsen und Hessen durch Zunahmen im Mineralboden mehr als ausgeglichen.

1.13 Status und Veränderung der Kohlenstoffspeicherung in den Waldböden

Kohlenstoff hat für Böden eine Vielzahl wichtiger Funktionen. Zu nennen sind die Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität, der Luft- und Wärmehaushalt, das Puffervermögen und die biologische Aktivität. Darüber hinaus erlangt der Waldboden als Speicher für Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre eine neue Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit und Politik.

Die weltweiten jährlichen Treibhausgasemissionen erreichten mit 49,5 Gt im Jahre 2010 den bisherigen Höchststand. Die Notwendigkeit, den Ausstoß der Treibhausgase zu vermindern, hat hohe internationale Priorität und umfasst ein umfangreiches Portfolio von Maßnahmen (IPCC 2014). Neben der Vermeidung von CO₂-Emissionen ist die Speicherung von Kohlenstoff ein wichtiges klimapolitisches Ziel. Die Bundesrepublik Deutschland ist als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen verpflichtet, Inventare zur nationalen Treibhausgasemission zu erstellen und fortzuschreiben. Zur bundesweiten Quantifizierung des Waldbodens als Kohlenstoffquelle bzw. -senke sind auch die niedersächsischen Daten der BZE I und II in den Nationalen Inventarbericht (National Inventory Report (UBA 2014)) eingegangen.

Die Quantifizierung des Kohlenstoffvorrates in Waldböden ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Die meist hohe kleinräumige Variabilität erschwert eine abgesicherte Quantifizierung. Zudem kann die Vorratsbestimmung durch unterschiedliche Ableitungen der Trockenrohdichten bzw. Skelettgehalte der Böden erheblich beeinflusst werden.

Für das niedersächsische BZE-Kollektiv mit 173 Stichprobenpunkten ergeben sich entsprechend der bundesweiten methodischen Vorgaben zur Durchführung der BZE mittlere Kohlenstoffvorräte von 180 t/ha (Auflagehumus und Mineralboden) zum Zeitpunkt der BZE II. Die Kohlenstoffvorräte liegen im mittleren Bereich nach AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) und belegen eine langfristige Nettospeicherung. Niedersächsische Waldböden stellen somit eine wichtige Kohlenstoffsenke dar. Die höchsten Kohlenstoffvorräte enthalten ehemalige Moorböden, auf denen aktuell Wald stockt. Hier betragen die Kohlenstoffvorräte je nach Mächtigkeit und Zusammensetzung der Moordecke zwischen 200 und über 600 t Kohlenstoff je ha.

Neben der insgesamt im Boden festgelegten Kohlenstoffmenge in Waldböden ist vor allem die zeitliche Rate der Kohlenstoffspeicherung oder Freisetzung von Interesse. Im Zeitraum 1991 (BZE I) bis 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in niedersächsischen Waldböden insgesamt deutlich zugenommen. Im Vergleich zur BZE I erhöhten sie sich bis 90 cm Bodentiefe um 21,7 t/ha (16 %), was einer jährlichen Speicherrate von rund 1,35 t/ha entspricht.

Über den Zeitraum von 16 Jahren ist eine Kohlenstoffverlagerung vom Auflagehumus in den oberen Mineralboden zu beobachten. Der Kohlenstoffvorrat im Auflagehumus hat um 3 t/ha abgenommen. Dies wird jedoch durch Zunahmen im Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe (+ 20,5 t/ha) bei Weitem kompensiert.

Die Speicherraten für Kohlenstoff im Waldboden sind bundesweit sehr unterschiedlich. Ein ähnlich hoher Anstieg der Kohlenstoffvorräte wie in Niedersachsens Waldböden wurde im Rahmen der BZE-Auswertungen auch für Mecklenburg Vorpommern nachgewiesen, wobei hier der Kohlenstoffvorrat in der Auflage konstant geblieben ist (RUSS et al. 2011). Die Bodenzustandserhebungen in Rheinland-Pfalz dagegen ergaben zwar eine Abnahme der Kohlenstoffgehalte in der Humusaufgabe, aber keine abgesicherten Unterschiede der Kohlenstoffvorräte insgesamt (BLOCK u. GAUER 2012). In den Waldböden Baden-Württembergs kam es insgesamt zu Abnahmen, die vor allem auf Abnahmen im Auflagehumus zurückzuführen waren (HARTMANN et al. 2016). In Hessen speicherten die Waldböden deutlich weniger als in Niedersachsen (0,3 t je ha und Jahr, PAAR et al. 2016), die Unterschiede zwischen der BZE I und BZE II waren signifikant. Auch hier nahmen wie in Niedersachsen die Vorräte im Auflagehumus ab und wurden durch Zunahmen im oberen Mineralboden bis 30 cm mehr als ausgeglichen. Auf Bundesebene ergaben sich aus allen BZE-Erhebungen der Länder mittlere signifikante Zunahmen auf Profilebene um 0,75 t je ha und Jahr, die wie in Niedersachsen und Hessen wesentlich auf deutlichen Zunahmen im Mineralboden bis 30 cm basieren (GRÜNEBERG et al. 2016).

Bisher wurde davon ausgegangen, dass sich die Kohlenstoffvorräte in Waldböden nur in sehr langen Zeiträumen ändern. Der vor allem über Blatt- und Nadelstreu, Früchte, Totholz und Wurzeln eingetragene Kohlenstoff dient vielen Mikroorganismen als Nahrungsgrundlage und wird über die Zersetzerketten letzten Endes als Kohlendioxid wieder abgegeben. Kohlenstoffeintrag und -austrag sind i. d. R. mehr oder weniger im Gleichgewicht. Organische Substanz wird nur in geringem Maße im Waldboden über die Humusbildung, z. B. als organische Humin- und Fulvosäuren sowie Ton-Humuskomplexe, auch langfristig gespeichert. Es werden durchschnittliche Speicherraten um 220 kg je Jahr und ha in Europas Waldböden kalkuliert (LUYSSAERT et al. 2010). Im Laufe der Zeit können sich natürlich auch bei geringen Speicherraten hohe Vorräte aufsummieren.

Die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte von 180 t/ha in Niedersachsens Waldböden zeugen von dieser langfristigen Nettospeicherung. Dabei wird es immer wieder auch Phasen von Kohlenstoffverlusten gegeben haben, z. B. durch intensive Holz- und Streunutzung, Waldbrand oder -rodung.

Die Ergebnisse für Niedersachsen geben des Weiteren Hinweise auf einen positiven Einfluss der Kalkung auf den Kohlenstoffhaushalt: Zwar wird durch die Waldkalkung der Kohlenstoffvorratsabbau im Auflagehumus deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch diese Kohlenstoffverluste über Vorratsaufbau im Mineralbodenhumus des Oberbodens mehr als kompensiert. Für Buchenbestände in Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hessen und Rheinland-Pfalz zeigen auch EVERS et al.

(2008) einen durch Kalkung induzierten Auflagehumusabbau, der nicht mit einem Kohlenstoffverlust verbunden ist, da sich der Kohlenstoff im Mineralboden anreichert. Ein ebenso deutlicher Effekt der Waldkalkung auf die Kohlenstoffspeicherung zeigt sich in Hessens Wäldern, vor allem auf Standorten des Buntsandsteins (PAAR et al. 2016).

Die Waldkalkung verbessert demnach die Senkenfunktion für Kohlenstoff in Waldböden. Sie dient zudem der Stabilisierung des Waldbodenzustandes.

Die bislang vorliegenden Ergebnisse zur Höhe der Kohlenstoffvorräte müssen aufgrund erheblicher Variabilitäten und Unsicherheiten hinsichtlich der Quantifizierung des Kohlenstoffhaushaltes von Waldböden mit Vorsicht interpretiert werden. Die ermittelten Veränderungen seit der BZE I beruhen auf einer einheitlichen Berechnungsbasis und sind daher als gesichert anzusehen. Die Ergebnisse von FORTMANN et al. (2012) zur Entwicklung der Bodenvorräte an organischem Kohlenstoff auf den Intensivmonitoringflächen Solling Buche bzw. Fichte belegen jedoch, dass die Veränderungen innerhalb von zwei Zustandsphasen und die Ableitung von Trends mit großen Unschärfen verbunden sein können.

Umfassende Ursachenanalysen für die unterschiedlichen Befunde zum Kohlenstoffstatus und zur Kohlenstoffveränderung in Waldböden auf Bundesebene sind notwendig und zielführend hinsichtlich der Ableitung von Prozess- und Regulationsmechanismen. Die bislang vorliegenden Ergebnisse müssen trotz länderübergreifender methodischer Standards mit großer Sorgfalt interpretiert werden.

1.14 Stickstoff

Stickstoff gilt als ein Schlüsselement in der Biosphäre und ist die quantitativ wichtigste Komponente der Pflanzenernährung (EVERS 1964, MARSCHNER 1986, EICHHORN 1995). Vor dem Industriezeitalter war Stickstoff in Waldökosystemen ein Mangelfaktor. Das Angebot war begrenzt und es herrschte eine ausgeprägte Konkurrenz um die in der Regel sehr knappe Ressource (KRZAK 1981, KIMMINS 1987, TAMM 1991, EICHHORN 1995). Infolge anthropogener Einträge in den letzten Jahrzehnten ist jedoch mancherorts eine deutliche Sättigung der Wälder mit Stickstoff erkennbar (ABER et al. 1989). Der eingetragene Stickstoff hat in zahlreichen Waldökosystemen zu erheblichen Veränderungen geführt. Nach COLE (1992) und VAN MIEGROET et al. (1992) sind Ökosysteme stickstoffgesättigt, wenn der Input aus Stickstoffmineralisierung und Atmosphäre die Rückhaltefähigkeit des Systems langfristig übersteigt und regelmäßige Nitratausträge stattfinden. EICHHORN (1995) unterscheidet vier Phasen der Ökosystementwicklung zunehmend stickstoffgesättigter Buchenwaldökosysteme. In der letzten Phase (ausgeprägte Stickstoffübersättigung) sind ganzjährige Nitratpools im Sickerwasser feststellbar.

Auf negative Auswirkungen und Risiken erhöhter Stickstoffzufuhr haben verschiedene Autoren hingewiesen (MEYER 1984, 1985, NIHLGÅRD 1985, MATZNER 1988, SCHULZE et al. 1989, VAN MIEGROET et al. 1992, BLOCK et al. 2007, RASPE

u. GÖTTLEIN 2008). Im Sondergutachten „Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem“ des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU 2015) werden die hohen Einträge von Stickstoffverbindungen als Ursache von Versauerung und Eutrophierung mit der Folge von Verlusten an Biodiversität identifiziert, die zusätzlich zur Belastung des Grundwassers mit Nitrat beitragen und durch vermehrte Lachgasbildung die Ozonschicht schädigen und den Klimawandel antreiben.

Die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und bis 90 cm Bodentiefe liegen in den Waldböden Niedersachsens bei der BZE II mit durchschnittlich 8,45 t/ha Stickstoff im mittleren Bewertungsbereich. Der Auflagehumus hat mit 1,1 t/ha Stickstoff dabei einen Anteil von 12 %. Ähnlich wie beim Kohlenstoffvorrat sind in den oberen 30 cm Mineralboden (Auflagehumus eingeschlossen) mit rund 4 t/ha Stickstoff insgesamt 65 % der Stickstoffvorräte bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Stickstoff ist hauptsächlich in organischer Substanz gebunden, die vor allem im oberen Mineralboden mit höheren Anteilen vertreten ist. Dennoch sind die Anteile der Tiefenstufe 30–60 cm am Stickstoffvorrat mit 22 % und der Tiefenstufe 60–90 cm mit 13 % nicht unbedeutend. Die prozentuale Tiefenverteilung der Stickstoffvorräte war bei der BZE I nahezu identisch.

Im Gegensatz zu Kohlenstoff ergibt sich für Stickstoff auf Profilebene summiert über den Auflagehumus und die Tiefenstufen bis 90 cm Bodentiefe keine absicherbare Anreicherung von Stickstoff. Die Zunahme um 400 kg/ha (+5 %) ist nicht signifikant. Der signifikante Stickstoffverlust im Auflagehumus gleicht sich mit den ebenfalls signifikanten Zunahmen im oberen Mineralboden bis 30 cm und den signifikanten Abnahmen zwischen 60 und 90 cm Bodentiefe auf Gesamtprofilebene aus. Damit zeigt sich wie bei den Kohlenstoffvorräten die Tendenz einer Verlagerung der Stickstoffvorräte aus der Humusaufgabe in den Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe.

Die Waldkalkung bewirkt eine deutlich stärkere Abnahme der Stickstoffvorräte im Auflagehumus als vergleichsweise im ungekalkten Kollektiv. Im gekalkten Kollektiv sind jedoch die Speicherraten im oberen Mineralboden höher und die Verluste im unteren Mineralboden deutlich geringer als im ungekalkten Kollektiv. Damit kam es in der Tendenz im gekalkten Kollektiv zu einer Anreicherung von Stickstoff im Vergleich zur BZE I, im ungekalkten Kollektiv dagegen zu einer Abnahme.

Die C/N-Verhältnisse erhöhten sich im Auflagehumus und allen Mineralbodentiefenstufen zwischen der BZE I und der BZE II signifikant mit Ausnahme der Tiefenstufe 0–5 cm, in der es keine Veränderung gab. Bezogen auf das Profilmittel liegen die C/N-Verhältnisse in der BZE II im mäßig weiten (C/N 21), bei der BZE I noch im mittleren Bereich (C/N 18). Die C/N-Verhältnisse in den Substratgruppen spiegeln die Mineralisierungsbedingungen wider. Sie sind bei den besseren Standorten des Kalksteins und der Lehme enger als bei den unverlehnten Sanden. Ebenso sind sie in Laubholzbeständen enger als in Nadelholzbeständen. Im gekalkten Kol-

ektiv wirkt sich gegenüber dem ungekalkten Kollektiv die relativ stärkere Kohlenstoffzunahme gegenüber Stickstoff mit signifikant weiteren C/N-Verhältnissen in den Tiefenstufen 10-30 und 30-60 cm aus. Ansonsten gibt es keine relevanten Unterschiede zwischen beiden Kollektiven. Auf Profilebene erweiterten sich in beiden Kollektiven die C/N-Verhältnisse.

Über die Erstellung einer mittleren Stickstoffbilanz auf Basis einer Bilanz für jeden BZE II-Punkt kann die Größenordnung der Vorratsdifferenz in der Festphase für Auflagehumus und Mineralboden überprüft werden. Als positive Eingangsgröße für diese Bilanz geht das Mittel der modellierten luftgetragenen Gesamtstickstoffeinträge der BZE-Punkte mit 22 kg/ha und Jahr für den Zeitraum zwischen der BZE I und II für Niedersachsen ein (s. Kap. 7 „Stickstoffstatus in der Bodenlösung und Stickstoffbilanz“). Als negative Eingangsgrößen wurden mittlere Nitrat-N-Austräge von 6,4 kg/ha und Jahr über den 1:2-Extrakt (ohne organische Standorte), Austräge durch Denitrifikation von 2,7 kg und Austräge über die Aufnahme mit der Bestockung von 6,4 kg/ha und Jahr modelliert. Als mittlere Bilanz ergab sich ein mittlerer Zuwachs an Stickstoff von 6,3 kg/ha und Jahr. Aus der entsprechenden Vorratsdifferenz der Festphase für die BZE-Punkte mit vollständiger Bilanz ergaben sich 8,1 kg/ha und Jahr. Damit sind die aus der Festphase und aus den einzelnen Stickstoffflüssen berechneten Größenordnungen der Stickstoffbilanz relativ gut vergleichbar. Weitere vergleichende, bundesweite Auswertungen auf Level I- und Level II-Flächen sollten folgen, um die Veränderungen der Stickstoffhaushaltsgrößen in Wäldern noch genauer zu analysieren.

Austragsraten für Stickstoff aus Messdaten des Intensiven Monitorings in Niedersachsen mit dem Sickerwasser ergaben durchschnittlich 8,4 kg/ha und Jahr für den Zeitraum 1991-2007, wobei die Austragsraten stark variieren. So zeigen sich unter Buche Nitratausträge mit dem Sickerwasser von unter 5 kg, auf den Fichtenflächen dagegen Stickstoffausträge von knapp 9 kg/ha im Jahr (KLINCK et al. 2014). Diese Austragsraten decken sich gut mit den mittleren modellierten Austragsraten der BZE-Punkte.

Alle Bilanzierungsansätze sind von großen Unsicherheiten und Variabilitäten beeinflusst, dennoch scheinen die Größenordnungen gut vergleichbar zu sein. Sie deuten darauf hin, dass in den meisten niedersächsischen Waldökosystemen Stickstoff im System gespeichert wird und Nitratausträge mit dem Sickerwasser eher gering sind. Andererseits belegen teilweise hohe Stickstoffausträge, dass an einigen BZE-Punkten, insbesondere unter Kiefer und Fichte, Stickstoff nicht mehr vollständig im System gespeichert, sondern mit dem Sickerwasser in Form von Nitrat ausgewaschen wird. Diese Waldbestände können als stickstoffgesättigt angesehen werden. Im Schwerpunkt sind hiervon Gebiete mit hoher Stickstoffdeposition wie das Westniedersächsische Tiefland betroffen. Aber auch im Bergland, vor allem nach Sturmwurfereignissen, können Entkopplungen des Stickstoffkreislaufes mit Stickstoffausträgen über das Sickerwasser auftreten. Die Nitratauswaschung ist

begleitet vom Austrag basischer Kationen wie Calcium, Magnesium und Kalium und führt damit zur weiteren Versauerung der Böden.

2 Kurzportraits der BZE-Punkte („Steckbriefe“)

Andreas Schulze, Jan Evers, Uwe Paar

Mit dem forstökologischen Datenbanksystem ECO der NW-FVA (SCHULZE u. EVERS 2013) lassen sich für jeden BZE-Punkt Kurzportraits automatisiert generieren. Diese „Steckbriefe“ beinhalten ausgewählte Informationen zu allgemeinen Standortstypisierungen, zur Bodenmorphologie, Bodenchemie, Bodenphysik, zur Bestockung und Ertragskunde sowie zur Waldernährung und Bodenvegetation. Diese Kurzportraits sind bezüglich ausgewählter Merkmale parametrisierbar. Die farblichen Hinterlegungen in den angegebenen Wertetabellen stützen sich auf folgende, im Bericht verwendete Bewertungsrahmen:

Die Grenzwerte für die Bewertung von Elementgehalten in den Nadeln und Blättern der Hauptbaumarten (Blatt-Gehalte in den Kurzportraits) entsprechen denen von GÖTTLEIN (2015), FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012) und sind in den Tabellen 20 (S. 264) und 21 (S. 265) im Kapitel 8 „Waldernährung“ in diesem Band aufgeführt.

Die Kenngrößen und Grenzwerte für die Einstufung der Humusaufgabe und des Mineralbodens nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) sind in Tabelle 15 (S. 164) im Kapitel 6.5 „Bodenchemische Kenngrößen in Niedersachsen“ zusammenfassend dargestellt (Boden-Analytik I~II in den Kurzportraits). Die Einstufung des Mineralbodens nach Pufferbereichen findet sich in Tabelle 16 auf Seite 221.

Die farbliche Hinterlegung der Vegetations-Trennarten bezüglich des pH(H₂O) richtet sich nach den Ergebnissen des Kapitels 9 „Vegetation“ (S. 339 ff.).

Nachfolgend wird für die fünf in Niedersachsen am häufigsten vorkommenden Substratgruppen (Abb. 1: unverlehmte Sande, Abb. 2: schwach verlehmte Sande, Abb. 3: Lösslehm, Abb. 4: organisch geprägte Standorte und Abb. 5: Kalkstein) jeweils ein Portrait eines BZE-Punktes exemplarisch vorgestellt.

NI00463 HoheHeide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3564000 / 5879000 Bund = 30125, Land_I = 125, Land_II = 463, EU = 147

Landkreis Soltau/Fallingb., FoA 685_WAL_Bispingen, TK2925, Privatwald

110m NN, West-Exposition, Neigung 5 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,4°C | 783mm (VZ=14,9°C | 335mm), 1980-2010: 9,1°C | 790mm (VZ=15,5°C | 336mm)

Kalkung: nein, keine

Stammzahl/ha: 100, Grundfläche: 13,8m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 75%, Pflanzenarten: 20

Plot-Info: - Störung II: Straße

Info I: - Info II: Autobahn A7

**Bestockung I - II**

	I (13.06.1990)	II (18.12.2006)
Bestockungstyp	Kiefer>70	Kiefer>70
Bestandesstruktur	einstufig	einstufig
Kronenschluss	locker	lückig
Mischungsform	Reinbestand	Reinbestand

Ertragskundliche Aufnahme II

Baumart	Anteil*	Alter*	BHD*	KrAnsatz*	Höhe*	ErKlasse**	HBonität**
	%	2007	cm	m	m	-	-
Kiefer n=10	100.0	97.0	41.7	16.5 (n=7)	23.6 (n=7)	2,3	24

erlaubte Probestreife-Erntefernung berücksichtigt

* = Oberschicht, ** = Oberschicht

Blatt-Gehalte II *

Baumart	Ca	Mg	K	P	C	N	C/N	BIMasse
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	-	g
Kiefer Nadeljg1	2.5509	0.7427	6.6404	1.3833	527.3200	17.9200	29.4	14.9
Kiefer Nadeljg2	3.5055	0.5446	5.5808	1.2217	532.3100	18.3200	29.1	17.2

BZE II, vertikal



BZE II, nach Nord



1sch Ki-Rb [92], mittl-ger Bh, Ki über kurzschäftig, tw HZW, astig, ve schütter im UST, ve F I, 15-35], Sth-ger Bh, aus NV, keine eigene Schicht bildend, tw NV aus Ki, 5-10], Jungwuchs, Ji aus Pflanzung, 10], Jungwuchs, streifenweise

* Bewertungsrahmen (Göttlein 2015) unter Symptongrenze unter Normalbereich im Normalbereich über Normalbereich

erzeugt mit ECO-RASTMan V1.125 am 20.04.2018 10:33:54, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 1: Kurzportrait des BZE-Punktes 463 in der Hohen Heide (Substratgruppe unverlehmter Sand mit sehr geringer Basensättigung, ungekalkt), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 1)

NI00463 HoheHeide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3564000 / 5879000 Bund = 30125, Land_I = 125, Land_II = 463, EU = 147

Landkreis SoltauFallingb., FoA 685_WAL_Bispingen, TK2925, Privatwald

110m NN, West-Exposition, Neigung 5 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,4°C | 763mm (VZ=14,9°C | 335mm), 1980-2010: 9,1°C | 790mm (VZ=15,5°C | 336mm)

Kalkung: nein, keine

Standortstyp: Polygon = liegt 2012 nicht vor Punkt = 42,3-2,2 t

Wasserhaushalt: mäßig/kaum_frisch (Mittelhang, Haupthang)

Trophie: schwach_mesotroph - Substrat/Lagerung**: T2.2 (Typ 2, Klasse 1)

Substratgruppe: unverlehmterSand (-)



Profil-Morphologie I - II

	I (13.06.1990)	II (25.04.2007)
Streuart	Nadelstreu	Gras-NadelStreugemisch
Humusform	typischerModer_feinhumusreich	GraswurzelfilzModer
Humusmenge/-horiz.	123.4t/ha [12.0cm], L-3.0, Of-6.0, Oh-3.0cm	45.7t/ha [2.8cm], L-0.3, Of-2.2, Oh-0.3cm
Bodentyp	Braunerde-Podsol	Braunerde-Podsol ((.-Podsol))
forstl. Bearbeitung	keine	keine

Boden-Analytik I ~ II

Tiefe	TRD(Fb)	GrobB	nFK	BasSättg	AustKap	AK Ca	AK Mg	AK K	Corg	C/N	pH(H2O)	pH(KCl)
cm	g/cm³	Vol%	(KA5)mm %	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	t/ha	-	(DIN-pH)	(DIN-pH)
Auflage	-	-	-	34.4~45.0	39.3~11.3	181.6~68.6	29.4~11.4	49.9~20.0	59.9~18.6	24.6~25.2	3.77~3.70	2.83~2.85
0 - 5	1.25~1.08	2.1~2.1	~7.3	15.4~15.4	24.9~39.8	47.2~77.2	7.1~14.8	12.7~22.1	24.7~45.9	33.6~31.2	3.96~3.97	2.78~2.82
5 - 10	1.46~1.41	3.4~3.4	~5.8	10.3~11.0	19.3~32.7	20.6~40.4	3.4~9.2	7.2~14.6	10.5~17.7	24.8~31.3	3.86~4.11	3.01~2.97
10 - 30	1.21~1.21	6.7~6.7	~24.3	6.9~4.7	85.9~88.2	44.4~36.7	7.1~9.4	63.6~25.6	30.5~34.4	22.5~26.7	4.13~4.40	3.72~3.88
30 - 60	1.40~1.40	7.0~7.0	~25.1	6.9~5.9	116~69.4	54.8~16.9	9.5~9.9	67.2~52.3	37.9~22.0	24.2~21.7	4.36~4.71	4.06~4.34
60 - 90	1.51~1.51	5.4~5.4	~59.6	10.9~4.3	94.9~67.4	34.3~10.1	8.9~9.4	178~61.9	12.9~9.3	15.5~16.6	4.36~4.63	4.23~4.24
0 - 90	1.39~1.38	5.9~5.9	~122.1	8.8~7.0	341~298	201~181	36.0~52.8	328~177	116~129	23.7~26.4	4.23~4.48	3.62~3.88

Austauschkap wird ggf. aus AKI und Ake kombiniert! - * = AKI zumindest anteilig eingegangen.

Analytik II Gehalte: Profil1_140_200 | Profil1_90_140 | Sats_L | Sats. Of.Sats. Oh | Sats. 00_05 | Sats. 05_10 | Sats. 10_30 | Sats. 30_60 | Sats. 60_90

Analytik II Physik: Profil1_30_60 | Profil1_60_90 | Sats. 00_05 | Sats. 05_10 | Sats. 10_30

Horizont-Ansprache I

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	LagDichte	GrobB %
007_Aeh (I)	mS	sehr_stark	gering	5
024_Ae (I)	mS	stark	gering	20
041_Bsh (II)	Sl3	sehr_stark	mitteldicht	50
099_Bv (II)	Sl3	mittel	mitteldicht	50

Horizont-Ansprache II (akt. GwStand: cm)

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	Hauptsubstrat	Stratigraphie
022_Ahe (keineAng..)	fS	mittel	GeschiebedeckLehmS.	Weichsel-Kaltzeit
030_Bh (keineAng..)	fS	stark	GeschiebedeckLehmS.	Weichsel-Kaltzeit
060_Bhv (keineAng..)	fS	schwach	GeschiebedeckLehmS.	Weichsel-Kaltzeit
110_Bv (keineAng..)	Su3	schwach	Moränenablagerung	Saale-Kaltzeit
190_Cv (keineAng..)	Su3	sehr_schwach	Moränenablagerung	Saale-Kaltzeit

** T2.2: einschichtig, unverlehmte silikatarmste Tal-/Schmelzwassersande, auch ± unverlehmte geschiebeführende Sande größerer Mächtigkeit

Typ 2: OB: unverlehmter Sand, UB: unverlehmter Sand/Kies (kiesig)

Klasse 1: OB: Kies und unverlehmter Sand, UB: Kies und unverlehmter Sand

Info Profil II: -

Info Humus II: außer an Satellit 2 Of und Oh morphologisch nicht unterscheidbar; Wurzelfilz im Gelände ausgeschlagen

Bewertung (nur BZE II-Wert)	sehr gering	sehr gering	gering	mäßig	mittel	mäßig hoch	hoch	sehr hoch	extrem hoch
-----------------------------	-------------	-------------	--------	-------	--------	------------	------	-----------	-------------

erzeugt mit ECO-RASTaman V1.125 am 20.04.2018 10:33:54, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand



(Fortsetzung Abbildung 1)

NI00463 HoheHeide, OstniedersächsischesTiefland

GK 3564000 / 5879000 Bund = 30125, Land_I = 125, Land_II = 463, EU = 147

Landkreis SolttauFallingb., FoA 685_WAL_Bispingen, TK2925, Privatwald

110m NN, West-Exposition, Neigung 5 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,4°C | 763mm (VZ=14,9°C | 335mm), 1980-2010: 9,1°C | 790mm (VZ=15,5°C | 336mm)

Kalkung: nein, keine

Pflanzenarten: 20 (Lage Vegetations-Parzelle normal)



Bodenvegetation II

Aufnahme: 26.07.2007	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	20	20.0
Unterstand	1	5	5.0
Strauch	4	10	11.0
Kraut (h=60cm)	12	80	126.0
Moos	3	40	nicht erhoben
30m-Kreis	4	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(1/1)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. AGr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
<i>Pinus sylvestris</i>	26.007.007		20.0		5.0	1.0		
<i>Picea abies</i>	26.004.001			5.0	5.0			
<i>Betula pendula</i>	34.001.001				0.5	0.5		
<i>Sorbus aucuparia</i>	80.028.002				0.5	0.5		
<i>Calluna vulgaris</i>	132.003.001	I.1-2				1.0		
<i>Carex pilulifera</i>	199.012.124	II.2a				0.5		
<i>Dryopteris carthusiana</i>	19.003.017	III.2				0.5		
<i>Dryopteris dilatata</i>	19.003.009	III.3				0.5		
<i>Erica tetralix</i>	132.001.004	IV.1-2a				0.5		
<i>Galium saxatile</i>	144.005.118	eIII.2				0.5		
<i>Trientalis europaea</i>	135.009.001	III.2				0.5		
<i>Vaccinium myrtillus</i>	132.018.006	II.1				70.0		
<i>Deschampsia flexuosa</i>	193.074.005	II.2a				50.0		
<i>Hypnum cupressiforme</i>	357.005.003	II.1					x	
<i>Pleurozium schreberi</i>	357.008.001	II.1					x	
<i>Polytrichum formosum</i>	385.005.002	II.2a					x	
<i>Frangula alnus</i>	103.004.001	IV.1-2a						x
<i>Quercus robur</i>	36.004.014							x
<i>Rubus fruticosus</i> ag.	080.009.076.DL							x
<i>Rubus idaeus</i>	80.009.007	02.II.3a						x

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm	Fe	Fe-Al	Al	Al-AT	AT	AT-Si	Si	Si-Ca	Ca
------------------------------	----	-------	----	-------	----	-------	----	-------	----

erzeugt mit ECO-RASTaman V1.125 am 20.04.2018 10:33:54, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

NI00549 Südheide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3572000 / 5839000 Bund = 30147, Land_I = 147, Land_II = 549, EU = -

Landkreis Celle, FoA 612_CE_Winsen/Aller, TK3326, Privatwald

60m NN, Südwest-Exposition, Neigung 2 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,8°C | 719mm (VZ=15,4°C | 321mm), 1980-2010: 9,5°C | 749mm (VZ=15,9°C | 319mm)

Kalkung: ja, 1; 1990=3t/ha

Stammzahl/ha: 210, Grundfläche: 11.8m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 90%, Pflanzenarten: 56

Plot-Info: - Störung II: keine

Info I: - Info II: -



Bestockung I - II

	I (22.07.1991)	II (13.12.2006)
Bestockungstyp	Kiefer>70	Kiefer>70
Bestandesstruktur	einstufig	einstufig
Kronenschluss	geschlossen;gedrängt	lückig
Mischungsform	Reinbestand	Reinbestand

Ertragskundliche Aufnahme II

Baumart	Anteil°	Alter°	BHD°	KrAnsatz°	Höhe°	ErKlasse°°	HBonität°°
	%	2007	cm	m	m	-	-
Kiefer n=13	100.0	50.0	27.4	11.9 (n=6)	18.2 (n=6)	1,6	26,7

erlaubte Probekreis-Erfernungen berücksichtigt

° = Oberschicht, °° = Oberschicht

Blatt-Gehalte II *

Baumart	Ca	Mg	K	P	C	N	C/N	BIMasse
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	-	g
Kiefer Nadeljg1	2.4529	1.1527	5.1003	1.2586	523.5500	17.0600	30.7	20.5
Kiefer Nadeljg2	3.6900	0.7467	4.8564	1.1824	537.3000	19.0400	28.2	16.4



1sch Ki-Reinbestand, 50j, ger Bh, gering differenziert; tw Hzw, ve schütter; streifen weiser (Breite 8m) Voranbau mit Bu und Dgl, 6j, Jungwuchs, Dgl ve mit Wipfelrockn od Verblßschäden; tw NV aus Ki, Sbi sowie ve Fi, 3-6j, Jungwuchs

* Bewertungsrahmen (Göttlein 2015)	unter Symptombegrenze	unter Normalbereich	im Normalbereich	über Normalbereich
------------------------------------	-----------------------	---------------------	------------------	--------------------

erzeugt mit ECO-RAST Aman V1.126 am 25.04.2018 11:11:32, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 2: Kurzportrait des BZE-Punktes 549 in der Südheide (Substratgruppe schwach verlebmtter Sand, gekalkt), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 2)

NI00549 Südheide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3572000 / 5839000 Bund = 30147, Land_I = 147, Land_II = 549, EU = -

Landkreis Celle, FoA 612_CE_Winsen/Alter, TK3326, Privatwald

60m NN, Südwest-Exposition, Neigung 2 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mitte: 1960-1990: 8,8°C | 719mm (VZ=15,4°C | 321mm), 1980-2010: 9,5°C | 749mm (VZ=15,9°C | 319mm)

Kalkung: ja, 1; 1990=3t/ha

Standortstyp: Polygon = liegt 2012 nicht vor Punkt = 42.3+2.2 t

Wasserhaushalt: mäßig/kaum_frisch (Mittelhang, Haupthang)

Trophie: mesotroph - Substrat/Lagerung*: T2.2 (Typ 2, Klasse 1)

Substratgruppe: schwachverlehnterSand (-)



Profil-Morphologie I - II

	I (22.07.1991)	II (14.12.2006)
Streuart	Nadelstreu	Nadelstreu
Humusform	typischerModer_feinhumusarm	typischerModer_feinhumusreich
Humusmenge/-horiz.	70.9t/ha [6.0cm], L~1.0, Of~4.5, Oh~0.5cm	118.0t/ha [5.7cm], L~0.7, Of~2.1, Oh~2.9cm
Bodentyp	Podsol-Braunerde	Braunerde-Podsol (..Podsol)
forstl. Bearbeitung	vollflächig>30cm	Streifenkultur

Boden-Analytik I ~ II

Tiefe	TRD(Fb)	GroBb	nFK	BasSättg	AustKap	AK Ca	AK Mg	AK K	Corg	C/N	pH(H2O)	pH(KCl)
cm	g/cm³	Vol%	(KA5)mm %	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	t/ha	-	(DIN-pH)	(DIN-pH)
Auflage	-	-	-	65.0-72.1	23.4-33.8	188.4-355.1	59.9-67.0	27.2-35.4	27.8-34.5	24.9-28.7	4.16-4.32	3.30-3.38
0 - 5	0.97-1.25	0.7-0.7	-11.9	7.0-39.5	30.4-36.1	23.2-163	7.0-64.4	10.5-18.0	18.1-30.9	26.9-28.1	3.95-4.18	3.27-3.18
5 - 10	1.21-1.12	0.7-0.7	-11.9	5.0-11.9	31.0-32.2	14.5-26.1	4.8-24.9	10.8-9.2	24.4-18.6	27.1-28.6	4.13-4.27	3.61-3.62
10 - 30	1.38-1.30	14.5-14.5	-39.3	2.7-9.3	96.3-90.5	18.9-64.1	5.7-44.3	25.8-29.8	51.2-56.6	24.1-27.1	4.32-4.67	4.00-4.09
30 - 60	1.45-1.45	13.5-13.5	-46.7	9.1-9.3	91.1-39.9	75.4-22.7	21.0-9.5	58.8-23.9	14.3-13.9	12.7-19.5	4.47-4.76	4.05-4.42
60 - 90	1.54-1.54	5.5-5.5	-17.0	22.9-35.5	73.7-152	297-795	0.0-119	52.9-74.9	12.7-5.2	15.0-20.7	4.89-4.74	4.45-4.51
0 - 90	1.42-1.42	9.6-9.6	-126.8	9.8-24.0	322-350	429-1071	38.6-262	159-166	121-125	21.3-26.1	4.44-4.63	3.97-4.04

AustauschKap wird ggf. aus AKI und AKe kombiniert - * = AKI zumindest anteilig eingegangen

Analýk II Gehalte: Prof01_140_200 | Prof01_90_140 | Sats_L,Sats_Of | Sats_Oh | Sats_00_05 | Sats_05_10 | Sats_10_30 | Sats_30_60 | Sats_60_90

Analýk II Physik: Sats_00_05 | Sats_05_10 | Sats_10_30

Horizont-Ansprache I

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	LagDichte	GroBb %
003_Ae (I)	Slu	schwach	gering	2
013_Ahe (I)	Slu	stark	gering	2
023_Bsh (I)	Slu	mittel	gering	2
050_Bv (I)	Slu	stark	gering	7
070_Cv (II)	Sl3	schwach	gering	4
099_C (II)	gS	keineWurzeln	sehr_gering	4

BZE II Profilgrube



Horizont-Ansprache II (akt. GwStand: cm)

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	Hauptsubstrat	Stratigraphie
011_Aeh (keineAn..)	Su2	schwach	GeschiebedeckLehmS.	Weichsel-Kaltzeit
023_Bh (keineAng..)	Su2	mittel	GeschiebedeckLehmS.	Weichsel-Kaltzeit
032_Bvs (keineAn..)	Su2	schwach	GeschiebedeckLehmS.	Weichsel-Kaltzeit
070_Bsv (keineAn..)	Su2	sehr_schwach	GeschiebedeckLehmS.	Weichsel-Kaltzeit
170_Bv (keineAng..)	mS	sehr_schwach	Schmelzwasserablage.	Saale-Kaltzeit
200_Cv (keineAng..)	fSms	keineWurzeln	Schmelzwasserablage.	Saale-Kaltzeit

** T2.2: einschichtig, unverlehmte silikatarmerste Tal-/Schmelzwassersande, auch ± unverlehmte geschiebeführende Sande größerer Mächtigkeit

Typ 2: OB: unverlehmter Sand, UB: unverlehmter Sand/Kies (kiesig)

Klasse 1: OB: Kies und unverlehmter Sand, UB: Kies und unverlehmter Sand

Info Profil II: -

Bewertung (nur BZE II-Wert)	sehr gering	sehr gering	gering	mäßig	mittel	mäßig hoch	hoch	sehr hoch	extrem hoch
-----------------------------	-------------	-------------	--------	-------	--------	------------	------	-----------	-------------

erzeugt mit ECO-RASTAmn V1.126 am 25.04.2018 11:11:32, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 2)

NI00549 SüdHeide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3572000 / 5839000 Bund = 30147, Land_I = 147, Land_II = 549, EU = -

Landkreis Celle, FoA 612_CE_Winsen/Aller, TK3326, Privatwald

60m NN, Südwest-Exposition, Neigung 2 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,8°C | 719mm (VZ=15,4°C | 321mm), 1980-2010: 9,5°C | 749mm (VZ=15,9°C | 319mm)

Kalkung: ja, 1: 1990=3t/ha

Pflanzenarten: 56 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)



Bodenvegetation II

Aufnahme: 09.07.2007	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	35	35.0
Unterstand			
Strauch	6	50	55.0
Kraut (h=100cm)	39	45	75.0
Moos	5	65	nicht erhoben
30m-Kreis	12	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(1/2)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. AGr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
<i>Pinus sylvestris</i>	26.007.007		35.0			0.5		
<i>Betula pendula</i>	34.001.001	:			2.0	0.5		
<i>Fagus sylvatica</i>	36.001.001				0.5	0.5		
<i>Prunus serotina</i>	80.035.018	:			5.0	0.5		
<i>Quercus robur</i>	36.004.014				0.5	0.5		
<i>Rubus idaeus</i>	80.009.007	02.II.3a			45.0	20.0		
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	26.002.001				2.0	0.5		
<i>Achillea millefolium</i>	169.058.024					0.5		
<i>Calamagrostis epigejos</i>	193.091.001	II.3a, IV.2-3				2.0		
<i>Calluna vulgaris</i>	132.003.001	I.1-2				0.5		
<i>Carex pitulifera</i>	199.012.124	II.2a				0.5		
<i>Dactylis glomerata</i>	193.026.001					0.5		
<i>Danthonia decumbens</i>	193.111.001					0.5		
<i>Digitalis purpurea</i>	154.017.002	02.II.2a				0.5		
<i>Dryopteris dilatata</i>	19.003.009	III.3				0.5		
<i>Fragaria vesca</i>	80.021.001	ell.3b				0.5		
<i>Galeopsis tetrahit</i>	151.010.008	2				0.5		
<i>Holcus lanatus</i>	193.083.001	:				0.5		
<i>Hypericum perforatum</i>	109.001.054					0.5		
<i>Hypochaeris radicata</i>	169.158.009					0.5		
<i>Juncus tenuis</i>	189.001.019					0.5		
<i>Lapsana communis</i>	169.177.001	:				0.5		
<i>Leontodon autumnalis</i>	169.159.004	:				0.5		
<i>Lolium perenne</i>	193.005.001					0.5		
<i>Mycelis muralis</i>	169.172.001	II.3b				0.5		
<i>Myosotis arvensis</i>	148.029.006					0.5		
<i>Plantago lanceolata</i>	163.001.020					0.5		
<i>Plantago major</i>	163.001.001					0.5		
<i>Poa nemoralis</i>	193.016.027	II.3a				0.5		
<i>Senecio sylvaticus</i>	169.096.062	:				0.5		
<i>Trifolium repens</i>	81.057.010					0.5		
<i>Vaccinium myrtillus</i>	132.018.006	II.1				1.0		

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm Fe Fe-Al Al Al-AT AT AT-Si Si Si-Ca Ca

erzeugt mit ECO-RAST-Aman V1.126 am 25.04.2018 11:11:32, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 2)

NI00549 SüdHeide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3572000 / 5839000 Bund = 30147, Land_I = 147, Land_II = 549, EU = -

Landkreis Celle, FoA 612_CE_Winsen/Aller, TK3326, Privatwald

60m NN, Südwest-Exposition, Neigung 2 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,8°C | 719mm (VZ=15,4°C | 321mm), 1980-2010: 9,5°C | 749mm (VZ=15,9°C | 319mm)

Kalkung: ja, 1: 1990=3t/ha

Pflanzenarten: 56 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)

**Bodenvegetation II**

Aufnahme: 09.07.2007	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	35	35.0
Unterstand			
Strauch	6	50	55.0
Kraut (h=100cm)	39	45	75.0
Moos	5	65	nicht erhoben
30m-Kreis	12	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(2/2)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. AGr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
Vaccinium vitis-idaea	132.018.004	I.1				0.5		
Valeriana officinalis ag.	166.004.001					5.0		
Taraxacum Sec. Ruderalia	169.173.030 DL					6.5		
Arctium minus	169.112.004					5.0		
Agrostis capillaris	193.087.019	II.2c				1.0		
Deschampsia flexuosa	193.074.005	II.2a				25.0		
Elymus repens	193.048.018					0.5		
Brachythecium nidabulum	315.001.019	e02					x	
Ceratodon purpureus	338.001.003						x	
Dicranum scoparium	334.011.017	II.1					x	
Hypnum cupressiforme	357.005.003	II.1					x	
Polytrichum formosum	385.005.002	II.2a					x	
Anthoxanthum odoratum	193.082.001	II.2b						x
Cirsium palustre	169.118.057	V.3-4						x
Comiza canadensis	169.009.001							x
Epilobium angustifolium	123.005.001	01.II.2c						x
Luzula campestris ag.	189.002.001							x
Molinia caerulea	193.113.001	IV.1-2a						x
Polygonum aviculare ag.	47.002.017							x
Salix caprea	31.001.041							x
Solanum dulcamara	152.010.007	VI.4-5						x
Sorbus aucuparia	80.028.002							x
Carex ovalis	199.012.027							x
Rumex acetosella	47.008.001							x

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm

Fe

Fe-Al

Al

Al-AT

AT

AT-Si

Si

Si-Ca

Ca

erzeugt mit ECO-RAST Aman V1.126 am 25.04.2018 11:11:33, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

NI00592 GeestMitte, Mittelwestniedersächsisches Tiefland

GK 3492000 / 5855000 Bund = 30164, Land_I = 164, Land_II = 592, EU = -

Landkreis Diepholz, FoA 258_Erdmannshausen-(D), TK3119, Landeswald

25m NN, West-Exposition, Neigung 2 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,8°C | 681mm (VZ=15,1°C | 304mm), 1980-2010: 9,4°C | 715mm (VZ=15,6°C | 317mm)

Kalkung: ja, 1: 1984=3t/ha

Stammzahl/ha: 150, Grundfläche: 21,9m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 40%, Pflanzenarten: 42

Plot-Info: - Störung II: keine

Info I: - Info II: -



Bestockung I - II

	I (30.05.1991)	II (22.11.2006)
Bestockungstyp	NadelMisch<30Lb	sonstNadel>70
Bestandesstruktur	stufig	zweistufig
Kronenschluss	gedrängt;locker	lückig
Mischungsform	stammweise_einzeln	gruppenweise

Ertragskundliche Aufnahme II

Baumart	Anteil*	Alter*	BHD*	KrAnsatz*	Höhe*	ErKlasse**	HBonität**
	%	2007	cm	m	m	-	-
Rotfichte n=2	13.3	103.0	53.8	12.9 (n=2)	29.0 (n=2)	2,8	28,1
Japaniärche n=12	80.0	98.0	39.7	19.2 (n=4)	28.1 (n=4)	2,9	
Weißtanne n=1	6.7	113.0	54.1	17.4 (n=1)	30.5 (n=1)	1,4	

erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

* = Oberschicht, ** = Oberschicht

Blatt-Gehalte II *

Baumart	Ca	Mg	K	P	C	N	C/N	BIMasse
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	-	g
Kiefer Nadeljg1	3.3570	0.6272	5.4086	1.5553	527.3400	20.2900	26.0	19.1
Kiefer Nadeljg2	4.1875	0.4412	3.8660	1.2490	535.3900	20.7700	25.8	19.4
Rotfichte Nadeljg1	5.5274	1.4142	4.7247	2.1914	509.3400	18.5000	27.5	5.8
Rotfichte Nadeljg2	7.9606	1.1795	4.7994	1.6360	510.0800	15.5600	32.8	4.9
Rotfichte Nadeljg3	7.9197	0.8895	4.7705	1.4475	510.6700	14.7500	34.6	7.1



Zsch JLä(82-112)-WTA(112)-F(97-102)-Ab-WTA u Fi trw-gw-ve Ki(152)-Dgl(82-97) u rd SB(97)-mtll-stark Bh-Dgl vorwöchig,Ki zurückbleibend,im UST-ve FI,WTA u JLä (2 5-35)-ger Bh,WTA aufholend,Bestandsteich (aus DF) im NO, trw-gw RBu aus NV, 5-15j

* Bewertungsrahmen (Göttelein 2015) unter Symptomgrenze unter Normalbereich im Normalbereich über Normalbereich

erzeugt mit ECO-RASTman V1.126 am 25.04.2018 11:58:34, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 3: Kurzportrait des BZE-Punktes 592 bei Syke (Substratgruppe Lösslehm, gekalkt), auslesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 3)

NI00592 GeestMitte, Mittelwestniedersächsisches Tiefland

GK 3492000 / 5855000 Bund = 30164, Land_I = 164, Land_II = 592, EU = -

Landkreis Diepholz, FoA 258_Erdmannshausen-(D), TK3119, Landeswald

25m NN, West-Exposition, Neigung 2 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8.8°C | 681mm (VZ=15.1°C | 304mm), 1980-2010: 9.4°C | 715mm (VZ=15.6°C | 317mm)

Kalkung: ja, 1: 1984=3t/ha

Standortstyp: Polygon = 37.4-.5.5 Punkt = 41.3+.5.5

Wasserhaushalt: frisch (Mittelhang, Haupthang)

Trophie: mesotroph - Substrat/Lagerung**: T5.5 (Typ 8, Klasse 3)

Substratgruppe: Löslehm (-)



Profil-Morphologie I - II

	I (30.05.1991)	II (16.01.2007)
Streuart	Blatt-NadelStreugemisch	Blatt-NadelStreugemisch
Humusform	typischerModer_feinhumusreich	typischerModer_feinhumusreich
Humusmenge/-horiz.	109.2t/ha [9.0cm], L~2.0, Of~5.0, Oh~2.0cm	99.4t/ha [6.2cm], L~1.6, Of~1.9, Oh~2.8cm
Bodentyp	Parabraunerde (mäßig_podsolig)	Parabraunerde-Pseudogley (schwach_podsolig)
forstl. Bearbeitung	keine	keine

Boden-Analytik I ~ II

Tiefe	TRD(Fb)	GroB	nFK	BasSättig	AustKap	AK Ca	AK Mg	AK K	Corg	C/N	pH(H2O)	pH(KCl)
cm	g/cm ³	Vol%	(KA5)mm ³ %	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	t/ha	-	(DIN-pH)	(DIN-pH)
Auflage	-	-	-	40.1-83.3	40.6-44.0	258.1-521.9	25.0-112.2	36.5-39.0	49.1-34.0	23.2-23.3	3.61-4.37	2.80-3.63
0 - 5	0.86-1.07	0.0-0.0	~16.5	8.9-43.3	37.5-58.3	44.2-327	6.0-95.7	16.1-22.4	13.5-26.4	26.2-25.6	3.76-4.12	3.04-3.23
5 - 10	1.15-1.34	0.0-0.0	~16.0	5.1-29.4	32.9-45.9	15.9-156	2.8-60.8	15.1-13.7	7.2-12.4	20.8-25.8	4.12-4.28	3.71-3.63
10 - 30	1.23-1.37	0.0-0.0	~62.0	5.6-12.3	88.4-99.9	32.5-65.6	7.8-74.1	63.5-52.5	18.0-24.9	18.3-21.1	4.24-4.49	4.07-4.12
30 - 60	1.22-1.22	0.0-0.0	~90.0	7.1-10.2	143-148	63.1-60.5	19.1-83.7	123-131	10.6-9.8	9.7-12.2	4.21-4.35	3.90-4.05
60 - 90	1.27-1.27	0.0-0.0	~84.0	8.0-8.7	185-176	61.1-49.4	55.1-72.8	177-185	7.3-4.6	9.9-8.6	4.25-4.28	3.88-3.93
0 - 90	1.21-1.27	0.0-0.0	~268.5	7.2-15.4	487-529	217-658	90.8-387	395-405	56.5-78.1	15.4-19.4	4.18-4.33	3.78-3.88

AustauschKap wird ggf. aus AKI und AKe kombiniert! -- * = AKI zumindest anteilig eingegangen.

Analytik II Gehalte: Prof01_140_200 | Prof01_90_140 | Sats_L,Sats_Of | Sats_05 | Sats_10_30 | Sats_30_60 | Sats_60_90

Analytik II Physik: Sats_00_05 | Sats_05_10 | Sats_10_30

Horizont-Ansprache I

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	LagDichte	GroB %
002_Ae (I)	Uu	schwach	gering	0
006_Aeh (I)	Uu	stark	gering	0
009_Ai (I)	Uu	mittel	mittelficht	0

Horizont-Ansprache II (akt. GwStand: cm)

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	Hauptsubstrat	Stratigraphie
003_Aeh (keineAn..)	Uu	stark	Löslehm	Weichsel-Kaltzeit
032_Sw-Bv (keine..)	Uu	mittel	Löslehm	Weichsel-Kaltzeit
060_Ai-Sw (keineA..)	Uu	schwach	Löslehm	Weichsel-Kaltzeit
110_Ai+Bt-Sdw (ke..)	Ut3	sehr schwach	Löslehm	Weichsel-Kaltzeit
140_Btv-Sdw (kein..)	Us	keineWurzeln	Beckenablagerung	Saale-Kaltzeit
200_Cv (keineAng..)	fS	keineWurzeln	Beckenablagerung	Saale-Kaltzeit



** T5.5: ein-/mehrschichtig, fluvial umgelagerte Sand-Löse >50cm mit Sandunterlagerung (a. verlehmt (tU.), a.einschicht. umgelag. Löse
Typ 8: OB: schwach verlehnte Sande, UB: schwach verlehnte Sande, (insgesamt auch mit Sandigüß und schluffig/schlückig)
Klasse 3: OB: schwach verlehmt Sand (auch schluffig/schlückig) und Lehm; UB: un- und schwach verlehnte Sande und Kiese

Info Profil II: -

Info Humus II: -

Bewertung (nur BZE II-Wert)	ext. gering	sehr gering	gering	mäßig	mittel	mäßig hoch	hoch	sehr hoch	extrem hoch
-----------------------------	-------------	-------------	--------	-------	--------	------------	------	-----------	-------------

erzeugt mit ECO-RASTMan V1.126 am 25.04.2018 11:58:34, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 3)

NI00592 GeestMitte, Mittelwestniedersächsisches Tiefland

GK 3492000 / 5855000 Bund = 30164, Land_I = 164, Land_II = 592, EU = -

Landkreis Diepholz, FoA 258_Erdmannshausen-(D), TK3119, Landeswald

25m NN, West-Exposition, Neigung 2 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,8°C | 681mm (VZ=15,1°C | 304mm), 1980-2010: 9,4°C | 715mm (VZ=15,6°C | 317mm)

Kalkung: ja, 1: 1984=3t/ha

Pflanzenarten: 42 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)



Bodenvegetation II

Aufnahme: 28.07.2007	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	3	70	85.0
Unterstand	4	30	36.0
Strauch	7	10	10.6
Kraut (h=50cm)	17	65	87.1
Moos	4	65	nicht erhoben
30m-Kreis	12	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(1/2)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. Agr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
Abies alba	26.001.006		30.0	10.0	3.0	0.5		
Pinus sylvestris	26.007.007		30.0					
Larix kaempferi	26.005.001		25.0					
Fagus sylvatica	36.001.001			3.0	3.0			
Picea abies	26.004.001			15.0				
Pseudotsuga menziesii	26.002.001			8.0				
Betula pendula	34.001.001	.			0.5			
Frangula alnus	103.004.001	IV,1-2a			0.5			
Prunus serotina	80.035.018	.			0.5			
Quercus robur	36.004.014				0.1			
Rubus idaeus	80.009.007	02.II,3a			3.0	20.0		
Circaea lutetiana	123.002.001	III,4a				0.5		
Dactylis polygama	193.026.003.DL	II,3c				0.5		
Dryopteris carthusiana	19.003.017	III,2				3.0		
Dryopteris dilatata	19.003.009	III,3				20.0		
Galium aparine	144.005.132	1				0.5		
Impatiens parviflora	98.001.003	02.II,3a				0.5		
Milium effusum	193.102.001	II,3a				2.0		
Oxalis acetosella	82.001.006	III,2				35.0		
Rubus fruticosus agg.	080.009.076.DL	..				0.5		
Sorbus aucuparia	80.028.002	.				0.5		
Tortilis japonica	129.102.003	.				0.1		
Trientalis europaea	135.009.001	III,2				0.5		
Urtica dioica	40.001.006	e01				2.0		
Deschampsia flexuosa	193.074.005	II,2a				0.5		
Ceratocarpus trivinculata	66.016.001	eII,2a				0.5		
Brachythecium rutabulum	315.001.019	e02					x	
Eurhynchium praelongum	315.004.006	..					x	
Polytrichum formosum	385.005.002	II,2a					x	
Scleropodium purum	315.011.003	.					x	
Acer pseudoplatanus	95.001.005	.						x
Athyrium filix-femina	18.001.001	III,3						x

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm: Fe, Fe-Al, Al, Al-AT, AT, AT-Si, Si, Si-Ca, Ca
 erzeugt mit ECO-RAST Aman V.1.126 am 25.04.2016 11:58:34, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 3)

NI00592 GeestMitte, Mittelwestniedersächsisches Tiefland

GK 3492000 / 5855000 Bund = 30164, Land_I = 164, Land_II = 592, EU = -

Landkreis Diepholz, FoA 258_Erdmannshausen-(D), TK3119, Landeswald

25m NN, West-Exposition, Neigung 2 gon, Klimastufe: planar

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,8°C | 681mm (VZ=15,1°C | 304mm), 1980-2010: 9,4°C | 715mm (VZ=15,6°C | 317mm)

Kalkung: ja, 1: 1984=3t/ha

Pflanzenarten: 42 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)

**Bodenvegetation II**

Aufnahme: 28.07.2007	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	3	70	85.0
Unterstand	4	30	36.0
Strauch	7	10	10.6
Kraut (h=50cm)	17	65	87.1
Moos	4	65	nicht erhoben
30m-Kreis	12	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(2/2)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. AGr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
<i>Carex piluifera</i>	199.012.124	II.2a						x
<i>Galeopsis tetrahit</i>	151.010.008	2						x
<i>Gallium saxatile</i>	144.005.118	eIII.2						x
<i>Holcus lanatus</i>	193.083.001							x
<i>Lolium perenne</i>	193.005.001							x
<i>Pteridium aquilinum</i>	15.001.001	eIV.1-2						x
<i>Stellaria alsine</i>	57.006.007							x
<i>Stellaria media</i> ag.	57.006.003							x
<i>Vaccinium myrtillus</i>	132.018.006	II.1						x
<i>Agrostis capillaris</i>	193.087.019	II.2c						x

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm

Pb	Fe:Al	Al	Al-AT	AT	AT-Si	Si	Si-Ca	Ca
----	-------	----	-------	----	-------	----	-------	----

erzeugt mit ECO-RASTMan V1.126 am 25.04.2018 11:58:35, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

NI00838 SüdHeide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3564000 / 5815000 Bund = 30519, Land_I = -, Land_II = 838, EU = 53

Landkreis Hannover, FoA ?, TK3525, unbekannt

61m NN, keine-Exposition, Neigung 0 gon, Klimastufe: keineAngabe

Klima-Mittel: 1960-1990: 8.7°C | 664mm (VZ=15.3°C | 310mm), 1980-2010: 9.5°C | 706mm (VZ=15.9°C | 320mm)

Kalkung: nein, keine

Stammzahl/ha: 260, Grundfläche: 19.1m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 20%, Pflanzenarten: 22

Plot-Info - Störung II: keine

Info I: (nicht im Kollektiv) Info II: möglicherweise bäuerlicher Torfstich



Bestockung I - II

	(keine BZE I)	II (17.11.2006)
Bestockungstyp		Kiefer>70
Bestandesstruktur		einstufig
Kronenschluss		locker
Mischungsform		truppweise

Ertragskundliche Aufnahme II

Baumart	Anteil*	Alter*	BHD*	KrAnsatz*	Höhe*	ErKlasse**	HBonität**
	%	2007	cm	m	m	-	-
Kiefer n=19	100.0	79.0	31.5	10.9 (n=5)	17.3 (n=5)	3.4	19.7

erlaubte Probekreis-Einfassungen berücksichtigt

* = Oberschicht, ** = Oberschicht

Blatt-Gehalte II *

Baumart	Ca	Mg	K	P	C	N	C/N	BIMasse
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	-	g
Kiefer Nadeljg1	3.6243	0.9619	4.3447	1.1926	526.0400	25.7100	20.5	20.8
Kiefer Nadeljg2	5.5416	0.6020	2.9806	1.0379	532.5200	32.2800	16.5	19.2



1sch Ki-MBI-Mb: aus Ki, 79 bzw 54 (-36Ki bzw -26MBI), ger-mittl Bh, n Hb mäß, n Dm deutl diff, Ki tw kurzsch, ve SA u od schütter, matwüchsig, MBI im S und SO truppwe ingem, ger diff, ve ust MBI, FI (Osten) u Ki, 25j; im Ust ve Trockn v Ki u SBI

Bewertungsrahmen (Götting 2015)	unter Symptommgrenze	unter Normalbereich	im Normalbereich	über Normalbereich
---------------------------------	----------------------	---------------------	------------------	--------------------

erzeugt mit ECO-RASTAm V1 126 am 25.04.2018 14:00:41, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 4: Kurzportrait des BZE-Punktes 838 im Oldborster Moor bei Großburgwedel (Substratgruppe organisch geprägte Standorte, ungekalkt), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 4)

NI00638 Südheide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3564000 / 5815000 Bund = 30519, Land_I = -, Land_II = 838, EU = 53

Landkreis Hannover, FoA ?, TK3525, unbekannt

61m NN, keine-Exposition, Neigung 0 gon, Klimastufe: keineAngabe

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,7°C | 664mm (VZ=15,3°C | 310mm), 1980-2010: 9,5°C | 706mm (VZ=15,9°C | 320mm)

Kalkung: nein, keine

Standortstyp: Polygon = liegt 2012 nicht vor Punkt = 31,3+,-I-V) IV2 R1

Wasserhaushalt: nass (Zentrallage, Tiefenbereich_eben_flächenhaft)

Trophie: mesotroph - Substrat/Lagerung**:(I-V) (Typ 14, Klasse 7)

Substratgruppe: organisch (-)



Profil-Morphologie I - II

	(keine BZE I)	II (22.05.2007)
Streuart		Blatt-Nadel-Streugemisch
Humusform		typischer Moder_feinhumusarm
Humusmenge/-horiz.		71 6t/ha [4,5cm], L~0.3, Of~3.9, Oh~0.3cm
Bodentyp		Übergangserdmoor (nicht_podsolig)
forstl. Bearbeitung		Rabatten

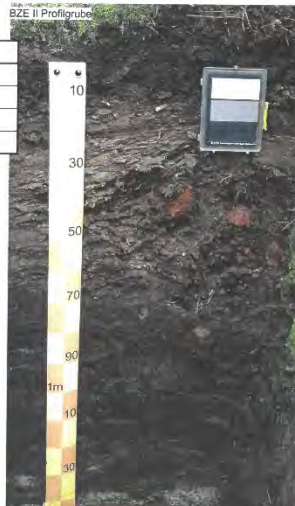
Boden-Analytik I ~ II

Tiefe	TRD(Fb)	GrobB	nFK	BasSättg	AustKap	AK Ca	AK Mg	AK K	Corg	C/N	pH(H2O)	pH(KCl)
cm	g/cm³	Vol%	(KA5)mm%	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	t/ha	-	(DIN-pH)	(DIN-pH)
Auflage	-	-	-	~47.4	~25.8	~193.6	~19.7	~25.7	~38.5	~25.2	~3.66	~2.79
0 - 5	~0.19	~0.0	~20.0	~27.6	~42.5	~193	~16.1	~16.9	~43.3	~29.8	~3.41	~2.41
5 - 10	~0.19	~0.0	~20.0	~23.2	~43.0	~165	~13.6	~8.3	~42.2	~37.8	~3.39	~2.32
10 - 30	~0.15	~0.0	~80.0	~23.1	~156	~592	~51.3	~23.5	~135	~44.0	~3.37	~2.34
30 - 60	~0.14	~0.0	~120.0	~22.8	~197	~691	~82.8	~20.4	~194	~44.8	~3.49	~2.46
60 - 90	~0.13	~0.0	~120.0	~32.9	~156	~809	~96.7	~23.1	~189	~36.1	~3.61	~2.61
0 - 90	~0.14	~0.0	~360.0	~25.9	~595	~2449	~261	~92.2	~603	~39.7	~3.48	~2.46

AustauschKap wird ggf. aus AKI und Ake kombiniert! — * = AKI zumindest anteilig eingegangen.
 Analytik II Gehalte: Prof01_140_170 | Prof01_90_140 | Sats_L | Sats_Of.Sats_0h | Sats_00_05 | Sats_05_10 | Sats_10_30 | Sats_30_60 | Sats_60_90
 Analytik II Physik: Prof01_30_60 | Prof01_60_90 | Sats_00_05 | Sats_05_10 | Sats_10_30

Horizont-Ansprache II (akt. GwStand: 60cm)

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	Hauptsubstrat	Stratigraphie
030_Hv (keineAng..)	Hh	mittel	Hochmoortorf	Holozän
090_Hr (keineAng..)	Hh	stark	Hochmoortorf	Holozän
140_Hr (keineAng..)	Hu	sehr_schwach	Niedermoortorf	Holozän
170_Gr (keineAng..)	Sl3	keineWurzeln	TerrassenFlussablager.	Weichsel-Kaltzeit



** (I-V): Moore
 Typ 14: Moore
 Klasse 7: Moore (Torf und verschiedene Substrate)

Info Profil II: -

Info Humus II: -

Bewertung (nur BZE II-Wert) extr. gering sehr gering gering mäßig mittel mäßig hoch hoch sehr hoch extrem hoch
 erzeugt mit ECO-RAST Aman V1.126 am 25.04.2018 14:00:41, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 4)

NI00838 SüdHeide, Ostniedersächsisches Tiefland

GK 3564000 / 5815000 Bund = 30519, Land_I = -, Land_II = 838, EU = 53

Landkreis Hannover, FoA ?, TK3525, unbekannt

61m NN, keine-Exposition, Neigung 0 gon, Klimastufe: keineAngabe

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,7°C | 664mm (VZ=15,3°C | 310mm), 1980-2010: 9,5°C | 706mm (VZ=15,9°C | 320mm)

Kalkung: nein, keine

Pflanzenarten: 22 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)



Bodenvegetation II

Aufnahme: 30.06.2007	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	50	50.0
Unterstand	4	40	44.0
Strauch	3	20	21.5
Kraut (h=50cm)	5	60	62.5
Moos	6	70	nicht erhoben
30m-Kreis	8	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(1/1)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. Agr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
Pinus sylvestris	26.007.007		50,0	0,5	1,0			
Betula pendula	34.001.001	.		0,5				
Betula pubescens	34.001.002			40,0	20,0	0,5		
Picea abies	26.004.001			3,0	0,5			
Sorbus aucuparia	80.028.002	.				0,5		
Vaccinium myrtillus	132.018.006	II.1				60,0		
Vaccinium uliginosum	132.018.005	V.1-2				1,0		
Deschampsia flexuosa	193.074.005	II.2a				0,5		
Dicranum polysetum	334.011.016	II.1					X	
Dicranum scoparium	334.011.017	II.1					X	
Hynum cupressiforme	357.005.003	II.1					X	
Pleurozium schreberi	357.008.001	II.1					X	
Polytrichum formosum	385.005.002	II.2a					X	
Scleropodium purum	315.011.003	.					X	
Dryopteris carthusiana	19.003.017	III.2						X
Frangula alnus	103.004.001	IV.1-2a						X
Glyceria fluitans ag.	193.042.008							X
Holcus lanatus	193.083.001	.						X
Juncus effusus	189.001.012	IV.2-3						X
Molinia caerulea	193.113.001	IV.1-2a						X
Rubus fruticosus ag.	080.009.076.DL	.						X
Rubus idaeus	80.009.007	02.II.3a						X

Trennararten bzgl. pH in 0-5cm	Fe	Fe-Al	Al	Al-AT	AT	AT-Si	Si	Si-Ca	Ca
--------------------------------	----	-------	----	-------	----	-------	----	-------	----

erzeugt mit ECO-RASTaman V1.126 am 25.04.2018 14:00:41, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

N100008 GöttingerWald, Mitteldeutsches Trias Berg-Hügelland

GK 3572000 / 5711000 Bund = 30004, Land_I = 4, Land_II = 8, EU = -

Landkreis Göttingen, FoA 179_Reinhausen, TK4426, Landeswald

390m NN, Nordost-Exposition, Neigung 15 gon, Klimastufe: (carbonathaltigerSO)

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,1°C | 726mm (VZ=14,4°C | 335mm), 1980-2010: 8,8°C | 761mm (VZ=15,3°C | 348mm)

Kalkung: nein, keine

Stammzahl/ha: 130, Grundfläche: 22.9m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 90%, Pflanzenarten: 35

Plot-Info: - Störung II: keine

Info I: - Info II: Windwurf und Rückeschäden



Bestockung I - II

	I (07.02.1990)	II (25.05.2007)
Bestockungstyp	Buche>70	Buche>70
Bestandesstruktur	einstufig	einstufig
Kronenschluss	geschlossen	geschlossen
Mischungsform	stammweise_einzeln	stammweise_einzeln

Ertragskundliche Aufnahme II

Baumart	Anteil [°]	Alter [°]	BHD [°]	KrAnsatz [°]	Höhe [°]	ErKlasse ^{°°}	HBonität ^{°°}
	%	2007	cm	m	m	-	-
Rotbuche n=12	92.3	119.0	48.0	18.5 (n=4)	35.4 (n=4)	1	32,4
Spitzahorn n=1	7.7	110.0	36.8	0.0 (n=0)	0.0 (n=0)		

erlaubte Probekreis-Erntefolgen berücksichtigt

[°] = Oberschicht, ^{°°} = Oberschicht

Blatt-Gehalte II *

Baumart	Ca	Mg	K	P	C	N	C/N	BIMasse
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	-	g
Rotbuche Blatt	11.3966	0.9644	10.5878	1.0137	517.8800	26.2200	19.8	15.8



tsch Bu-Best m st-trw Es, SAh u BUI, 119; mittl-st, ve ger (SAh/BUI) Bh, Bu n Hö maß
 , n Dm deutl diff; übw (bo), tw M- o Hzw, Kro ve eins o gek: Es maß diff, (bo)-bo; S
 Ah/BUI zurückbl/bo-(bo), ve drehwü, ve ust Bu/SAh, 35-50; Stg-ger Bh, deutl diff

* Bewertungsrahmen (Göttlein 2015)	unter Symptongrenze	unter Normalbereich	im Normalbereich	über Normalbereich
------------------------------------	---------------------	---------------------	------------------	--------------------

erzeugt mit ECO-RASTAm V1 126 am 25.04.2018 14:38:54, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 5: Kurzportrait des BZE-Punktes 8 im Göttinger Wald (Substratgruppe Kalkstein, ungekalkt), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 5)

N100008 GöttingerWald, MitteldeutschesTriasBerg-Hügelland

GK 3572000 / 5711000 Bund = 30004, Land_I = 4, Land_II = 8, EU = -

Landkreis Göttingen, FoA 179_Reinhausen, TK4426, Landeswald

390m NN, Nordost-Exposition, Neigung 15 gon, Klimastufe: (carbonathaltigerSO)

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,1°C | 726mm (VZ=14,4°C | 335mm), 1980-2010: 8,8°C | 761mm (VZ=15,3°C | 348mm)

Kalkung: nein, keine

Standortstyp: Polygon = 19.5+4.2t Punkt = 19.6.4.2 t l

Wasserhaushalt: frisch (Oberhang, Haupthang)

Trophie: karbonat-eutroph - Substrat/Lagerung**: B4.2 (Typ 29, Klasse 16)

Substratgruppe: Kalk (-)



Profil-Morphologie I - II

	I (07.02.1990)	II (27.06.2007)
Streuart	Blattstreu	Blattstreu
Humusform	F-Mull	typischerMull
Humusmenge/-horiz.	10.1t/ha [5.0cm], L~4.0, Of~1.0, Oh~0.0cm	9.4t/ha [3.9cm], L~3.4, Of~0.4, Oh~0.0cm
Bodentyp	TerraFusca	TerraFusca-Rendzina (nicht_podsolig)
forstl. Bearbeitung	keineAngabe	keine

Boden-Analytik I ~ II

Tiefe	TRD(Fb)	GrobB	nFK	BasSättg	AustKap	AK Ca	AK Mg	AK K	Corg	C/N	pH(H2O)	pH(KCl)
cm	g/cm³	Vol%	(KA5)mm %	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	t/ha	-	(DIN-pH)	(DIN-pH)
Auflage	-	-	-	92.9~98.0	4.6~6.2	72.8~104.3	4.7~7.5	9.4~10.0	3.2~4.2	26.3~29.2	5.42~5.47	4.89~5.17
0 - 5	0.85~0.79	1.8~1.8	~13.3	95.4~97.0	106~121	1890~2222	49.9~46.3	93.3~76.8	25.0~23.3	13.6~13.1	5.30~5.85	4.42~4.95
5 - 10	0.71~0.88	1.4~1.4	~12.3	48.1~97.9	58.3~117	1092~2200	28.1~32.	50.0~49.	12.9~16.7	11.5~12.6	5.07~6.19	3.94~5.34
10 - 30	0.91~0.76	3.4~3.4	~48.3	99.3~99.5	419~444	7950~8601*	145~110*	219~184*	48.0~63.2	11.9~12.6	5.99~6.81	4.89~6.48
30 - 60	0.88~1.50	68.0~68.0	~21.1	100~100	242~335	4723~6496*	39.5~68.	109~168*	11.0~28.3	8.7~13.3	7.33~7.76	6.50~7.14
60 - 90	1.50~1.50	85.0~85.0	~9.9	100~100	59.8~120	1136~2325*	15.9~21.	60.5~69.	4.3~10.2	17.3~15.5	6.08~8.09	7.32~7.40
0 - 90	1.08~1.26	51.9~51.9	~104.9	92.5~99.3	885~1137	16792~218.	278~281*	532~551*	101~142	11.9~13.0	6.00~6.80	4.94~6.01

AustauschKap wird ggf. aus AKI und AKe kombiniert! -- * = AKI zumindest anteilig eingegangen.

Analytik II Gehalte: Sats. L, Sats. Of | Sats. 00_05 | Sats. 05_10 | Sats. 10_30 | Sats. 30_60 | Sats. 60_90

Analytik II Physik: ProfI1_30_60 | Sats. 00_05 | Sats. 05_10 | Sats. 10_30

Horizont-Ansprache I

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	LagDichte	GrobB %
010_Ah (I)	Ut4	mittel	gering	0
040_Bv (I)	Ut4	stark	gering	3
065_Bv (I)	Ut4	stark	gering	7
066_Cv (II)	L12	schwach	mitteldicht	85

Horizont-Ansprache II (akt. GwStand: cm)

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	Hauptsubstrat	Stratigraphie
010_Ah (I)	Tu4	stark	Kalkgestein	Unterer_Muschelkalk
028_AhTBv (I)	Tu4	stark	Kalkgestein	Unterer_Muschelkalk
100_Cv (I)	Ut4	mittel	Kalkgestein	Unterer_Muschelkalk

** B4.2: Kalksteinverwitterungsboden_steinig_geringLfdfdecke

Typ 29: geringmächtige Kalksteinböden (<=20cm) mit geringem Feinbodenanteil
Klasse 16: Kalk und feinbodenarm

Info Profil II: -

Info Humus II: -



Bewertung (nur BZE II-Wert) sehr gering, sehr gering, gering, mäßig, mittel, mäßig hoch, hoch, sehr hoch, extrem hoch

erzeugt mit ECO-RASTAm V1.126 am 25.04.2018 18:35:55, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald-u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 5)

N100008 GöttingerWald, MitteldeutschesTriasBerg-Hügelland

GK 3572000 / 5711000 Bund = 30004, Land_I = 4, Land_II = 8, EU = -

Landkreis Göttingen, FoA 179_Reinhausen, TK4426, Landeswald

390m NN, Nordost-Exposition, Neigung 15 gon, Klimastufe: (carbonathaltigerSO)

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,1°C | 726mm (VZ=14,4°C | 335mm), 1980-2010: 8,8°C | 781mm (VZ=15,3°C | 348mm)

Kalkung: nein, keine

Pflanzenarten: 35 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)

**Bodenvegetation II**

Aufnahme: 25.04.2007	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	90	90.0
Unterstand	2	12	13.0
Strauch	3	85	100.5
Kraut (h=30cm)	21	55	100.2
Moos	4	1	nicht erhoben
30m-Kreis	10	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(1/2)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. AGr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
<i>Fagus sylvatica</i>	36.001.001		90.0	10.0	70.0	5.0		
<i>Acer platanoides</i>	95.001.001			3.0		0.5		
<i>Fraxinus excelsior</i>	139.004.003				30.0	25.0		
<i>Ulmus glabra</i>	37.001.001				0.5	0.5		
<i>Acer pseudoplatanus</i>	95.001.005					0.5		
<i>Allium ursinum</i>	183.038.039	III.5a				10.0		
<i>Anemone nemorosa</i>	61.014.001	II.3a				40.0		
<i>Anemone ranunculoides</i>	61.014.004	III.5a				10.0		
<i>Arum maculatum</i>	195.006.002	III.4b				0.5		
<i>Asarum europaeum</i>	44.001.001	II.5a				3.0		
<i>Carex sylvatica</i>	199.012.064	II.3b				0.5		
<i>Dryopteris dilatata</i>	19.003.009	III.3				0.5		
<i>Dryopteris filix-mas</i> ag.	19.003.001					0.1		
<i>Galium odoratum</i>	144.005.010	II.3b				0.5		
<i>Hordelymus europaeus</i>	193.058.001	II.5a,(ell.4)				0.5		
<i>Melica uniflora</i>	193.040.003	II.3b				0.5		
<i>Mercurialis perennis</i>	87.004.006	-				0.5		
<i>Polygonatum verticillatum</i>	183.046.001	II.3a				0.5		
<i>Prunus avium</i>	80.035.014					0.1		
<i>Viola reichenbachiana</i>	110.001.015	II.3b				0.5		
<i>Cardamina bulbifera</i>	68.040.001	ell.4				1.0		
<i>Atrichum undulatum</i>	385.001.004	II.3b					x	
<i>Brachythecium rutabulum</i>	315.001.019	e02					x	
<i>Brachythecium velutinum</i>	315.001.025	-					x	
<i>Hypnum cupressiforme</i>	357.005.003	II.1					x	
<i>Athyrium filix-femina</i>	18.001.001	III.3						x
<i>Brachypodium sylvaticum</i>	193.045.001	II.4						x
<i>Carex remota</i>	199.012.025	IV.3-4a						x
<i>Circaea lutetiana</i>	123.002.001	III.4a						x
<i>Dryopteris carthusiana</i>	19.003.017	III.2						x
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	87.007.103	II.5a						x
<i>Festuca altissima</i>	193.004.006	II.3a						x

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm

Fe	Fe-Al	Al	Al-AT	AT	AT-Si	Si	Si-Ca	Ca
----	-------	----	-------	----	-------	----	-------	----

erzeugt mit ECO-RASTMan V1.126 am 25.04.2018 14:38:55, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 5)

N100008 GöttingerWald, MitteldeutschesTriasBerg-Hügelland

GK 3572000 / 5711000 Bund = 30004, Land_I = 4, Land_II = 8, EU = -

Landkreis Göttingen, FoA 179_Reinhausen, TK4426, Landeswald

390m NN, Nordost-Exposition, Neigung 15 gon, Klimastufe: (carbonathaltigerSO)

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,1°C | 726mm (VZ=14,4°C | 335mm), 1980-2010: 8,8°C | 761mm (VZ=15,3°C | 348mm)

Kalkung: nein, keine

Pflanzenarten: 35 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)



Bodenvegetation II

Aufnahme: 25.04.2007	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	90	90.0
Unterstand	2	12	13.0
Strauch	3	85	100.5
Kraut (h=30cm)	21	55	100.2
Moos	4	1	nicht erhoben
30m-Kreis	10	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(2/2)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. AGr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
Galium sylvaticum	144.005.077	II.3c						x
Oxalis acetosella	82.001.006	III.2						x
Lamium galeobdolon ag.	151.012.001							x

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm	Fe	Fe-Al	Al	Al-AT	AT	AT-Si	Si	Si-Ca	Ca
------------------------------	----	-------	----	-------	----	-------	----	-------	----

erzeugt mit ECO-RASTAman V1.126 am 25.04.2018 14:38:55, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

3 Einleitung

3.1 Allgemeine Einführung zum Thema Boden

Uwe Paar, Jan Evers

Ohne die Böden der Erde könnte die Menschheit nicht ernährt werden. Dieser vielfältig belebte oberste Teil der Erdkruste ist die ökologische Lebensgrundlage zur Erzeugung von Nahrung und Energie und ist deshalb ein kostbares Gut. Auch im Wald, der in Deutschland zumeist die ursprüngliche Vegetationsform darstellt, sind die Böden die Grundlage für alles Leben. Sie stellen Lebensraum und Standorte für Lebensgemeinschaften und bilden zusammen mit Luftraum, Flora und Fauna das Waldökosystem.



Abbildung 6: Humoser Oberboden auf Kalk

3.1.1 Bodenbildung

Im Grenzbereich zwischen Atmosphäre und festem bzw. lockerem Gestein entstehen Böden als Teil der Biosphäre durch physikalische und chemische Prozesse (Verwitterung) sowie durch die Tätigkeit einer Vielzahl von Organismen. Böden setzen sich aus Mineralien unterschiedlicher Art und Größe sowie aus organischen Stoffen zusammen. Die räumliche Anordnung der Bodenteilchen erzeugt das Bodengefüge mit einem bestimmten Hohlräumssystem, das mit Bodenlösung (Wasser mit gelösten Salzen und Gasen) und Luft gefüllt ist. Die bodenbildenden

Prozesse stellen sich als dynamisches System dar, das in ständiger kleinräumlicher Entwicklung begriffen ist. Böden entwickeln sich aufgrund unterschiedlicher Ausgangsgesteine, Klimafaktoren und Relief sowie durch die Beeinflussung durch Bodenwasser, Vegetation, Tier und Mensch zu verschiedenen Bodentypen. Diese Faktoren sind durch Stofftransporte miteinander verknüpft und schaffen eine Vielzahl unterschiedlicher Böden. Erst eine bestimmte Kombination von Verwitterung, damit verbundener Nährstofffreisetzung, Hohlraumsystem, Bodenwasser sowie Bodenluft schafft die Grundlage für eine bestimmte Pflanzen- und Baumartenkombination (Waldgesellschaft) und die daran gebundene Fauna.

3.1.2 Funktionen der Böden

Böden dienen vielen pflanzlichen und tierischen Organismen als Lebensraum und Lebensgrundlage. Die physikalische Verankerung und die Versorgung von Pflanzen mit Wasser, Gasen und Nährstoffen hängen dabei von der Durchwurzelbarkeit der Böden sowie von der Leitfähigkeit für Flüssigkeiten und Gase ab. Als Bestandteil des Naturhaushalts spielen Böden aufgrund ihrer Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften eine zentrale Rolle als Speicher- und Transformationsmedium gegenüber einer großen Zahl von Umwelteinflüssen.

Waldböden stellen mit ihren vergleichsweise mächtigen humosen Schichten eine wichtige Senke für Kohlenstoff im globalen Kohlenstoffhaushalt dar. Die Kohlenstoffvorräte im Boden übersteigen die oberirdischen Speicher teils um das Doppelte (FAO 2006). Kohlenstoff kann dabei im Boden in carbonatisch und organisch gebundener Form (Humus, organische Substanz und Lebensgemeinschaften des Mineralbodens) vorliegen. Abgefallene Baumkompartimente (Blätter und Äste) und abgestorbene Wurzeln stellen die wichtigste Humusquelle dar. Sie werden von zahlreichen Bodenorganismen zersetzt und mineralisiert. Die Umsetzungsgeschwindigkeit ist dabei wiederum von den Faktoren der Bodenbildung abhängig und resultiert in unterschiedlichen Bodenhumusgehalten und -vorräten, wobei der Humusgehalt zumeist mit der Bodentiefe abnimmt (SCHACHTSCHABEL et al. 1998).

Darüber hinaus hat der weitgehend noch naturbelassene Waldboden eine bedeutende Funktion als Wasserspeicher und leistet so einen wichtigen Beitrag zur verestigten Wasserversorgung der Waldbestände. Informationen zur mengenmäßigen Erfassung und Verknüpfung von Niederschlag, Speicherwirkung und Transpiration gibt der Wasserhaushalt eines Gebietes (KÖLLING u. FALK 2010). In Abhängigkeit von Bodenart und -gefüge können die Folgen von Trockenperioden abgepuffert, Hochwasserspitzen gemildert und die stetige Nachlieferung von Grundwasser ermöglicht werden. Hohe Speicherwirkungen erzielen Böden mit hohen Lehm- und Schluffgehalten, während grobe Sande und Tone deutlich geringere Wassermengen speichern. Auch hohe Stein-(Skelett-)Gehalte vermindern die pflanzenverfügbare Wassermenge.

Böden können wertvolle natur- und kulturhistorische Archive darstellen, die es zu erfassen und zu erforschen gilt, bevor sie durch Nutzung oder dynamische Bodenentwicklung verloren gehen.

Die Lebensgrundlage des Menschen sichern Böden z. B. als Rohstofflager, als Nutzungsfläche für Siedlung und Verkehr, für die Land- und Forstwirtschaft sowie für Naturschutzbelange.

Ziel des deutschen Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBODSCHG 1998) ist es, all diese Bodenfunktionen zu sichern oder wiederherzustellen. Daraus leitet sich die Vorsorge zur Verhinderung schädlicher Bodenveränderungen ab.

3.1.3 Gefährdungen

Viele Jahrhunderte liefen in Waldböden ohne menschliche Nutzung eher langsame natürliche Prozesse ab, deren Dynamik Flora und Fauna durch Anpassung zu meist folgen konnten. Historische Waldnutzungen wie beispielsweise Köhlerei, Glashütten, Erzgewinnung oder Streunutzung führten teilweise schon zu starken Veränderungen der Waldböden. Besonders in den letzten Jahrzehnten veränderte jedoch eine Vielzahl von unterschiedlichen Umweltfaktoren (z. B. Stickstoff-, Säure- und Schwermetalleinträge) die Böden so schnell, dass die Anpassungsmöglichkeiten vieler Tier- und Pflanzenarten sowie von Standorten überschritten wurde. Aufgrund der langen Verweildauer von Schadstoffen und der Akkumulation in Böden können dadurch Schädigungen des Lebensraumes auftreten und die Bodenfunktionen erheblich beeinträchtigen. Schadstoffeinträge unterschiedlicher Quellen, die über Luft, Niederschläge oder auch Grund- und Oberflächenwasser auf die Waldböden einwirken, können zur Versauerung und zu einem daraus resultierenden Ungleichgewicht beim Nährstoffangebot sowie zur Kontaminierung mit toxischen Schwermetallen und organischen Schadstoffen (z. B. Lindan, Dieldrin) führen.

In versauerten Böden werden die *basischen Nährelemente* wie Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na) und Kalium (K) verstärkt von Säurekationen wie Aluminium (Al), Eisen (Fe), Mangan (Mn) und Protonen von den negativ geladenen Austauscherplätzen im Boden verdrängt und mit dem Sickerwasser aus dem durchwurzelten Boden ausgewaschen. Sie stehen somit nicht mehr zur Pflanzenernährung zur Verfügung. Auch eine übermäßige, nicht standortsangepasste Biomassennutzung kann auf einigen Standorten zum Nährstoffentzug und damit zu einer verringerten Basensättigung beitragen (GLATZEL 1991). Dies verschlechtert letztlich die Lebensbedingungen für Wurzeln und Bodentiere und damit auch die Bodenfruchtbarkeit (KÖLLING 2010).

Obwohl der *Stickstoff* (N) für Pflanzen einen lebensnotwendigen Nährstoff und erdgeschichtlich einen Minimumfaktor für die Pflanzenentwicklung darstellt, haben sich heute durch anthropogene Stickstoffeinträge viele Waldflächen zu mit diesem Element überversorgten Standorten entwickelt (ABER et al. 1989, EICHHORN 1995). Eine einseitig hohe Stickstoffversorgung kann zu einem Nährstoffungleichgewicht

und zu einer Eutrophierung des Bodens führen. Mit eintretender Stickstoffsättigung des Bodens können Pflanzen und Mikroorganismen die eingetragenen Stickstoffverbindungen nicht mehr vollständig aufnehmen. Sie werden mit dem Sickerwasser ausgewaschen, führen zu einer erhöhten Nitratbelastung des Grund- und Oberflächenwassers und gefährden damit die bisher weitgehend unbelastete Trinkwassernachlieferung aus dem Wald. Stickoxide als Verbrennungsprodukte fossiler Energieträger tragen als Säurebildner durch Pufferreaktionen zur Bodenversauerung bei und können ebenfalls zu einer Auswaschung von basischen Nährelementen führen. Insbesondere der luftbürtige Eintrag von Ammoniak, vor allem aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung stammend, fördert die Bodenversauerung, da bei der Pflanzenaufnahme von Ammonium die gleiche Menge an Protonen in die Bodenlösung geht (FALK u. STETTER 2010, KÖLLING et al. 2010b, PAAR 1994). Überhöhte Stickstoffeinträge können zur erhöhten Freisetzung des klimawirksamen und am Ozonabbau beteiligten Spurengases Distickstoffmonoxid (N_2O , Lachgas) führen (HAIDER 1996).

Bei den *Schwermetallen* muss zwischen essenziellen Schwermetallen wie Mangan (Mn), Kupfer (Cu) oder Zink (Zn), die erst in hohen Konzentrationen giftig wirken, und Schwermetallen wie Blei (Pb) oder Cadmium (Cd), die schon in sehr geringen Konzentrationen toxisch wirken können, unterschieden werden. Die Bodenkonzentrationen der jeweiligen Elemente sind vom geologischen Ausgangssubstrat, der Bodenbildung und von anthropogenen Einträgen, zumeist aus der Luft, abhängig. Für die Schädwirkung der jeweiligen Elemente, vor allem für die Einschätzung der Grundwassergefährdung, ist darüber hinaus das Lösungsverhalten von Bedeutung, welches durch die elementspezifische Bindungsstärke des Bodens bestimmt wird. Waldböden sind in der Lage, aufgenommene Schadstoffe zu filtern, zu speichern, umzuwandeln und abzubauen (SCHACHTSCHABEL et al. 1998). Da die Waldböden vergleichsweise naturbelassen und unbelastet sind, erfüllen sie eine wichtige Weiserfunktion für die Luftschadstoffbelastung (FIEDLER u. RÖSLER 1988). Durch eine zunehmende Versauerung könnten aber auch Schwermetalle in Lösung gehen und das Grundwasser belasten.

Eine weitere Gruppe von Schadstoffen, die über die Luftdeposition in die Böden gelangt, sind *persistente organische Stoffe*, sogenannte POP (Persistent Organic Pollutants). Zu dieser Gruppe gehören eine Reihe von zumeist in der Landwirtschaft ausgebrachten Bioziden, aber auch Nebenprodukte der chemischen Industrie und Produkte aus Verbrennungsprozessen. Sie besitzen eine nachgewiesene schädliche Wirkung auf den menschlichen Organismus und unterliegen deshalb weitgehenden Beschränkungen und Verboten (RIEK u. WOLFF 2007). Herbizide, Insektizide und Fungizide sind von Natur aus nicht in Böden enthalten. Ihrem Anwendungszweck entsprechend haben sie einen großen Einfluss auf den Organismenbesatz und damit auf die Eigenschaften und Nutzbarkeit der Böden. Die organischen Biozide können wie alle Stoffe in Böden gelöst, bewegt, gefällt, adsorbiert, desorbiert und chemisch und biologisch verändert oder abgebaut werden. Die jeweiligen Bodeneigenschaften

haben großen Einfluss auf die ablaufenden Reaktionen. Auch die Transformationsprodukte wirken teilweise noch immer biozid (SCHACHTSCHABEL et al. 1998).

Nicht an den Standort angepasste Erntetechniken oder unsachgemäß eingesetzte Maschinen können das Hohlraumsystem des Waldbodens durch Zusammenpressen der porenreichen Bodenkrume langfristig schädigen. Die so *verdichteten Böden* verändern ihre ökologische Funktionalität, wobei besonders die Bodenluft- und Wasserleitfähigkeit stark beeinträchtigt wird. Eine Verschiebung des Artenspektrums der Mikroorganismen in sauerstoffarme oder sogar anaerobe Bodenverhältnisse und eine verringerte Stressresistenz der Waldbestände gegen Trockenheit, Durchnässung und Sturm kann die Folge sein. Bereits entstandene Beeinträchtigungen lassen sich nur mit hohem Aufwand beheben; die natürliche Regeneration kann Jahrzehnte dauern (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Klimaveränderungen wirken sich wahrscheinlich auf den Kohlenstoff-, Stickstoff- und damit den gesamten Nährstoffhaushalt der Wälder aus. Dies betrifft sowohl den unbelebten wie auch den belebten Boden. Die vorhergesagte Klimaerwärmung und die Verminderung der Sommerniederschläge lassen überdies deutliche Änderungen (Verschlechterungen) im Wasserhaushalt der Böden erwarten. Es ist deshalb grundsätzlich von dynamischen ökosystemaren Standortentwicklungen auszugehen (KÖLLING u. FALK 2010).

Regelmäßige, flächenrepräsentative Bodenzustandserhebungen im Wald können zeitliche Veränderungen von indikativen Bodenkenngrößen erfassen und Gefährdungspotenziale aufzeigen. Auf der Basis dieser Untersuchungen und Ergebnisse sind Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenfunktionen ableitbar.

3.2 Geologische und bodenkundliche Verhältnisse in niedersächsischen Wäldern

Volker Stüber, Jan Evers, Uwe Paar

3.2.1 Einleitung

Naturnahe Böden zeichnen sich durch weitgehend unbeeinträchtigte Bodeneigenschaften aus. Sie sind in ihrem Profilaufbau, ihrer Struktur, ihren physikalischen und ihren chemischen Eigenschaften mittlerweile in Europa zwar auch anthropogen beeinflusst, aber nicht nennenswert entwässert oder neuzeitlich ackerbaulich genutzt worden. Zu erwarten sind naturnahe Böden im Bereich von Waldstandorten, vor allem in historisch alten Wäldern, die in den vergangenen 200 bis 300 Jahren kontinuierlich bis heute mit Wald bewachsen waren. An ihnen ist zumindest eingeschränkt nachvollziehbar, wie die Bodenfunktionen ohne anthropogene Überprägung ausgebildet sind bzw. sein könnten (Bodenleben, Stoffhaushalt, Bodenbildungsprozesse etc.).

Infolge intensiver Bodennutzung sind naturnahe Böden mit einer bodentypologischen Horizontabfolge eher selten geworden. Verstärkt wurden diese Veränderungen vor allem bezüglich der chemischen Bodeneigenschaften durch die durch Industrialisierung und Verbrennung fossiler Energieträger hervorgerufenen atmosphärischen Stoffeinträge. Waldstandorte sind hiervon besonders betroffen: meliorative Maßnahmen wie auf Ackerböden sind nicht gesetzeskonform, die Auskämmung von Schadstoffen durch Baumkronen hat den Stoffeintrag in die Waldböden im Vergleich zu Acker oder Weide begünstigt.

Die BZE im Wald in Niedersachsen erfasst beispielhaft u. a. die chemischen Zustände der Waldböden, um primär die Entwicklung der Böden unter sich ändernden Umweltbedingungen zu beschreiben. Das Kollektiv der BZE-Stichprobepunkte bildet somit die Entwicklung bzw. Beeinträchtigung der Waldböden Niedersachsens vor allem hinsichtlich der chemischen Veränderungen ab. Es ist aus statistischer Sicht nicht auf der Basis der vorkommenden Boden- oder Standortstypen und deren Varianten etabliert worden und ist somit auch nicht repräsentativ für diese.

3.2.2 Geologische und bodenkundliche Verhältnisse niedersächsischer Waldböden

Die Landesfläche Niedersachsens umfasst rd. 4,77 Mio. ha, davon sind ca. 1,2 Mio. ha bewaldet, was 25 % entspricht (BMEL 2014). Zur besseren Interpretation und Einordnung der Ergebnisse der BZE wird ein Überblick über die vielfältigen geologischen Verhältnisse und Böden der niedersächsischen Wälder gegeben.

Der niedersächsische Teil Norddeutschlands lässt sich im Wesentlichen in zwei große geologische Räume gliedern: Das mit eiszeitlichen Ablagerungen bedeckte

niedersächsische Tiefland und das aus den Gesteinen des Erdaltertums aufgebaute südniedersächsische Bergland.

Der pleistozäne Teil Niedersachsens trennt sich vom Berglandteil in etwa an der Linie der von Osten nach Westen verlaufenden Bundesautobahn A2 bzw. dem Mittellandkanal (nicht dargestellt), was ungefähr der Achse Braunschweig, Hannover und Osnabrück entspricht (s. Abb. 7).

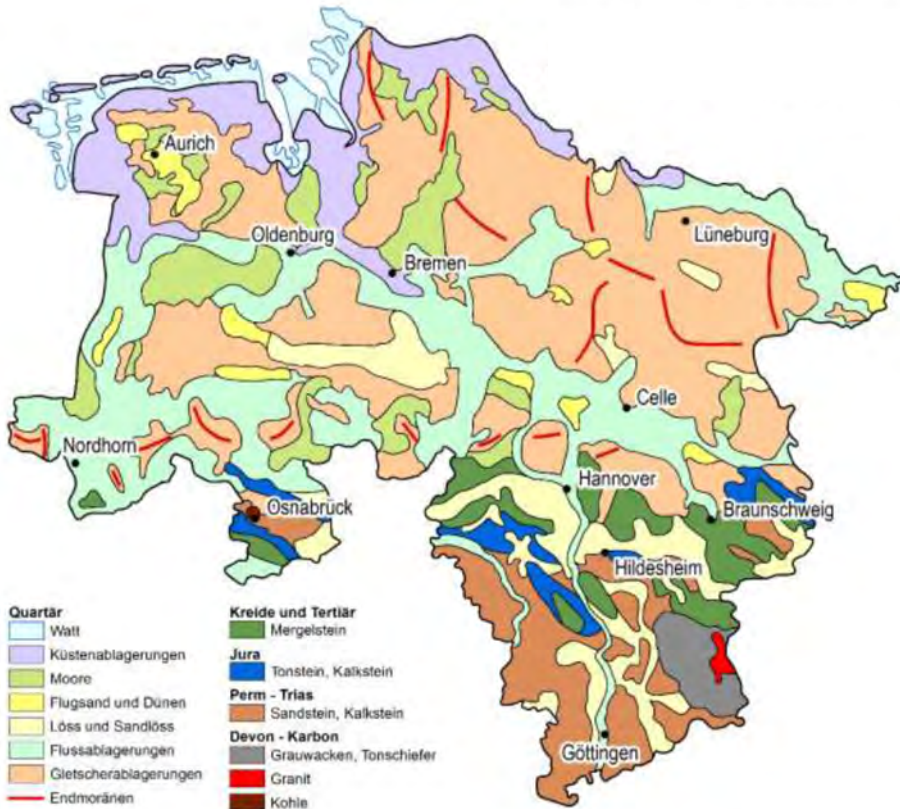


Abbildung 7: Geologische Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen (nach HEUNISCH et al. 2017, verändert)

3.2.3 Waldbauliche Gliederung Niedersachsens: Waldbauregionen und Wuchsbezirke

Zur Regionalisierung und Zusammenfassung waldbaulicher Gegebenheiten (Analysen, Planungen) ist Niedersachsen in Wuchsbezirke untergliedert, die wiederum zu Waldbauregionen zusammengefasst sind (s. Abb. 8). Der Wuchsbezirk ist ein Landschaftsbereich mit einem möglichst einheitlichen physiographischen Charakter.

Abgrenzungskriterien können sein: Klima, Ausgangssubstrate, Topographie, Vegetation, Landschaftsgeschichte und Geologie.

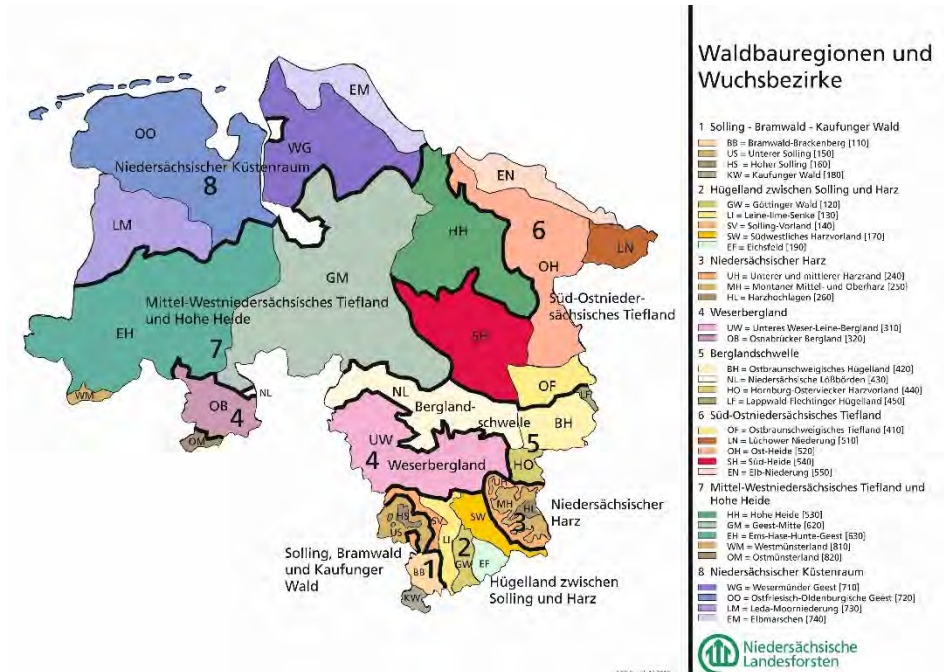


Abbildung 8: Forstliche Wuchsbezirke und Waldbauregionen in Niedersachsen (verändert nach: Nieders. Forstplanungsamt, Stand 2018)

3.2.3.1 Tiefland

Das niedersächsische Tiefland wird standörtlich in die drei Waldbauregionen Niedersächsischer Küstenraum (8), Mittel-Westniedersächsisches Tiefland (7) und Süd-Ostniedersächsisches Tiefland (6) unterteilt (s. Abb. 8).

3.2.3.1.1 Niedersächsischer Küstenraum

Lage und Oberflächengestalt

Der gering bewaldete niedersächsische Küstenraum umfasst die Wuchsbezirke Leda-Moorniederung, Ostfriesisch-Oldenburgische Geest, Wesermünder Geest und die Elbmarschen und wird von den Ablagerungen des Quartärs bestimmt. In dieser Zeit hat das Gebiet die Prägung seiner Geländemorphologie erfahren. Eine Besonderheit dieses Landschaftsteiles liegt darin, dass mit der großen Ausdehnung der Moore, der Marschen, dem breiten Wattengebiet und der Kette der Ostfriesischen Inseln auch Ablagerungen des Holozäns, d. h. der Nacheiszeit und der geologischen Gegenwart, eine wesentliche, im heutigen Erscheinungsbild der Rinnenlandschaft

prägende Rolle spielen. Die erste heute noch nachweisbare Formung hat das Küstengebiet durch die Elstervereisung erfahren, deren Ablagerungen fast durchgehend von mächtigen jüngeren, der Saale-Eiszeit zuzuordnenden drenthestadialen Schichten überlagert wurden.

Die eigentliche morphologische Prägung hat das niedersächsische Tiefland aber durch das Inlandeis des Drenthestadiums der Saale-Vereisung erhalten.

Die sogenannte „Rehburger Phase“ des Drenthestadiums hat im Küstenraum mit ursprünglich großflächig abgelagerten Grundmoränen das Ausgangsmaterial für die heute auf den Geestflächen und in den Übergangsbereichen anzutreffenden Bodenbildungen geliefert. Nachträglich wurden diese Grundmoränen durch Schmelzwasserrinnen wieder in einzelne Inseln oder Platten aufgelöst. Vom Ende des Drenthestadiums der Saalvereisung an blieb das Gebiet eisfrei und gehörte während des Warthe-Stadiums und der Weichsel-Kaltzeit zum Periglazialraum. Die stark zerstörenden, umlagernden und morphologisch ausgleichenden Kräfte des periglazialen Kälteklimas entfalteten auf den vegetationsfreien Flächen starke Wirkungen, sodass die Grundmoränenböden z. T. ihren Ton- und/oder Schluffgehalt verloren, das Feinmaterial häufig verblasen wurde und das Gebiet mit weithin gleichmäßig ausgebildeten Flugsanddecken überzogen wurde.

Die ehemals stärker eingetieften Niederungen der breiten Täler und schmaleren Rinnen sind vorwiegend durch äolische, aber auch durch fluviatile Verlagerungen und Ablagerungen so stark wieder aufgefüllt worden, dass heute der Eindruck einer großflächig ebenen Landschaft entsteht. Im Holozän vollzog sich neben der Rückkehr der Vegetation und der Herausbildung des typischen maritimen Klimas vor allem ein Anstieg des Meeresspiegels. Die aufschlickende Wirkung der vordringenden Nordsee schuf um die Geesthochflächen herum bis tief in die Urstromtalmündungen hinein den Gürtel der Marschen. In den Niederungen entstanden mit der binnenwärts fortschreitenden Vernässung weite Niedermoore. Die Regenfeuchtigkeit des maritimen Klimas führte dazu, dass sich, von den Niederschlägen gespeist und topographisch unabhängig, über weite Gebiete hinweg die mächtigen Decken der Hochmoore aufwölben konnten. So entstand die typische „Altmoränen-Landschaft“ mit Böden, die sich aus verschiedenen geologischen Schichten und stark gealterten Materialien entwickelt haben. Durch die lange Alterung und eine mehrfache, die Mineralien zerstörende äolische oder fluviatile Umlagerung haben sich überwiegend sandige und silikatarme Standorte gebildet, die zum Teil Mangel an Pflanzennährstoffen aufweisen und deren nutzbare Wasserspeicherkapazität eingeschränkt ist.

Geologie und Boden

Die Elstervereisung hat Beckenton als eine für die Landschaft sehr wesentliche fluvioglazigene Bildung hinterlassen. Der Beckenton wurde am Grunde eines großen, von Hamburg über Bremerhaven bis in den ostfriesischen Raum sich ausdehnenden Schmelzwasserstausees gebildet, in dem sich feinste Tontrübe der

Schmelzwässer abgesetzt hat. Als Ergebnis findet sich heute ein fetter, durch aufgearbeitetes Tertiärtonmaterial tiefschwarzer Ton, der nicht selten durch dunkel-schwärzliche und feinstsandige Schluffe abgelöst wird; stellenweise tritt auch Braunkohlensubstanz auf. Dieser, in den tieferen Unterböden einen Wasserstau und die Entstehung von Pseudo- und Stagnogleyen verursachende Leithorizont wird als „Lauenburger Ton“ bezeichnet und ist ein wichtiger Rohstoff für die Ziegelindustrie im Küstengebiet. Sande, Kiese und Moränenmaterial dieser Zeit finden sich vor allem in bis zu 500 Meter tiefen, einige Kilometer breiten und bis zu mehrere 100 Kilometer langen, nord-süd-verlaufenden Rinnen, die durch Tiefenerosion entstanden sind.

Während des Saale-Glazials kam es im Drenthe- und Warthe-Stadium zu drei bis fünf verschiedenen Vorstoßphasen, die im Bodenprofil häufig durch zwischengeschaltete Schmelzwassersande getrennt sind.

Im Küstenraum (s. Abb. 8: Waldbauregion Niedersächsischer Küstenraum) finden sich heute Bodentypen, die früher nachweislich sehr viel stärker von Grundwassereinflüssen geprägt waren. Es handelt sich um Podsole, Gleye, Pseudogleye und deren Kombinationen in unterschiedlichen Ausprägungen. Nur auf den Grundmoränenresten der Geestflächen konnten sich flächig vorkommende Braunerde-Podsole, Podsol-Braunerden, Pseudogleye und Mischformen aus diesen Bodentypen entwickeln. Die früher intakten Hochmoore waren in dieser Region überwiegend waldfrei.

Nach Rodung der ursprünglichen, nacheiszeitlich gebildeten Bestockungen ist die Degradation dieser von Natur aus schon armen Standorte sehr schnell fortgeschritten. Unter der vor- und frühgeschichtlichen Kultivierung hat sich aufgrund dieser Ausgangslage bald eine schroffe Differenzierung ergeben. Zwischen den weiter schnell verarmenden Großflächen, die der Plaggen- und Heidschnuckenwirtschaft unterlagen, befanden sich die kleinflächigen Ackernutzungen mit mittelalterlicher Plaggendüngung (Esch-Böden). Auf den Tonstandorten haben sich überwiegend Pelosole und Pseudogleye sowie Mischformen dieser Typen gebildet.

3.2.3.1.2 Mittel-Westniedersächsisches Tiefland und Hohe Heide

Lage und Oberflächengestalt

Das Mittel-Westniedersächsische Tiefland stellt den breiten Übergangsbereich zwischen dem atlantisch geprägten Küstensaum und den subatlantischen östlicheren Teilen des niedersächsischen Tieflandes dar. Es wird im Süden von den Lössböden sowie dem Osnabrücker Berg- und Hügelland in seiner westlichen Fortsetzung begrenzt.

Es umfasst die Wuchsbezirke Ems-Hase-Hunte-Geest, Geest-Mitte, Westmünsterland, Ostmünsterland und Hohe Heide. Es wird bis auf einen kleinen Teilbereich des Westmünsterlandes von den Ablagerungen des Quartärs beherrscht. Diese

Waldbauregion umfasst den Hauptraum der drenthestadialen Vereisung in Niedersachsen. Die aus den drenthestadialen Grundmoränen hervorgegangenen Geestlandschaften, in denen stellenweise noch elstereiszeitliche Bildungen in aufgearbeiteten Resten erkennbar sind, sind durch zahlreiche Urstromtäler (Weser-Aller) sowie durch kleinere Schmelzwasserabflussrinnen zu Rinnenplatten-Landschaften zerteilt. Die höchsten Erhebungen des Gebietes werden durch die Fürstenuer- und Dammer Berge mit 150 m ü. NN gebildet und in der Hohen Heide erreicht der Wilseder Berg sogar eine Höhe von knapp 170 m ü. NN.

Das Mittel-Westniedersächsische Tiefland stellt im Vergleich mit dem Niedersächsischen Küstenraum als mittlerer Teil des niedersächsischen Tieflandes ein Gebiet mit bereits abgeschwächter Atlantizität dar. Die Durchdringung des Gebietes mit den meistens von Nordwest nach Südost verlaufenden breiten Rinnensystemen, wie z. B. der Ems, der Hase, der Hunte und vor allem der Weser, stellen weite Öffnungsräume für das noch deutlich atlantische Klima dar.

Geologie und Böden

Der markante drenthestadiale Endmoränenzug der sogenannten „Rehburger Phase“ bildet mehr oder weniger deutlich die gesamte Südbegrenzung des Gebietes. Nach Abschmelzen des Eises, den nachfolgenden Periglazialphasen sowie im Holozän traten so starke Abtragungen auf, dass heute nur noch wenige landschaftsbestimmende Zeugenberge dieses Endmoränenzuges erhalten geblieben sind. Da es sich hierbei überwiegend um Stauch-Endmoränen handelt, finden sich in diesem Bereich als Ausgangsmaterialien für die Bodenbildungen mehr sandige als lehmig-tonige Substrate. Die aus den nördlich vorgelagerten Grundmoränen durch die tief eingeschnittenen Abflussrinnen herausmodellierten Lehmgesteinen haben mächtige, durch Entkalkung und Ausmagerung der ursprünglichen Mergel entstandene Geschiebelehmkerne. Diese stehen meistens erst in größeren Tiefen an, da das gesamte Gebiet großflächig Überlagerungen mit ärmeren Materialien, hauptsächlich durch Überwehungen erfahren hat. Am Rande der großen, das Gebiet meistens in Nordwest-Südost-Richtung zerschneidenden Talsysteme erfolgten großflächig Umlagerungen der von den Schmelzwässern abgelagerten, fein sortierten Terrassensande zu weiten Dünenfeldern. Auf den Geesthochflächen hingegen liegen auch unsortierte Schmelzwasser- und Geschiebedecksande, die nur einen dünnen Schleier von Flugdecksanden tragen.

Einige größere Gebiete, z. B. in den Räumen Syke, Sulingen, Bassum und Goldenstedt sind oberflächlich durch bis zu 150 cm mächtige Einwehungen eines feineren Schluffmaterials, des Sandlösses, geprägt, die zur Zeit der Weichsel-Vereisung abgelagert wurden. Neben den breiten Flussauen mit tonig-schllickigen Aueböden größter Fruchtbarkeit sind die Parabraunerden der Sandlössgebiete für Land- und Forstwirtschaft günstige Standorte.

Flächenmäßig überwiegen allerdings bei Weitem die Flugsand- oder Talsandbildungen mit und ohne Grundwassereinfluss. Entsprechend sind Podsole mit und

ohne Verbraunungen und Vergleyungen als die vorherrschenden Bodentypen des Gesamtgebietes zu verzeichnen. Lehmstandorte auf den stark gealterten und überwiegend bereits im Unterboden erheblich verdichteten Grundmoränen stellen sich bodentypologisch meistens als stark degradierte Braunerden mit deutlichen Podsolierungen im Oberboden dar. Erheblichen Anteil an der Gesamtoberfläche des Gebietes haben ehemalige Auswehungs- und Auswaschungsmulden und Niederungen, in denen sich im Holozän mächtige Moorflächen entwickelt haben. Als einzige nicht quartäre Bildungen sind die am Süd- bis Südwestrand in das Gebiet hineinragenden Verwitterungsmaterialien mesozoischer Sedimente, vornehmlich der Kreide, zu erwähnen (Westmünsterland).

3.2.3.1.3 Süd-Ostniedersächsisches Tiefland

Die Waldbauregion umfasst die Wuchsbezirke Süd-Heide, Ost-Heide, Elbniederung, Lüchower Niederung, Ostbraunschweigisches Tiefland und Lappwald-Flechtinger Hügelland.

Lage und Oberflächengestalt

Das Süd-Ostniedersächsische Tiefland umfasst alle ausschließlich oder überwiegend vom Pleistozän gebildeten Landschaften östlich einer Linie zwischen Hamburg-Harburg, Walsrode und Hannover. Die Westgrenze entspricht weitgehend dem Westrand der warthestadialen Endmoräne, die aber keinen Nord-Süd-, sondern eher einen Nordwest-Südost-Verlauf hat. Die Waldbauregion umfasst zugleich das Urstromtal des Warthestadials, nämlich die weite Allerniederung, etwa im Verlauf zwischen Gifhorn und Schwarmstedt.

Im Osten bildet der Verlauf der Elbe die nordöstliche, später dann die nördliche Abgrenzung des Wuchsgebietes bis nach Hamburg.

Durch die markanten Endmoränenzüge (bis 170 m ü. NN) und einige höhere Zeugenberge mit Höhen bis zu 95 m ü. NN einerseits und die tief eingeschnittenen Urstromtäler der Aller und der Elbe andererseits mit Höhen zwischen 30 und 40 m ü. NN ergibt sich für das pleistozäne Ostniedersächsische Tiefland eine standörtlich relevante Höhendifferenzierung. Abgesehen von den morphologisch herausragenden Endmoränenstaffeln handelt es sich jedoch im Übrigen vorwiegend um ein flachwelliges, von vielen Abflussrinnen zerteiltes Geestgebiet, das insgesamt der planaren bis untersten kollinen Stufe zuzurechnen ist.

Die Waldbauregion ist insgesamt subkontinentaler getönt als die anderen Waldbauregionen des Tieflandes. Der östlichste Wuchsbezirk, die Lüchower Niederung, gehört mit Jahresniederschlägen um 600 mm sowie deutlich verringerter Luftfeuchtigkeit bei höheren Sommertemperaturen bereits eher zum mitteldeutschen Trockengebiet und stellt einen der trockensten Bereiche Niedersachsens dar.

Geologie und Böden

Es ist davon auszugehen, dass die drenthestadial bereits weitgehend vorgeformte pleistozäne Landschaft während der letzten Vereisungsphase, die Niedersachsen erreicht hat, vorwiegend nur schwach überprägt wurde. Da nur kleinflächig ältere Ablagerungen aufgestaucht wurden, kann dieses Gebiet als im Wesentlichen warthestadial geprägt angesehen werden. Dies ist allerdings eine Einordnung, die für die südliche Hälfte des Aller-Urstromtales, und damit für den Südwest-Zipfel des gesamten Wuchsraumes mit drenthestadialen Bildungen nicht zutrifft.

Jüngere Materialien als die warthestadialen sind nur noch durch äolischen Transport hierher gelangt. Gebietsweise finden sich maximal zwei Meter mächtige, sandlössgeprägte Decken mit örtlicher Konzentration im Uelzener Becken und in den Harburger Bergen, die erst zur Ablagerung gekommen sind, als die Weichselvereisung östlich der Elbe ihre größte Ausdehnung erreicht hatte.

Als Ausgangsmaterialien für die bodenbildenden Prozesse überwiegen bei Weitem die sehr mächtigen, aber silikatarmen und unverlehmten Schmelzwassersande, die nur örtlich Einlagerungen von zerschwemmten Geschiebelehmen und -sanden aufweisen. Großflächig liegen Decken aus schwach verlehmten, noch stärker silikathaltigen Geschiebesanden den Schmelzwassersanden auf. Es haben sich hieraus Böden vom Typ der podsolierten Braunerden bis zu den restverbraunten Sekundär-Heidepodsolen entwickelt, in denen bei mäßigem Nährstoffangebot häufig die geringe Wasserkapazität der durchlässigen Sande der wuchsbegrenzende Faktor ist. Es ist keine Überschätzung, wenn man bei etwa 70 % der Gesamtfläche der Waldbauregion von den sogenannten „anthropogenen Oberbodenschädigungen“ ausgeht. Diese ehemals guten Waldböden sind durch die Nutzung zu armen Heidestandorten degradiert worden und unterscheiden sich heute nur wenig von den natürlich ärmeren Bildungen aus Tal- oder Schmelzwassersanden ohne Überdeckungen durch Geschiebesande.

Gegenüber diesen Standorten treten alle anderen nach Flächenanteil und Bedeutung zurück. Das gilt für die reicheren Hartholzauen längs der Urstromtäler ebenso wie für die Sandlöss-Komplexe, in denen man fast ausschließlich Parabraunerden aller Differenzierungen antrifft, die nicht selten bereits in die Parabraunerde-Pseudogleye übergehen. Durch die in den breiten Urstromtälern der Elbe und der Aller auf größerer Fläche abgesetzten Talsande mit sehr unterschiedlich hohen, in letzter Zeit fast überall schon deutlich abgesenkten Grundwasserständen müssen auch Podsol-Gleye, Anmoor-Gleye und Gley-Podsole als verbreitete Bodentypen erwähnt werden. Selbst Hochmoorbildungen kommen im früheren Überschwemmungsbereich von Elbe und Aller vor. Es überwiegen aber die reicheren Bruchmoore am Rande der Haupt- und Nebenflüsse, von denen der westliche Drömling im Südostzipfel des Wuchsgebietes das größte und bekannteste ist.

3.2.3.2 *Bergland*

Das Bergland hat wegen der stark unterschiedlichen Geologie und Landschaftsprägung eine große Varianz bezüglich der Bodenbildung und der vorkommenden Bodentypen. Die Beschreibung erfolgt deshalb in fünf getrennten Waldbauregionen (s. Abb. 8): Die Berglandschwelle (5) mit den Niedersächsischen Lössbörden, dem Ostbraunschweigischen Hügelland und dem Hornburg-Osterviecker Harzvorland, das Weserbergland (4) sowie der Harz (3). Die Waldbauregionen Solling – Bramwald – Kaufunger Wald (1) und Hügelland zwischen Solling und Harz (2) gehören zum großen Wuchsgebiet „Mitteldeutsches Trias-Berg- und Hügelland“.

3.2.3.2.1 Berglandschwelle

Lage und Oberflächengestalt

Zwischen der Großlandschaft des norddeutschen Tieflandes und dem eigentlichen Bergland erstreckt sich vom Weser-Tal im Westen (Landesgrenze nach Nordrhein-Westfalen) über die Räume Hannover, Hildesheim, Braunschweig bis zur Landesgrenze zu Sachsen-Anhalt im Osten ein schmaler Überleitungssaum, in dem dünne alteiszeitliche Überschiebungen oder mächtige Lössdecken den nahen Untergrund älterer geologischer Formationen mehr oder weniger vollkommen verhüllen. Diese sogenannte „Berglandschwelle“ (s. Abb. 8, Waldbauregion 5) folgt in ihrem nördlichen Grenzverlauf in etwa dem Mittellandkanal, springt jedoch im Nordosten, dem Lauf der Oker folgend, bis an das Allerurstromtal. Die Westgrenze deckt sich mit der Lössverbreitung, wie auch zwei Drittel des gesamten Gebietes, in der Erstreckung etwa von Minden bis Braunschweig, als typische Lössbörden-Landschaft zu bezeichnen sind. Einen etwas anderen Landschaftscharakter tragen die östlich vorgelagerten Wuchsbezirke des Braunschweiger Flach- und Hügellandes. Während im braunschweigischen Tiefland die vom Süden nach Norden in ihrer Mächtigkeit zunehmenden pleistozänen Decken die nährstoffreicheren Schichten des Kreide- und Jurauntergrundes nur noch wenig wirksam werden lassen, sind im Südostbereich des Braunschweiger Hügellandes die Lössbörden von mächtigen Schluffüberwehungen geprägt. Markante Höhenzüge, wie z. B. Lappwald, Salzgitter-Höhenzug, Elm und Asse sowie Oderwald durchschneiden diesen Bereich. Nur die höchsten Erhebungen dieser Bergrücken erreichen Höhen bis zu 320 m ü. NN und sind damit der kollinen bis submontanen Stufe zuzurechnen, während die weiten Lössbörden mit Höhen bis zu höchstens 80 m ü. NN in die planaren Stufe fallen.

Geologie und Böden

Auf den westlichen zwei Dritteln des Berglandschwellen-Saumes lagern so mächtige Lössdecken, dass die im Liegenden anstehenden Kreide-, Jura- und Keuper-Formationen Bodenbildungen und Baumwachstum kaum noch beeinflussen können. Die im östlichen Drittel des Gebietes aus der Lösslandschaft hervorgewölbten Rücken des Salzgitter-Höhenzuges, des Oderwaldes, der Asse und des Elms bestehen fast

durchgehend aus Muschelkalk mit unterschiedlich mächtigen, im Allgemeinen geringeren Lössdecken und Fließerden. Daneben spielen örtlich noch Jura-, Keuper- und Tondurchdringungen eine Rolle, auf denen sich zwar nährstoffreiche, aber meistens auch das Wasser hoch anstauende Decken gebildet haben, die als sogenannte „Minutenböden“ bezeichnet werden. Da die Lössdecken das im ganzen Gebiet prägende Oberbodenelement sind, haben sich fast überall typische Parabraunerden oder aber Merkmals-Parabraunerden entwickelt. Nur auf den flacheren Muschelkalk-Rücken sind im Unterboden Reste von Kalkstein-Braunlehmen und von Braunerde-Rendzinen, mitunter auch von typischen Rendzinen zu finden.

3.2.3.2.2 Weserbergland

Lage und Oberflächengestalt

Das Weserbergland schließt östlich an die Westfälische Bucht an. Dabei ragt es wie ein nach Nordwesten gerichteter Keil weit in das norddeutsche Flachland hinein. Die Höhenzüge des Teutoburger Waldes (Osning) und der Egge begrenzen das Gebiet im Westen, im Norden reicht es bis an die lössgeprägte Berglandschwelle und ist klar durch die Höhenzüge des Wiehen- und Wesergebirges, des Bückebergs und des Deisters begrenzt. Im Südwesten bildet der Unterlauf der Diemel etwa die südliche Grenze. Im Wesertal zieht diese Linie bis Holzminden nach Norden und schwenkt dort nach Osten. Die Ostgrenze des Wuchsgebietes wird durch den Harz und das nordwestliche Harzvorland gebildet.

Das Wuchsgebiet ist durch Berg Rücken bzw. -kämme, Täler und Mulden reich gegliedert, wobei sich Flüsse und Bäche z. T. tief eingetalt haben (u. a. Weser). Die Höhenspanne reicht von ca. 50 m ü. NN bis ca. 500 m ü. NN. Der überwiegende Teil des Gebietes liegt in Höhen zwischen 100 und 350 m ü. NN.

Geologie und Boden

Das Weserbergland zeigt im Gebirgsbau eine Untergliederung in geologische Großsättel und Großmulden, die wiederum in kleine und kleinste Sättel und Mulden unterteilt sind. Die Waldbauregion wird im Wesentlichen durch ein vielfältiges Mosaik aus mesozoischen Gesteinen von Kreide, Jura und Trias aufgebaut. Die Kreideformation tritt im Eggegebirge, in den Hauptzügen des Teutoburger Waldes und in der Hils-Mulde auf und zwar sowohl als basenarmer Sandstein (Unterkreide) als auch als Kalk und Mergel (Oberkreide). Das Wesergebirge, der Hils, Ith und Deister sind durch verschiedene Gesteine (u. a. Sand-, Tonsteine) des Jura geprägt, die alle mehr oder weniger basenreich ausgebildet sind. Sand-, Schluff- und Tonsteine des Keupers treten neben Gesteinen des Muschelkalkes und des Buntsandsteins überall in der Waldbauregion mehr oder weniger großflächig auf. Moränen der Saale-Eiszeit sind im nordwestlichen Teil bis in den Raum Lemgo/Hessisch Oldendorf weit verbreitet. Saaleeiszeitliche Kames (Sande, Kiese) finden sich im Raum Porta Westfalica und Rinteln. Diese Gesteine sind z. T. durch Reste alter Verwitterungsdecken, Fließerden oder durch pleistozäne Lössablagerungen, die weite

Flächen einnehmen, überdeckt. In den Auen größerer Flüsse (u. a. Weser, Leine, Werre) dominieren holozäne Flussablagerungen verschiedener Zusammensetzung.

Die Mannigfaltigkeit des geologischen Ausgangsmaterials bedingt eine Vielfalt vorkommender Böden. Auf carbonathaltigen Gesteinen haben sich Rendzinen, sehr selten auch *Terrae fuscae*, die oftmals flachgründig und steinig sind, und Übergänge zu basenreichen Braunerden entwickelt. Basenarme Braunerden, die z. T. podsolig sind, und Podsole sind dominierende Bodentypen auf Kreidesandsteinen. Auf Buntsandstein treten großflächig basenarme und auch basenreiche Braunerden auf. Dort, wo der Obere Buntsandstein bodenbildend ansteht, können auch Pelosole vorkommen. Parabraunerden haben sich großflächig auf Löss entwickelt. Über Grundmoränenmaterial treten oftmals z. T. ausgeprägte Pseudogleye auf, die aber auch in flachen Hangmulden mit Fließerden oder alten Verwitterungsdecken vorkommen können. Gleye unterschiedlicher Ausprägung kommen in den Bach- und Flussauen vor. Durch intensive Landnutzung in historischen Zeiten sind viele Böden anthropogen überprägt.

3.2.3.2.3 Harz

Lage

Der Harz als nördlichstes deutsches Mittelgebirge überragt, geologisch und morphologisch deutlich abgegrenzt, die ihn umgebenden Regionen. Er ist höhenzonal gegliedert, steigt v. a. am Nordrand auf kurzer Entfernung steil bis auf eine Höhe von 300 bis 400 m ü. NN auf und erreicht mit dem Brocken seine größte Höhe von 1.141 m ü. NN. Der größte Flächenanteil des Gebirges befindet sich in Sachsen-Anhalt. Ein bedeutender Anteil des Harzes gehört zu Niedersachsen (s. Abb. 8) und nur ein kleinerer Teil des Südharzes liegt in Thüringen.

Geologie und Oberflächengestalt

Der Harz ist eine in der Kreidezeit während der saxonischen Gebirgsbildung aus dem Untergrund herausgerissene Rumpfscholle des alten variskischen Faltengebirges. Dieses bereits in der Karbonzeit gebildete große Gebirge durchzog Mitteleuropa von Südwesten nach Nordosten. Noch im Erdaltertum (Perm) wurde das Gebirge abgetragen und eingeebnet, sodass auf der permischen Rumpffläche die variskisch streichenden, silurischen, devonischen und karbonischen Tonschiefer mit eingelagerten Diabasen sowie Grauwacken die Oberfläche bildeten. Die Granitplutone des Brockens und des Rambergs waren noch in der Tiefe verborgen. Auch der rotliegende Auerberg-Porphyr war eingeebnet. Nach Überlagerungen mit Schichten des Zechsteins und des Mesozoikums wurde in der saxonischen Gebirgsbildung der Harz als Scholle an langen, von Südosten nach Nordwesten verlaufenden Verwerfungen, der herzynischen Streichrichtung, mehrere tausend Meter nach oben gedrückt. Die Scholle wurde im Nordosten und Norden stärker angehoben und zum Teil auf das Vorland aufgeschoben, sodass die dort liegenden mesozoischen Schichten am Harzrand senkrecht gestellt und z. T. überfahren wurden.

Die auf der Harzscholle liegenden mesozoischen Schichten wurden bereits im Tertiär abgetragen und das Gebirge fast vollkommen eingeebnet (tertiäre Rumpfebene). Der weitere Aufstieg des Harzes an der Wende des Tertiärs zum Pleistozän mit einsetzender stärkerer Erosion formte den Harz zu seiner heutigen Gestalt.

Geologisch gliedert sich der Harz von Nordwesten nach Südosten in den in Niedersachsen liegenden Oberharz, in den in Sachsen-Anhalt liegenden Mittelharz und in den überwiegend in Sachsen-Anhalt und teilweise in Thüringen liegenden Unterharz.

Der Oberharz wird geologisch durch den Devon-Sattel geprägt, der sich zwischen Oker und Innerste erstreckt und aus unterschiedlich harten Sandsteinschichten besteht (Kahlebergsandstein). Die dieses Gebiet annähernd allseitig umfassende sogenannte „Oberharzer Kulmhochfläche“ setzt sich aus Tonschiefern und Grauwacken als verbreitetstes Gestein des Oberharzes zusammen. Die Kulm-Hochfläche wird vom Südwest-Rand her massiv vom Oberharzer Diabaszug durchbrochen. Dieser stellt sich als schmaler Sattel dar, der sich – teilweise stark zergliedert – quer durch das Gebirge zieht (Osterode-Altenau-Harzburg). In variskischer Streichrichtung verläuft einer der markantesten Bergrücken, der Acker-Bruchberg-Quarzitzug. Dieser bildet zusammen mit dem mächtigen Brockenmassiv als beherrschender Mittelpunkt eine deutliche Wasserscheide.

Der Granit des Brockenmassivs liegt mit dem größten Teil seiner Fläche im Mittelharz und nimmt mit seinem inneren und äußeren Kontakthof sowie seinen Ausläufern in die Täler von Oker, Ilse und Holtemme hinein eine zentrale Stellung ein. Der Granitpluton des Brockens, des Ramberges sowie des Auerberg-Porphyr sind die landschaftsbestimmenden Elemente des Mittelharzes. Eine Besonderheit des Mittelharzes stellt der Elbingeröder Komplex mit seinen devonischen Massenkalken, Keratophyr und Schalstein dar.

Die Harzscholle ist rundherum von einem mehr oder weniger breiten Band aus Zechstein umgeben und damit geologisch klar vom Vorland abgegrenzt. Der Zechstein macht sich vor allem durch Mineral- und Solequellen am Nordrand, durch Kalk- und Gipsablagerungen am Südrand und mit Kupferschiefer im Osten bemerkbar. So stellt sich heute der Harz geologisch als Gebirgshorst einer paläozoischen Rumpfscholle mit inneren variskischen Strukturen und äußeren herzynischen Konturen dar. Die Gletscher der Elsterkaltzeit überdeckten noch Teile des Unterharzes – die der Saalekaltzeit blieben jedoch am Gebirgsrand hängen. Von Osten dringen die für das Vorland der Hügellandregion typischen weichselkaltzeitlichen Lössdecken zungenartig in die flachen Täler der Osthärzer Abdachung ein. Eine weichselkaltzeitliche Eigenvergletscherung, vor allem der Tallagen des Oberharzes ist wahrscheinlich.

Die aufgrund der hohen Niederschläge anfallenden Überschusswässer werden z. T. in den höheren Lagen in Hochmooren festgehalten. Zum größten Teil werden sie in zahlreichen Harzflüssen bzw. -bächen direkt dem Harzrand zugeleitet und verursachen dort die starke Zertalung. Die langen Flusssysteme der Bode und Selke

verfolgen jedoch die Ostrichtung auf der allmählichen Abdachung. Dabei ändern sie, teils der herzynischen, teils den variskischen Linien folgend, mehrfach in z. T. tiefen Erosionstätern ihre Laufrichtung.

Böden

Für die Bodenbildungen waren besonders die weichselkaltzeitlichen, periglazialen Oberflächenprozesse bedeutsam. Durch Frostverwitterung, Solifluktion, Kryotur-bation und Flugstaubeinwehungen entstanden verschiedenartige unterschiedlich mächtige periglaziäre Deckschichten über bzw. aus den anstehenden Grundgestei-nen. Die großflächig im Granitgebiet des Brockens auftretenden Blockfelder bzw. -ströme sind von diesen Prozessen ebenfalls entscheidend beeinflusst.

Es überwiegen in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein schwach lehmige bis schluffig lehmige, mittel- bis tiefgründige Braunerden, die expositions- und ge-schichtsabhängig mehr oder weniger stark podsoliert sein können. Die Trophie-stufen reichen von gut (z. B. Diabas und Gabbro) über mittel (z. B. Grauwacken, Tonschiefer) bis hin zu schwach nährstoffversorgt (z. B. Quarzit, Sandstein).

Auf exponierten Oberhängen skelettreicherer und ärmerer Gesteine (Quarzit, Granit) sowie in den höher gelegenen, feuchtkühlen Lagen dominieren Podsole. In Wannern und hoch gelegenen Verebnungslagen haben sich kleinflächig Moore un-ter-schiedlicher Ausprägungen ausgebildet. Großflächigere Hochmoore finden sich im Oberharz im Bereich Niedersachsens sowie im Brockengebiet.

Hydromorphe Böden entstanden in Abhängigkeit von der Lage im Gelände: Gleye vorwiegend in Tallagen oder benachbart zu Mooren, Pseudogleye vor allem in höher gelegenen Verebnungslagen mit hohen Niederschlägen.

An den Steilhängen des Harzrandes, wie auch in den tiefen schluchtartigen Ero-sionstätern, besonders der Bode und Selke, sind Ranker und rankerähnliche Stein-schutt- und Felsbildungen, im Bereich des Brocken- und Okertalgranits sowie des Acker-Bruchberg-Quarzits sind auch Blockböden verbreitet.

Immissionsbedingte Boden- und Bestandesschäden sind vor allem am Harzrand in der Nähe der Industriegebiete (Goslar-Oker) zu beobachten. In den höheren Lagen sind erhebliche Bodenversauerungen, die den gesamten Durchwurzelungs-raum betreffen, feststellbar.

3.2.3.2.4 Mitteldeutsches Trias-Berg- und Hügelland

Lage und Oberflächengestalt

Das Wuchsgebiet als länderübergreifende Einheit erstreckt sich über Teile der Länder Niedersachsen, Hessen und Thüringen. Der niedersächsische Anteil umfasst den gesamten bergigen Landschaftsteil zwischen Weser und Harzrand (s. Abb. 8, Waldbauregionen 1, 2 und 4). In Thüringen bilden das Ohmgebirge und das Eichsfeld die nordöstliche, der Hainich-Dün-Komplex und die Waltershäuser Vorberge die östliche Begrenzung zum Thüringer Becken. In Hessen stellt die Hessische Senke im Westen, das Vogelsbergmassiv und die Rhön im Süden eine natürliche Grenze dar.

Während die Abgrenzung des Wuchsgebiets zum Harz durch seinen unvermittelt starken Anstieg aus dem Vorland sehr deutlich ist, sind die Übergänge zum nördlich angrenzenden Weserbergland sehr fließend. Die fast in Nord-Süd-Richtung verlaufende Leine-Ilme-Senke (östlicher Teil der Waldbauregion 2, Hügelland zwischen Solling und Harz) bildet eine auffällige Grenze in der Landschaft und unterteilt diese in eine westliche Hälfte mit Solling, Bramwald und Kaufunger Wald sowie in eine östliche Hälfte mit Göttinger Wald, Harzvorland und dem sich in Thüringen fortsetzenden Eichsfeld, das eine hügelige Landschaft darstellt. Als ein wesentlicher Landschaftsteil sind die tief eingeschnittenen Täler von Werra und Fulda sowie deren Nebenflüsse zu betrachten. Sie stellen mit ihren steilen Talhängen und zum Teil breiten Talauen eine reich bewegte Landschaft dar.

Geologie und Boden

Die ursprünglichen Lagerungsverhältnisse sind durch zahlreiche Verwerfungen, Grabenbrüche und Aufwölbungen unterschiedlichster Ursache weitgehend verändert. In den Waldbauregionen 1, 2 und 4 wird der geologische Untergrund hauptsächlich aus mesozoischen Sedimenten gebildet, wobei die Trias dominiert. Daneben sind an verschiedenen Stellen auch paläozoische Gesteine zu finden. So sind an der Aufrichtungszone vom Harz Zechsteinablagerungen mit herausgehoben worden. Die Bereiche östlich der Eichsfeldschwelle und zwischen Harz und Thüringer Wald gehören zur Thüringer Triasmulde, westlich der Eichsfeldschwelle schließt die hessische bzw. niedersächsische Triastafel an. Von den Sedimenten der Trias wiederum ist der Buntsandstein am häufigsten verbreitet. In bedeutendem Umfang findet sich Muschelkalk im Hainich-Dün-Komplex bis in das Eichsfeld hinein, im Ohmgebirge und in den Bleicheröder Bergen, im Ringgau und beiderseits des Leinegrabens. Der Keuper hat sich nur in Störungen, wie Grabenbrüchen oder in Einsenkungen, erhalten. Hierbei ist in Niedersachsen insbesondere der Leinegraben zu nennen. Flächenmäßig völlig belanglos, aber dennoch erwähnenswert, sind die Reste von Jura und Kreide, die sich ebenfalls nur in Grabenstrukturen erhalten konnten. Innerhalb des Leinegrabens und des Creuzburger Grabens haben sich Liasreste und im Leinefelder Graben Kreidereste erhalten. In Plateaulagen z. B. des Sollings, des Bramwaldes und des Kaufunger Waldes kommen als standörtliche

Besonderheit tertiäre kaolinitische Verwitterungsdecken vor. In Niedersachsen und in Nordthüringen haben die Lössablagerungen des Pleistozäns eine erhebliche flächige Bedeutung für die Bodenbildung. Die großen Flüsse wie Werra, Fulda und Leine hinterließen z. T. große, breite Talauen mit den entsprechenden alluvialen Sedimenten.

Auf den am weitesten verbreiteten Gesteinen, denen des Buntsandsteins, bildeten sich hauptsächlich sandige Braunerden mit mehr oder weniger Lösseinfluss, im Unteren Buntsandstein kommen auch Braunerden mit höherem Tonanteil vor. Ebenfalls Braunerden sind auf den Gesteinen der Culm-Grauwacken und den Konglomeraten des Rotliegenden zu finden. Hier sind podsolige Böden selten, Pseudogleye fehlen fast ganz. Die Braunerden weisen nur eine mittlere bis geringe Basensättigung auf. Durch die tertiäre Verwitterung bedingt, kommen aber als stark verdichtete Böden auf Buntsandstein großflächig Pseudogleye, Stagnogleye und sogar Anmoorgleye vor. Auf den Kalk- bzw. Gipssteinen des Muschelkalks und Zechsteins bildeten sich Rendzinen und verwandte Böden. Tragen die Kalksteine tonige Decken, insbesondere in verebneten Lagen, so sind *Terrae fuscae* anzutreffen. Auf dem den Muschelkalk umgebenden Röt und vielfach auf den Nodosentonen des Oberen Muschelkalks sowie auf den tonigen Sedimenten des Keupers sind Pelosole und Kalkpelosole zu finden. Auf kleiner Fläche vorkommende Basalte verwitterten hauptsächlich zu basenreichen Braunerden. Nicht so häufig, aber durchaus typisch, sind blockreiche Bildungen, die meist dem Ranker, seltener dem Syrosem zuzuordnen sind. Auf den Lössablagerungen bildeten sich vorwiegend Parabraunerden, die z. T. Tendenzen zur Pseudovergleyung aufweisen. In den Talauen sind Böden zu finden, die bodentypologisch als Vega eingeordnet werden.

3.2.4 *Forstliche Standorte in Niedersachsen*

Die lokalen geologischen Gegebenheiten und Bodengenese mit der Bestimmung von Bodentypen und anschließender ökologischer Interpretation sind wichtige Grundlagendaten zur Beschreibung der Böden von Waldstandorten. Zur fachlichen Nutzung dieser Informationen, unter anderem zur Bestimmung einer ökologisch-ökonomisch orientierten Baumartenwahl, werden im Rahmen der forstlichen Standortkartierung Standortstypen ausgeschieden, die die wachstumsrelevanten Faktoren auf lokaler Ebene zusammenfassen. Informationen zum Geländewasserhaushalt, zur Nährstoffversorgung sowie zu Substrat und Lagerung des bodenbildenden Ausgangsmaterials werden mittels des für Niedersachsen gültigen sogenannten „Geländeökologischen Schätzrahmens“ (NFP 2007, NFP u. LLUR 2009a+b) kartografisch dargestellt.

Die folgende statistische Auswertung der vorkommenden forstlichen Standorte basiert auf Daten des Landes- und Betreuungswaldes mit einer Größe von zusammen rd. 440.000 ha, wovon ca. 270.000 ha im Bergland und rd. 170.000 ha im Tiefland liegen. Insgesamt repräsentiert diese Auswertung 37 % der Waldfläche Niedersachsens. Es wurden Gruppierungen gebildet, die die Wasserhaushaltszahl, die Nährstoffzahl und die Substratzahl des forstlichen Standortstyps zusammenfassen. Diese Daten sind ein Ergebnis der forstlichen Standortkartierung, die nach dem Geländeökologischen Schätzrahmen für Niedersachsen, getrennt nach Tiefland (NFP u. LLUR 2009a) und Bergland (NFP 2007, NFP u. LLUR 2009b) ermittelt wurden. Die Angabe erfolgt in Prozent der jeweiligen Flächen im Tiefland und im Bergland.

3.2.4.1 *Wasserhaushalt*

3.2.4.1.1 Wasserhaushaltsgruppen im Tiefland

Rund 59 % der erfassten Tieflandstandorte unter Wald weisen grundwasserferne und stauwasserfreie Böden auf (s. Abb. 9 u. Tab. 1; Wasserhaushaltsgruppen (Grp.) 4, 5, 6 und 8). Bodentypologisch liegt der Schwerpunkt im Bereich von Podsolen und Braunerden sowie Mischformen dieser Bodentypen. 20 % sind Grundwasserstandorte, bei denen die Bäume Wasser in wurzelerreichbarer Tiefe vorfinden. Das Grundwasser steht hier in Tiefen an, die für die Ausweisung des Bodentyps nicht relevant sind, oftmals also nicht als Gley einzuordnen sind. Bei 5 % der Waldfläche des ausgewerteten Kollektivs handelt es sich um Moore unterschiedlichen Zustands bezüglich des aktuellen Wasserstands. Viele Moore sind nicht mehr wassergefüllt und unterliegen einem Abbau der organischen Auflage.

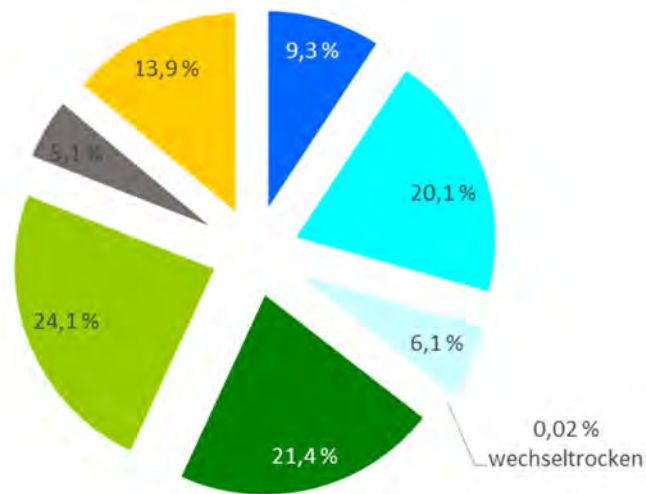


Abbildung 9: Anteile der Wasserhaushaltsgruppen im Tiefland Niedersachsens (Bezug: 170.000 ha, Landes- und Betreuungswald; Legende: s. Tab. 1)

Tabelle 1: Wasserhaushaltsgruppen und Bodentypen im Tiefland Niedersachsens

Gruppe nach Wasserhaushaltszahl	Bodentyp (überwiegend)
1 nass/staunass (32/33/36)	Gley, Pseudogley
2 grundfeucht bis grundfrisch (34/35)	Podsol / Braunerde
3 wechselfeucht (37f/38)	Pseudogley-Braunerde, Pseudogley
4 wechselfeucht (39)	Stagnogley
5 nachhaltig frisch bis frisch (40/41/37)	Braunerde-Podsol, Podsol
6 mäßig frisch bis trocken (42)	Braunerde-Podsol, Podsol
7 Moore (31)	Niedermoor / Hochmoor
8 sommertrocken (43/44)	Podsole

3.2.4.1.2 Wasserhaushaltsgruppen im Bergland

75 % der Berglandstandorte unter Wald weisen grundwasserferne und stauwasserfreie Böden in Hang-, Verebnungs- und Kuppenlagen auf (s. Abb. 10 u. Tab. 2; Grp. 5). 8,6 % sind in gleichen Geländelagen mäßig frisch bis trockene Bereiche (Grp. 6) und rund 8 % der Flächen befinden sich in Tallagen und haben häufig Grundwasseranschluss (Grp. 1, 2, 9). Staustandorte sind auf ca. 7 % der Fläche zu finden (Grp. 1 u. 3).

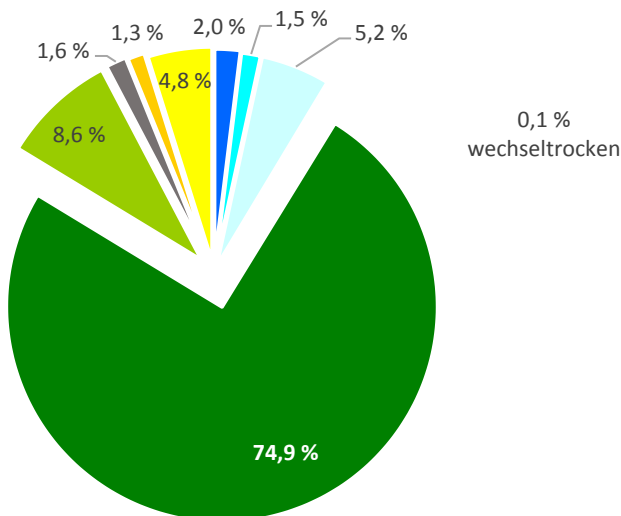


Abbildung 10: Anteile der Wasserhaushaltsgruppen im Bergland Niedersachsens (Bezug: 270.000 ha, Landes- und Betreuungswald; Legende: s. Tab. 2)

Tabelle 2: Wasserhaushaltsgruppen und Bodentypen im Bergland Niedersachsens

Gruppe nach Wasserhaushaltszahl		Bodentyp (überwiegend)
1	nass/staunass (5/6/15)	Gley und Pseudogleye
2	grundfeucht bis grundfrisch (7/8)	Gley und Kolluvium
3	wechselfeucht (13/17/21)	Hanggley / Pseudogleye
4	wechselfrisch (12)	Stagnogleye
5	nachhaltig frisch bis frisch (9/14/18/19/22/23/26f)	Braunerde, Parabraunerde
6	mäßig frisch bis trocken (10/20/24/26/28)	Ranker, Rendzina, Braunerde
7	Moore (16)	Nieder- bis Hochmoor
8	sommertrocken (26t/11/25/27/29)	Ranker, Rendzina, Braunerde
9	Täler (1/2/3/4)	Kolluvium, Alluvium, Hanggley

Die Berglandmoore sind im Vergleich zum Tiefland eher intakte Moore mit natürlichem Wasserhaushalt.

3.2.4.2 Nährstoffe

Die für die Baumartenwahl wichtige Nährstoffversorgung wird mit einem sechszahligen System verschlüsselt (von 1 = sehr schwach versorgt bis 6 = sehr gut versorgt). Diese Nährstoffzahl kann durch die Varianten „+“ und „-“ erweitert werden. Einzelne Nährstoffzahlen mit ihren Erweiterungen werden zu Nährstoffgruppen zusammengefasst (s. Abb. 11).

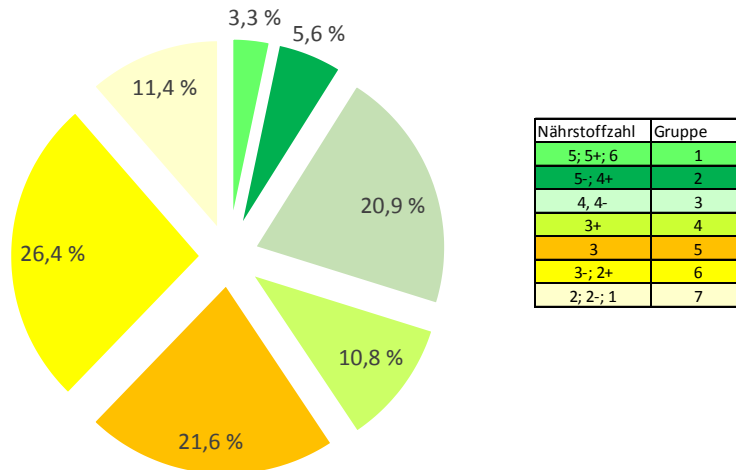


Abbildung 11: Anteile der Nährstoffgruppen im Tiefland Niedersachsens mit Zuordnung der Nährstoffzahlen (Bezug: 170.000 ha, Landes- und Betreuungswald)

3.2.4.2.1 Nährstoffgruppen im Tiefland

Rund 70 % der Waldfläche im Tiefland gehört zu den ärmeren Standorten mit einer Nährstoffzahl von 3 und kleiner. Geologisch bedingt und durch anthropogene Übernutzung handelt es sich bei den pleistozänen Substraten vielfach um Quarzsande, z. T. mit schwacher bis mittlerer Verlehmung, wodurch Nährstoffe nur noch in geringem Maße oder gar nicht mehr aus der Verwitterung des Mineralbodens freigesetzt werden können. Als Bodentypen haben sich hier Podsole gebildet.

Von den übrigen rd. 30 % der Fläche sind 9 % mit der Nährstoffzahl 4+ und besser belegt. Hier ist meist durch wurzelerreichbaren Geschiebelehm oder Geschiebemergel eine bessere Mineralausstattung und Nährstoffversorgung gewährleistet. Bodentypen sind hier überwiegend Braunerden, Podsol-Braunerden und Braunerde-Pseudogleye oder Pseudogleye. Diese Zweischichtböden mit ärmeren Decksanden und darunter liegenden mineralkräftigen Substraten unterschiedlicher Ausprägung sind ökologisch nur ganzheitlich auswertbar. Der Zeigerwert der Bodenvegetation in der Kraut- und Strauchschicht zeigt überwiegend deutlich ärmere Bedingungen an. Baumwurzeln mit ihrer Fähigkeit, auch Bodenschichten in 3 bis 4 Metern Tiefe

zu erschließen, profitieren von der tiefergelegenen besseren Wasser- und Nährstoffversorgung und reagieren mit höheren Wachstumsleistungen als die armen Oberböden vermuten lassen.

3.2.4.2.2 Nährstoffgruppen im Bergland

Rund 14 % der Waldfläche im Bergland gehört zu den ärmeren Standorten mit einer Nährstoffzahl von 3 und kleiner (s. Abb. 12). Geologisch bedingt sind in diesem Landschaftsbereich eher reichere Substrate vorhanden. Aus diesem Grund sind die Standorte mit einer Nährstoffzahl von 4+ und besser mit rund 41 % der Fläche vertreten, typisch sind hier Kalk- und/oder andere nährstoffreiche Substrate. Es überwiegen bodentypologisch Braunerden und Parabraunerden, die v. a. aus den lössbürtigen Substraten im Oberboden resultieren.

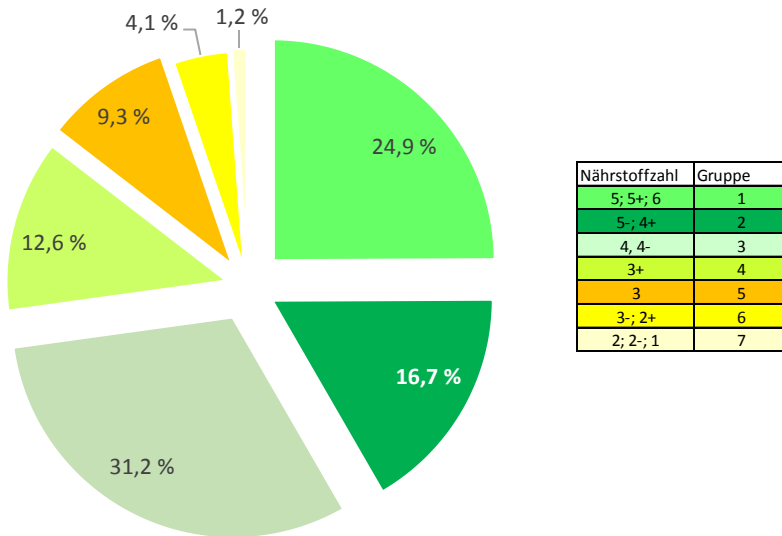


Abbildung 12: Anteile der Nährstoffgruppen im Bergland Niedersachsens mit Zuordnung der Nährstoffzahlen (Bezug: 270.000 ha, Landes- und Betreuungswald)

3.2.4.3 Substrate

3.2.4.3.1 Substrate im Tiefland

Die bodenbildenden Ausgangssubstrate im Tiefland sind zu 66 % unverlehmt oder schwach verlehmt Sande (Substratzahlen 1 und 2) (s. Abb. 13). Die unverlehmt Sande sind häufig mehrfach umgelagerte Sande verschiedener Ausprägung (Weh-

sande, unverlehmte, weil umgelagerte Geschiebedecksande, holozän wasser-
verlagerte Sande). Die Substratzahl 5 ist zu 17 % auf der Fläche vertreten. Es sind dies
holozäne, wasserverlagerte Substrate, die überwiegend aus unverlehmten Sanden
bestehen. Diese Standorte haben häufig einen Grundwasseranschluss, wobei das
Grundwasser und nicht das verwitternde Ausgangsgestein die Nährstoffversorgung
steuert. Hierdurch kommt zum Ausdruck, was auch die Nährstoffzahl wiedergibt:
Es handelt sich um mehrfach verlagerte, mineralarme Sande ohne Potenzial für eine
verwitterungsbedingte Nährstoffnachlieferung.

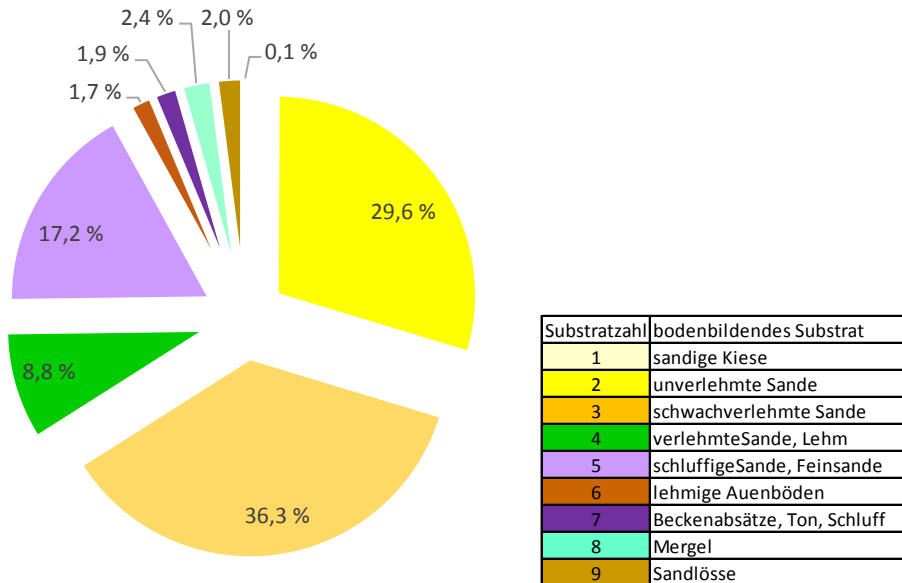


Abbildung 13: Anteile der Ausgangssubstrate im Tiefland Niedersachsens (Bezug: 170.000 ha, Landes- und Betreuungswald)

3.2.4.3.2 Substrate im Bergland

Einen Überblick über die bodenbildenden Substrate im Bergland Niedersachsens und deren Anteile gibt Abbildung 14. Im Bergland überwiegen bei den Waldböden im Oberboden lössbürtige Substrate und Böden mit mehr oder weniger starker Lössbeeinflussung. Die Zuordnung der Standorte zur Substratzahl gibt dies nur bedingt wieder, da lössgeprägte Oberböden bis zu 70 cm Mächtigkeit auf fast allen Standorten vorzufinden sind, ihnen wird allerdings dann die entsprechende Substratzahl, z. B. 4 für Kalk oder 2 für basenarme Substrate mit Lössüberdeckung zugeordnet. Auf diesen Böden dominieren bzgl. des Bodentyps Braunerden und Parabraunerden, die im Oberboden eher selten eine Podsolierung aufweisen.

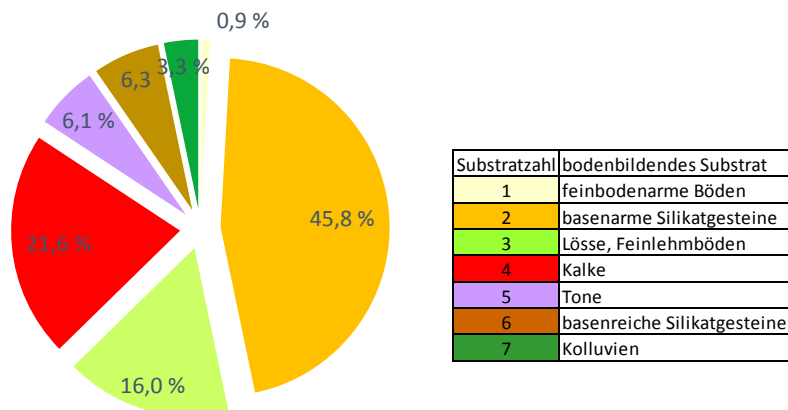


Abbildung 14: Anteile der bodenbildenden Ausgangssubstrate im Bergland Niedersachsens (Bezug: 270.000 ha, Landes- und Betreuungswald)

3.3 Forstliches Umweltmonitoring an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA)

Johannes Eichborn, Uwe Paar, Henning Meesenburg, Jan Evers, Birte Scheler, Nils König

3.3.1 Aufgaben

Die natürliche zeitliche Veränderung der Waldbestände, Managementmaßnahmen und vor allem biotische und abiotische Einflüsse der Umwelt führen zu Veränderungen in Waldökosystemen. Hinzu kommt, dass die Ansprüche der Gesellschaft an den Wald weit gefächert sind und gesellschaftliche Veränderungen widerspiegeln. Während noch vor wenigen Jahrzehnten der Kohlenstoffspeicherung in Waldböden keine besondere Bedeutung zugemessen wurde, erlangen heute der Kohlenstoffvorrat in Waldböden und seine Veränderung ein zunehmendes wissenschaftliches, politisches und wirtschaftliches Interesse. Waldfunktionen als Ausdruck der gesellschaftlichen Erwartungen können nur dann nachhaltig entwickelt und gesichert werden, wenn sie in ihrem Zustand und in ihrer Veränderung zahlenmäßig darstellbar sind.

Das Forstliche Umweltmonitoring leistet dazu einen wesentlichen Beitrag. Es erfasst mittel- bis langfristig Einflüsse der Umwelt auf die Wälder wie auch deren Reaktionen, zeigt Veränderungen von Waldökosystemen auf und bewertet diese auf der Grundlage von Referenzwerten. Die Forstliche Umweltkontrolle leistet Beiträge zur Daseinsvorsorge, arbeitet die Informationen bedarfsgerecht auf, erfüllt Berichtspflichten, gibt für die Forstpraxis Entscheidungshilfen und berät die Politik auf fachlicher Grundlage.

Die rechtliche Grundlage für die Walderhebungen im Forstlichen Umweltmonitoring stellt § 41a des Gesetzes zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz, BWALDG 1975) dar. Dies wird konkretisiert durch die Verordnung über Erhebungen zum Forstlichen Umweltmonitoring (FORUMV 2013) und durch das Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring (BMEL 2016).

Die Forstliche Umweltkontrolle geht ursprünglich von den Fragestellungen der Genfer Luftreinhaltekonvention (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE 1979)) aus. In deren Mittelpunkt stehen Belastungen der Gesellschaft und des Waldes durch Umweltveränderungen in Folge der Nutzung fossiler Energieträger, insbesondere im Hinblick auf die damit verursachten Säureeinträge. Die Methodik zur Erfassung der Säurebelastung geht dabei im Wesentlichen auf die Arbeit von Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Bernhard Ulrich (Göttingen) zur Bodenkunde und Waldernährung zurück (ULRICH et al. 1979). In der Folgezeit hat sich das Forstliche Umweltmonitoring als inhaltlich flexibel und breit angelegt erwiesen, um auch Informationen zum Stickstoffhaushalt, zur Kohlenstoffspeicherung und zu möglichen Risiken infolge des Klimawandels zu gewinnen.

Durch die Einbindung des Forstlichen Umweltmonitorings in Deutschland in das Europäische Waldmonitoring unter ICP Forests (Level I seit 1984, Level II seit 1994) und die Orientierung an den dort definierten Standards (ICP FORESTS 2010) ist ein hinsichtlich inhaltlicher Tiefe, räumlicher Repräsentanz, Langfristigkeit, Datenqualität und internationaler Vergleichbarkeit weltweit beispielhaftes Monitoringprogramm entstanden.

3.3.2 *Konzept*

Grundsätzlich werden im Forstlichen Umweltmonitoring waldfächenrepräsentative Übersichtserhebungen auf Rasterebene (Level I), die intensive Dauerbeobachtung ausgewählter Waldökosysteme (Level II) sowie Untersuchungen auf Experimentalflächen (Level III) unterschieden.

Das Konzept der NW-FVA umfasst folgende Monitoringprogramme, wobei einzelne Messflächen mehreren Programmen zugeordnet sein können:

- Level I (Übersichtserhebung)
- BDF (Bodendauerbeobachtungsprogramm)
- Level II (ICP Forests Intensive Monitoring Plots)
- Level II Core (Level II mit intensivierten Erhebungen)
- WÖSSH (Waldökosystemstudie Hessen)
- Experimentalflächen (Level III)

- An den *Level I-Punkten* werden folgende Erhebungen durchgeführt:
 - Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren (auf allen Stichprobenpunkten der Waldzustandserhebung (WZE) und der Bodenzustandserhebung (BZE)).
 - Auf den BZE-Punkten werden zusätzlich Baumwachstum, Nadel-/Blatternährung, Bodenvegetation und der morphologische, physikalische und chemische Bodenzustand untersucht. Auf dem BZE-Netz erfolgt zusätzlich eine Erhebung von Daten entsprechend der Bundeswaldinventur.
- Auf *Bodendauerbeobachtungsflächen* (BDF) werden langfristig standorts-, belastungs- und nutzungsspezifische Einflüsse auf Waldböden erfasst. BDF dienen als Referenzstelle und der Vorsorge für rechtzeitige Maßnahmen zum Schutz von Böden in ihrer Substanz und ihren Funktionen. Das BDF-Programm umfasst für forstlich genutzte Flächen folgende Erhebungen (HÖPER u. MEESENBURG 2012):
 - Chemischer und physikalischer Bodenzustand, Nadel-/Blatternährung, Baumwachstum, Bodenvegetation, Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren.
- Auf Intensiv-BDF werden zusätzlich Erhebungen zum Wasser- und Stoffhaushalt von Waldböden durchgeführt:
 - Deposition, Bodenlösung, Streufall, Meteorologie und Bodenhydrologie.
- Das Monitoring auf *Level II-Flächen (Standard)* umfasst nach der Modifizierung im Rahmen der ICP Forests Manualrevision 2010 folgende Erhebungen:
 - Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren, Baumwachstum, Nadel-/Blatternährung, Bodenvegetation, Deposition, Bodenzustand.
- *Level II Core-Flächen* sind eine Unterstichprobe der Level II-Flächen. Sie haben die Zielsetzung einer möglichst umfassenden Beobachtung. Neben den Erhebungen auf den Level II-Standardflächen sind hier folgende Erhebungen verpflichtend durchzuführen (ICP FORESTS 2010):
 - Streufall, Baumphänologie, Baumwachstum (intensiviert), Bodenlösung, Bodenfeuchte, Luftqualität, Meteorologie.
- Auf den Flächen der *Waldökosystemstudie Hessen* (WÖSSH) werden auf repräsentativen Standorten Waldökosystemzustände und -prozesse beobachtet, um Veränderungen von Waldfunktionen durch Umwelteinflüsse zu detektieren. Die Erhebungen auf WÖSSH-Flächen beinhalten folgende Indikatoren:
 - Deposition, Bodenlösung, Nadel-/Blatternährung, Baumwachstum, Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren, chemischer und physikalischer Bodenzustand sowie Bodenvegetation.

- Zu den *Experimentalflächen (Level III)* gehören Forsthydrologische Forschungsgebiete, Flächen zur Bodenschutzkalkung und zur Nährstoffergänzung sowie zur wasser- und stoffhaushaltsbezogenen Bewertung von Nutzungsalternativen.

Anhand von Übersichtserhebungen (Level I) können frühzeitig Entwicklungen und Störungen aufgezeigt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Als erfolgreiches Beispiel ist hier die Bodenschutzkalkung zu nennen, die im Waldboden wesentlich anthropogenen Säureeinträgen entgegenwirkt und zum Nährstoffhaushalt der Wälder positiv beiträgt. Das Intensive Monitoring ermöglicht einen detaillierteren Blick auf die Abläufe im Ökosystem, als es Übersichtserhebungen leisten könnten, und trägt somit wesentlich zum Verständnis der Entwicklungen bei. Im Falle von umweltpolitischen Maßnahmen ermöglicht das Forstliche Monitoring eine wirksame Kontrolle der Erfolge.

Die im Forstlichen Umweltmonitoring verwendeten Instrumente der Ökosystemüberwachung stehen europaweit harmonisiert nach den Grundsätzen des ICP Forests (Methoden: <http://icp-forests.net>; Manual: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>), der BDF-Arbeitsanleitung (BARTH et al. 2000), der BZE-Arbeitsanleitung (WELLBROCK et al. 2006) sowie des Handbuchs Forstliche Analytik (GAFA 2005, 2014) zur Verfügung. Qualitätssichernde und -prüfende Maßnahmen sind danach verbindlich vorgeschrieben. Sie garantieren die Qualität und die Nutzbarkeit der Ergebnisse.

Das Untersuchungsdesign der Forstlichen Umweltkontrolle in der NW-FVA für die Bereiche Level I, Intensives Monitoring (Level II) und Experimentalflächen (Level III) für die Länder Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt, Bremen und Schleswig-Holstein zeigen die Abbildungen 15 bis 17.

In Niedersachsen mit Bremen umfasst das Level I-Netz 272 Inventurpunkte, das Intensive Forstliche Umweltmonitoring 20 Monitoringflächen und 30 Experimentalflächen. Das niedersächsische Bodendauerbeobachtungsprogramm für Wälder fällt in die Zuständigkeit der NW-FVA, die niedersächsischen Bodendauerbeobachtungsflächen sind in Abbildung 16 mit dargestellt.

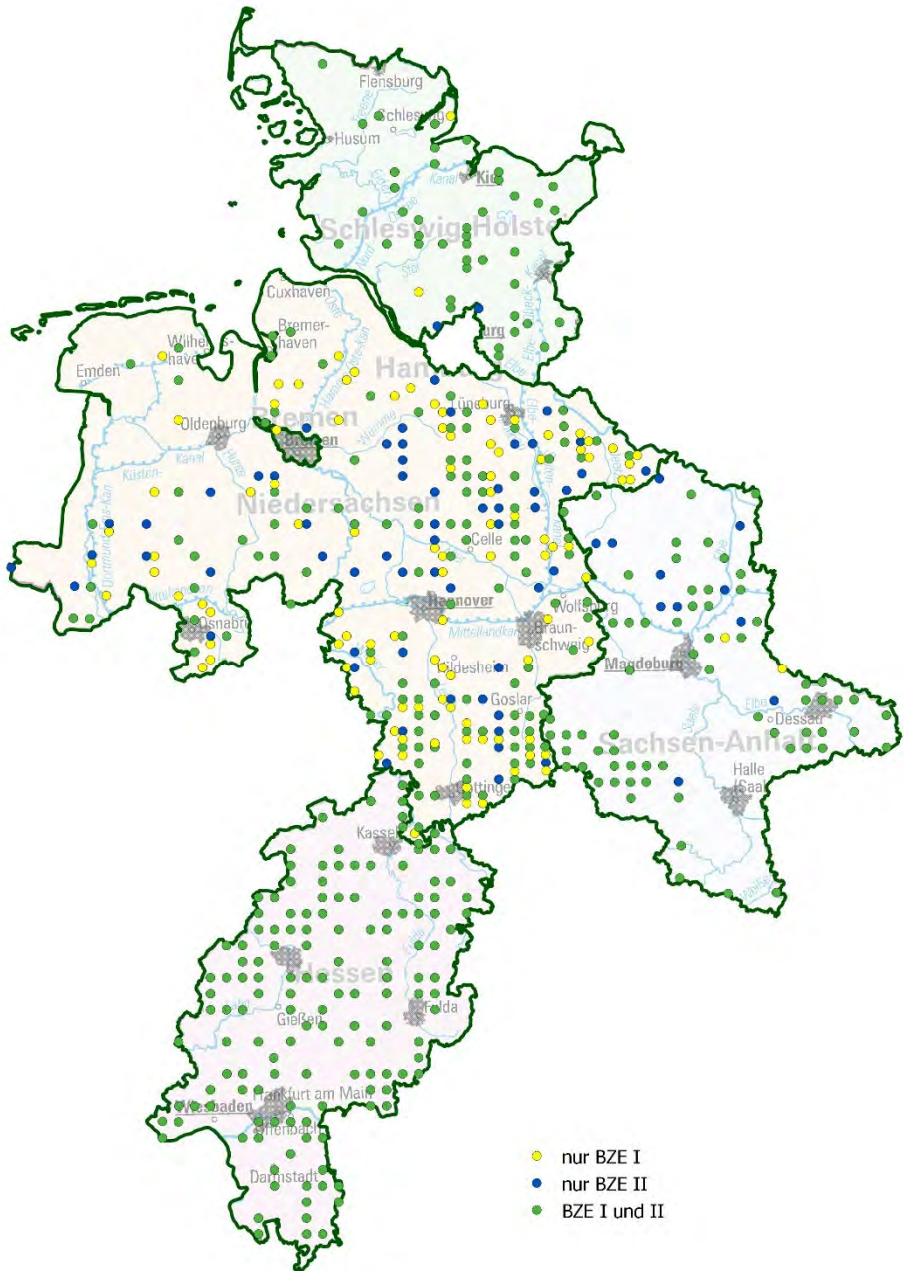


Abbildung 15: Lage der BZE-Punkte (Level I) in Niedersachsen und Bremen, Hessen, Sachsen-Anhalt, und Schleswig-Holstein

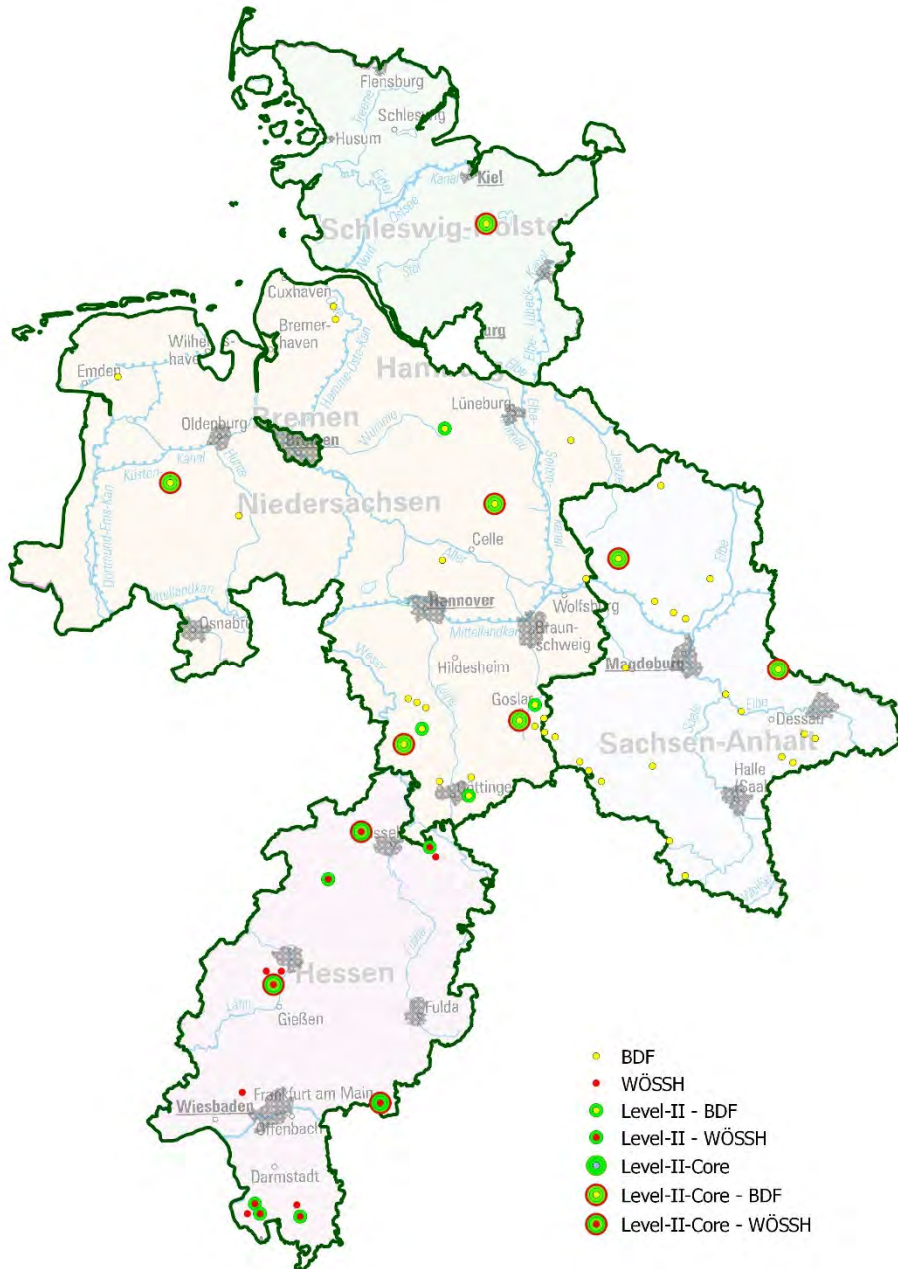


Abbildung 16: Lage der Flächen für das Intensive Monitoring in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (Level II)

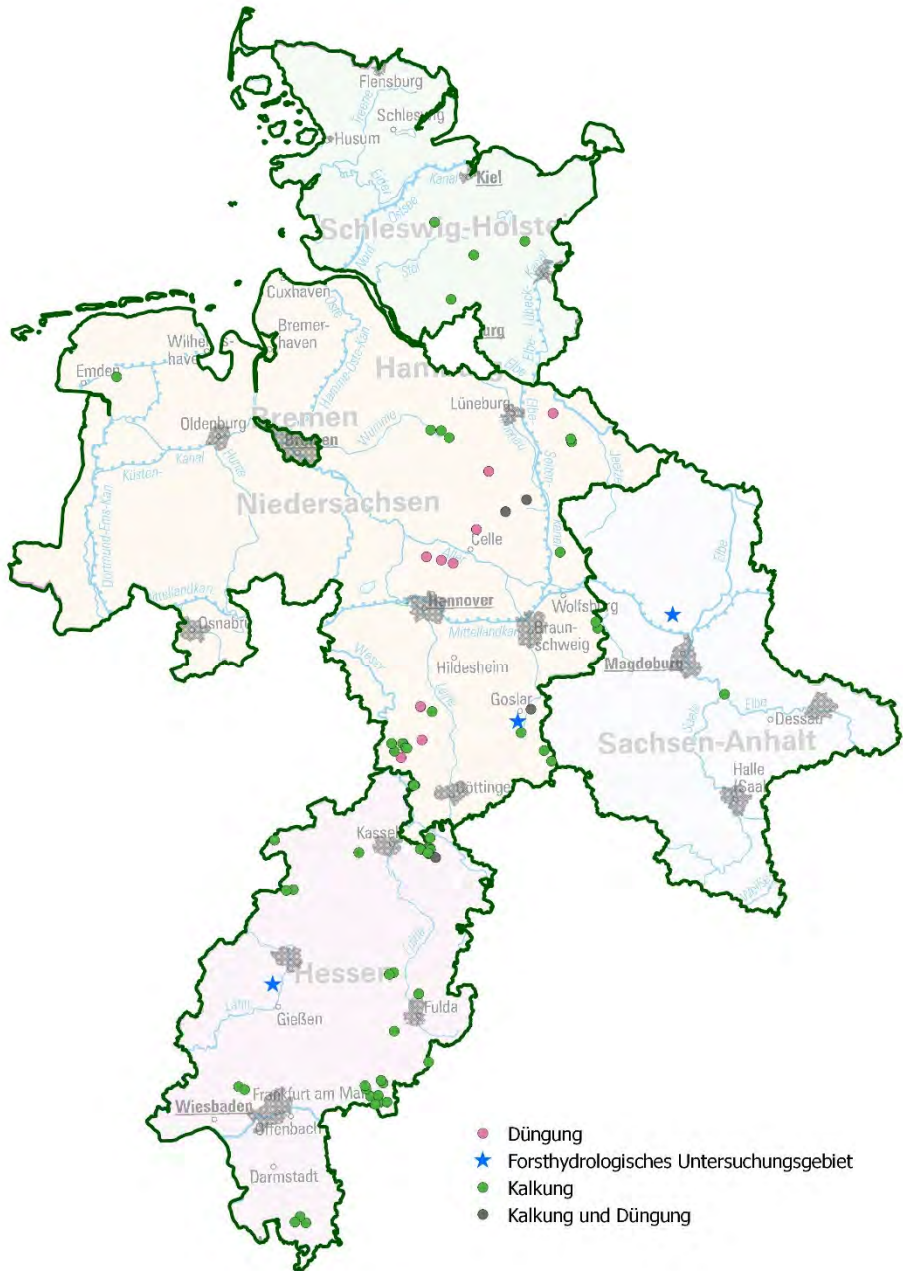


Abbildung 17: Lage der Experimentalflächen in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (Level III)

3.4 Befunde des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings zur Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE

Nils König, Heike Fortmann, Birte Scheler, Egbert Schönfelder, Henning Meesenburg

Nachfolgend werden einige wesentliche Ergebnisse des Forstlichen Umweltmonitorings zur Entwicklung der Stoffeinträge und der chemischen Bodenveränderung auf Intensivmonitoringflächen dargestellt. Diese Befunde sind von besonderer Wichtigkeit für die Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE.

3.4.1 Stoffeintrag-Belastungssituation der Wälder

Im Rahmen des Level II-Programms und des Niedersächsischen Bodendauerbeobachtungsprogramms (BDF) werden in Waldbeständen der vier Hauptbaumarten Kiefer, Fichte, Buche und Eiche die Stoffeinträge aus der Atmosphäre erfasst. Die weltweit längsten Zeitreihen der atmosphärischen Deposition liegen für Fichten- und Buchenbestände im Solling vor. Die Höhe der Einträge in den Waldboden ist von den Eigenschaften der Oberflächen abhängig, es wird von einer Akzeptorabhängigkeit der Einträge gesprochen. Die Einträge im Bestand sind deshalb regelmäßig höher als im Freiland. Beim Vergleich der Baumarten sind Fichten- und Douglasienbestände wegen der ganzjährigen und im Vergleich mit Kiefern dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Kiefernbestände und winterkahle Buchen- und Eichenbestände.

Nachfolgend wird die zeitliche Entwicklung der Stoffeinträge für neun Intensivmonitoringflächen in Niedersachsen dargestellt, auf denen aktuell der Stoffeintrag gemessen wird (KEUFFEL-TÜRK et al. 2012).

Die Analyse der Stoffeinträge zeigt eine extrem hohe Belastung der Waldökosysteme durch anthropogen bedingte Stoffeinträge bis Mitte/Ende der 1970er-Jahre. Das Maximum der Sulfat-Schwefelbelastungen (s. Abb. 18, SO₄-S, gelbe Symbole) wurde in den 1970er-Jahren erreicht. Der jährliche Sulfateintrag im Solling unter Fichte betrug in dieser Zeit (Mittel 1971-1980) 89 kg/ha und Jahr. Durch die seit Mitte der 1980er-Jahre ergriffenen Maßnahmen zur Luftreinhaltung sowie den Zusammenbruch der Kohlewirtschaft der ehemaligen DDR sind die Emissionen von Schwefeldioxid in Deutschland seit dem Auftreten der „Neuartigen Waldschäden“ in erheblichem Umfang zurückgegangen. Infolge des Rückgangs der Emissionen ging der Schwefeleintrag in die Wälder ebenfalls stark zurück. Im Vergleich zu den 1970er-Jahren betrug der Rückgang des Schwefeleintrags im Solling sowohl unter Buche als auch unter Fichte 90 %.

In der Diskussion um die positive Wirkung der Reduktion insbesondere der Schwefeleinträge infolge der ergriffenen Luftreinhaltungsmaßnahmen wird wenig berücksichtigt, dass die Deposition der basischen Kationen Calcium (s. Abb. 18, Ca, blaue Symbole), Magnesium, Kalium und Natrium (hier nicht dargestellt), die dem

Nährstoffverlust ausgleichend gegenübersteht und entlastend wirkt, durch die Luftreinhaltmaßnahmen ebenfalls stark reduziert wurde. Im Solling (Fichte) hat der Calciumeintrag beispielsweise von 23 kg (Mitte der 70er-Jahre) auf knapp 3 kg/ha und Jahr (ab 2010) abgenommen. Wurden in den 1980er-Jahren zwischen 9 % und 20 % der eingetragenen Säuren durch ebenfalls eingetragene Basen neutralisiert, waren es im Zeitraum 2006-2016 nur 5 bis 11 % (s. Abb. 20, blaue Symbole).

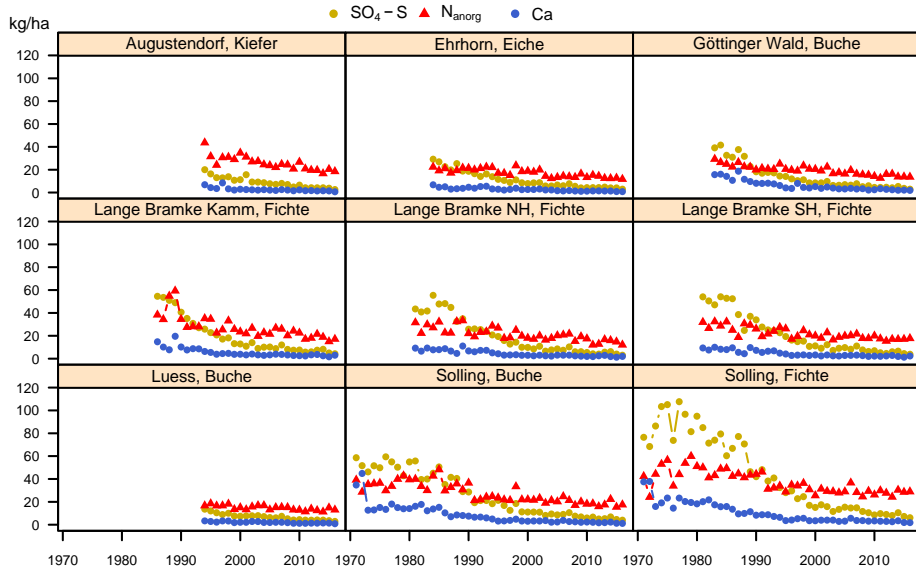


Abbildung 18: Zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Deposition von Sulfatschwefel (gelbe Symbole), Stickstoff (Summe aus Nitrat- und Ammonium-N, rote Symbole) und Calcium (blaue Symbole) jeweils in kg je Hektar und Jahr auf ausgewählten Flächen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen

Einen anderen zeitlichen Verlauf zeigt die Gesamtd deposition von Stickstoff (s. Abb. 18, Summe aus Nitrat- und Ammonium-N, rote Symbole). Zwar verringerte sich auch die Gesamtd deposition von versauernd wirkendem Stickstoff, die Werte verbleiben aber noch auf einem hohen Niveau. Ausgehend von 46 kg anorganischem Stickstoff in den 1970er-Jahren (Mittel der Jahre 1971 bis 1980) werden auf der Fichtenfläche im Solling nunmehr 28 kg/ha und Jahr (Mittel 2012-2016) gemessen, ein Rückgang um 40 %. Im Vergleich zur Mitte der 1980er-Jahre lag der Rückgang auf den Fichten-Flächen der Langen Bramke zwischen 38 % und 60 %, unter Buche (Göttinger Wald) bei 40 % und unter Eiche (Ehrhorn) bei 35 %.

Da Stickstoffeinträge in der Größenordnung zwischen 13 kg und 28 kg/ha und Jahr den Stickstoffbedarf der Waldbäume nach wie vor teilweise erheblich überschreiten, kommt es zu einer weiter fortschreitenden Stickstoffsättigung des Waldökosystems. Hierdurch verändert sich der Stoffhaushalt von Wäldern großflächig

und tiefgreifend. Dies kann zu Bodenversauerung, Nährelementverlusten und -ungleichgewichten sowie Änderungen des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Waldbäumen und Bodenorganismen führen (EICHHORN 1995, DISE et al. 1998, GUNDERSEN et al. 1998a, ROTHE et al. 2002, BERNHARDT 2005). Internationale Langzeit-Monitoring-Programme stützen die Befunde (BORKEN u. MATZNER 2004, WALDNER et al. 2015).

Der Netto-Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid abzüglich der mit dem Niederschlag eingetragenen Basen Calcium, Magnesium und Kalium (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile; GAUGER et al. 2002). Er ist für ausgewählte Flächen des Intensiven Monitorings in Abbildung 19 dargestellt. Natrium wird nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass es vollständig seesalzbürtig ist. In allen dargestellten Flächen geht der Netto-Gesamtsäureeintrag seit den 1970er-Jahren deutlich zurück.

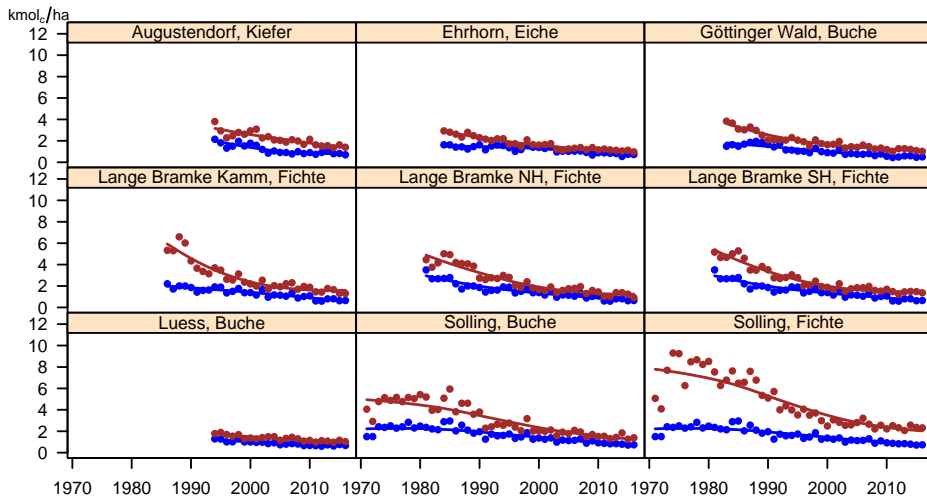


Abbildung 19: Zeitliche Entwicklung des Netto-Gesamtsäureeintrags (nach GAUGER et al. 2002) in kmol , je Hektar und Jahr auf ausgewählten Flächen des Intensiven Monitorings (rot: Gesamtdeposition im Wald, blau: Freiland; durchgezogene Linie: lokalisierte Regression mit Polynomem zweiter Ordnung, R-Funktion loess, spam -Parameter 1,5)

Trotz der beobachteten signifikanten Abnahme der Stoffeinträge werden die kritischen Belastungsgrenzen (Critical Loads) für Säure- und für Stickstoffeinträge nach wie vor an einer Vielzahl von Standorten überschritten (MEESENBURG et al. 2015).

Die unterschiedliche Entwicklung beim Schwefel- und beim Stickstoffeintrag hat dazu geführt, dass sich die Bedeutung der einzelnen Säurebildner am Gesamtsäureeintrag deutlich verschoben hat. Während bis Mitte der 1980er-Jahre die Schwefeldeposition für 2/3 des Gesamtsäureeintrags verantwortlich war, wird heute

rund 80 % des Gesamtsäureeintrags durch anorganische Stickstoffeinträge verursacht (s. Abb. 20).

Eine weitere Reduktion des Stickstoffeintrags ist deshalb auch unter dem Gesichtspunkt der Säurebelastung dringend geboten.

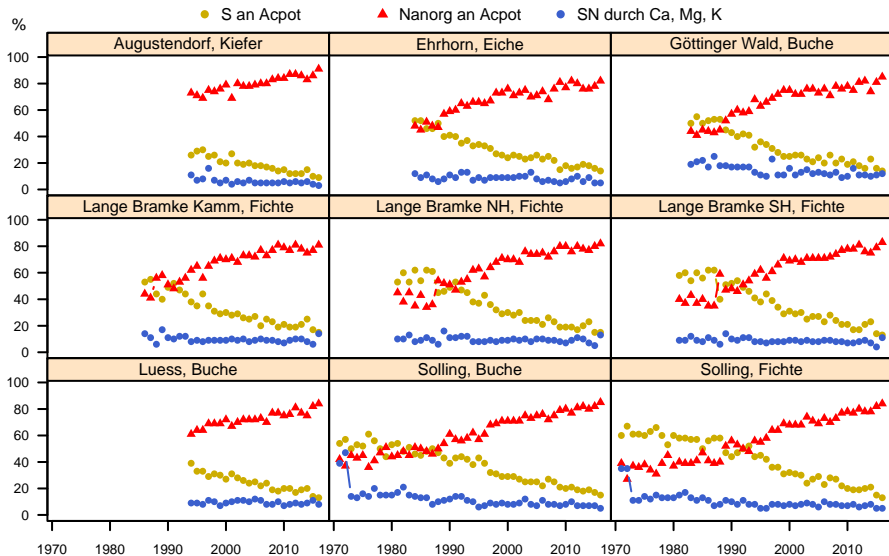


Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung der relativen Anteile von Sulfatschwefel (gelbe Symbole) und Stickstoff (Summe aus Nitrat- und Ammonium-N, rote Symbole) am Gesamtsäureeintrag (ACpot) sowie des Anteils an ACpot, der durch eingetragene Basen neutralisiert wird, auf ausgewählten Flächen des Intensiven Monitorings (SN = Säureneutralisationskapazität, blaue Symbole)

3.4.2 Ergebnisse der Bodeninventuren auf Intensivmonitoringflächen in Nordwestdeutschland

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings der NW-FVA wurden in den letzten 50 Jahren auf 47 Flächen die Einträge von Nähr- und Schadstoffen sowie deren Austräge mit der Bodenlösung gemessen. Hierzu wurden Bodeninventuren durchgeführt und die Bodenproben hinsichtlich ihres Versauerungszustandes untersucht. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Wirkung und zum Verbleib der eingetragenen Säuren und zur Wirkung von Kalkungsmaßnahmen werden im Folgenden dargestellt.

3.4.2.1 Bodenversauerung

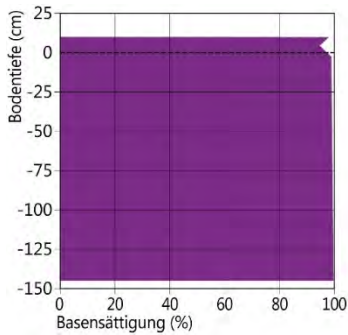
Um den Versauerungszustand der Böden zu beschreiben, wurden verschiedene bodenchemische Indikatoren, wie der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$, der $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$, die austauschbaren Kationen (Ake) und die Basensättigung (BS) untersucht.

Die 47 Flächen des Intensiven Forstlichen Monitorings wurden zunächst auf Basis des Tiefenverlaufs der Basensättigung den fünf Versauerungs- bzw. Basensättigungstypen nach KÖLLING et al. (1996) und KÖLLING (1999) zugeordnet. Typ 1 beschreibt die Böden mit nahezu vollständiger Basensättigung über die gesamte Profiltiefe, zum Typ 5 gehören alle Flächen mit tiefgründiger Versauerung und einer Basensättigung unter 20 % über die gesamte Profiltiefe. Die Typen 2 bis 4 beschreiben die fortschreitende Versauerung mit der Bodentiefe (s. Abb. 21).

Ordnet man die 47 Intensivmonitoringflächen diesen Versauerungstypen zu, so entfallen drei Flächen auf Typ 1, fünf Flächen auf Typ 2, sieben Flächen auf Typ 3, zwei Flächen auf Typ 4 und 30 Flächen auf Typ 5. Zehn dieser Flächen wurden ein- oder mehrmals gekalkt.

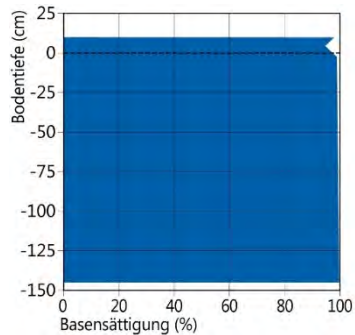
Die 30 Intensivmonitoringflächen des Versauerungstyps 5 sind i. d. R. basenarme Standorte mit geringer Austauschkapazität und gehören vorrangig den Substratgruppen unverlehmter Sand, schwach verlehmter Sand, Buntsandstein und Quarzit an. Ein typisches Beispiel ist die Fichtenfläche im Solling (SLF1), die zu den ältesten Umweltmonitoringflächen weltweit gehört.

Diese Fläche ist seit 1968 sehr homogen bestockt, was am sehr ähnlichen Verlauf der Austauschkapazität (s. Abb. 22) mit der Bodentiefe zu den verschiedenen Beprobungszeitpunkten zu erkennen ist. Die Basensättigung (s. Abb. 23) hat mit der Zeit über die gesamte Bodentiefe deutlich abgenommen und ist erst in den letzten Jahren wieder leicht angestiegen. Mit der Abnahme der Basensättigung verändert sich das chemische Bodenmilieu. Der Anteil von Aluminium an der Austauschkapazität nimmt zu, die Nährstoffe (u. a. Calcium, Magnesium) werden mit dem Sickerwasser ausgetragen und gehen dem Ökosystem verloren. Diese Entwicklung spiegelt sich in der Zunahme von austauschbarem Aluminium (Al, s. Abb. 24) und der Abnahme von austauschbarem Calcium (Ca, s. Abb. 25) auf der Fichtenfläche im Solling (SLF1) wider.



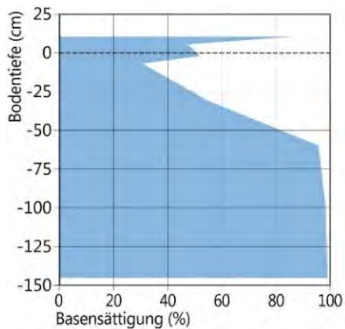
sehr basenreich (Typ 1+)

Gleichmäßig hohe Basensättigung von > 80 % im gesamten Profil mit hohem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, keine Bodenversauerung



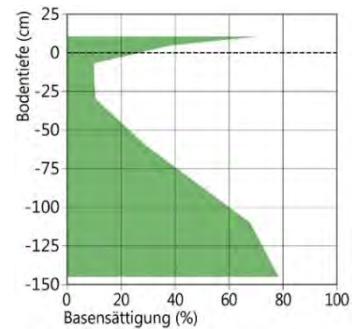
sehr basenreich, geringes Kaliumangebot (Typ 1-)

Gleichmäßig hohe Basensättigung von > 80 % im gesamten Profil mit hohem Calcium-, Magnesium- und geringem Kaliumvorrat (< 400 kg/ha Kalium), keine Bodenversauerung



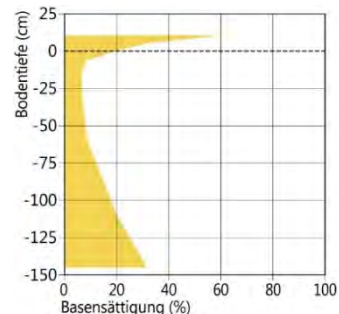
basenreich (Typ 2)

Hohe Basensättigung mit hohem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, leichte Versauerung im Oberboden



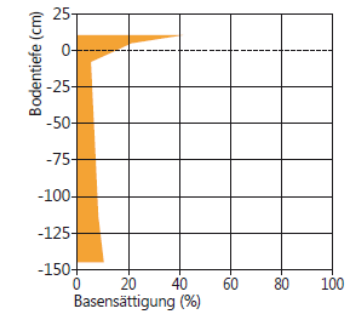
mittelbasisch (Typ 3)

Mittlere Basensättigung mit mittlerem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, stärkere Versauerung im Oberboden



basenarm (Typ 4)

Geringe Basensättigung mit geringem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, tiefreichende Bodenversauerung, Anstieg der Basensättigung von > 20 % erst in 1 m Tiefe



sehr basenarm (Typ 5)

Gleichmäßig geringe Basensättigung von < 20 % mit geringem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, tiefreichende Bodenversauerung

Abbildung 21: Basensättigungstypen nach KÖLLING et al. (1996) und KÖLLING (1999) (geändert)

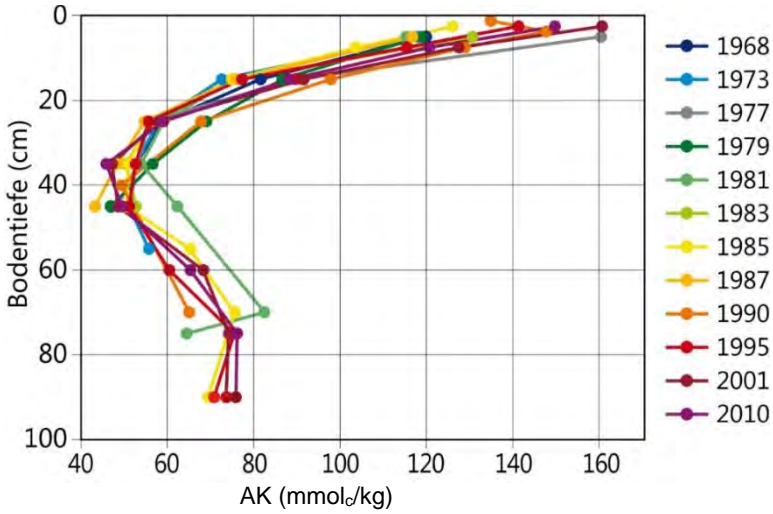


Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung der Austauschkapazität (AK) [mmol./kg] mit der Bodentiefe von 1968-2010 auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling (SLF1)

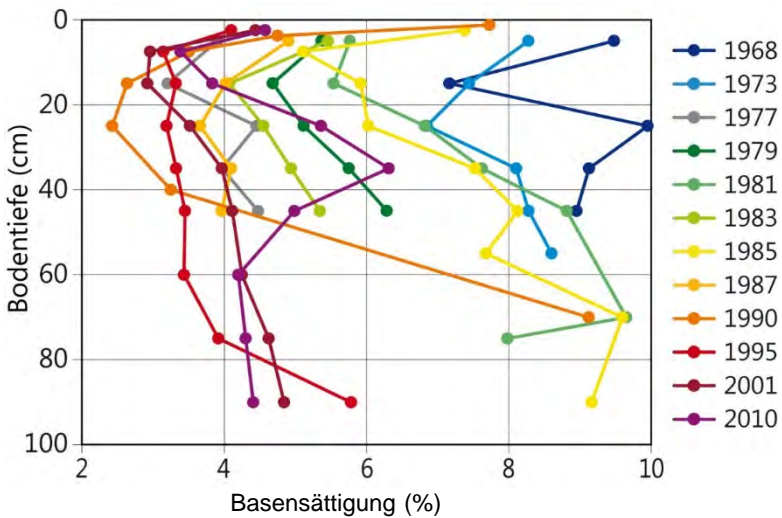


Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung der Basensättigung (BS) [%] mit der Bodentiefe von 1968-2010 auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling (SLF1)

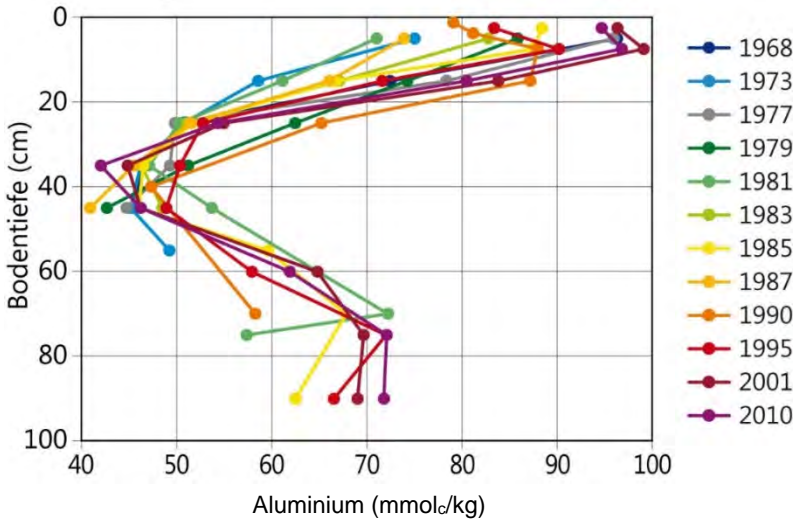


Abbildung 24: Zeitliche Entwicklung des Gehalts an austauschbarem Aluminium (Al) [mmol/kg] mit der Bodentiefe von 1968-2010 auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling (SLF1)

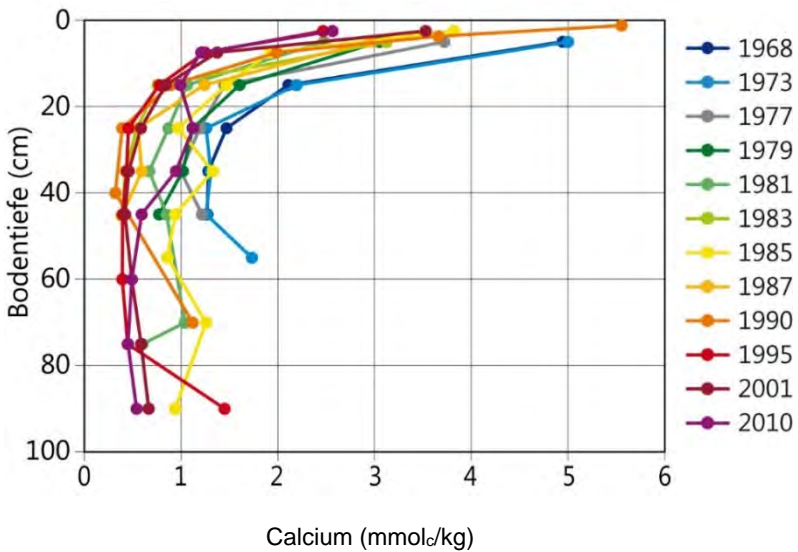


Abbildung 25: Zeitliche Entwicklung des Gehalts an austauschbarem Calcium (Ca) [mmol/kg] mit der Bodentiefe von 1968-2010 auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling (SLF1)

Noch deutlicher ist die Entwicklung der Basensättigung zu erkennen, wenn sie für verschiedene Bodentiefen (0-30 cm, 0-50 cm, 0-100 cm) betrachtet wird (s. Abb. 26). Eine Ursache für die Abnahme der Basensättigung ist der Verlust an austauschbarem Calcium, dessen Vorräte im Oberboden (0-50 cm) wie auch im Unterboden (50-100 cm, s. Abb. 27) deutlich abgenommen haben. Seit etwa dem Jahr 2000 deutet sich ein Anstieg der Calciumvorräte im Oberboden an, während der Unterboden weiter an Calcium verarmt.

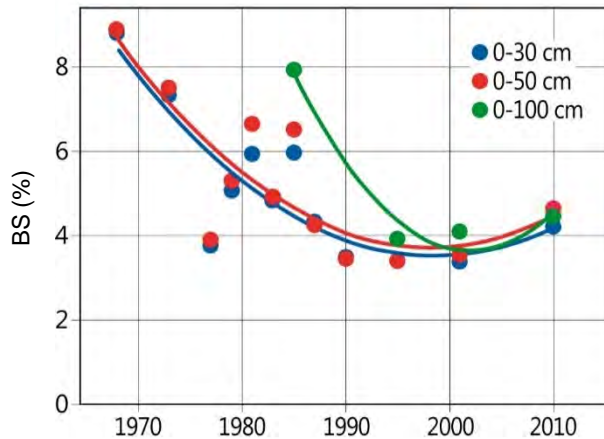


Abbildung 26: Veränderung der mittleren Basensättigungssumme (BS) [%] für die Bodentiefenbereiche 0-30, 0-50 und 0-100 cm von 1968-2010 auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling (SLF1)

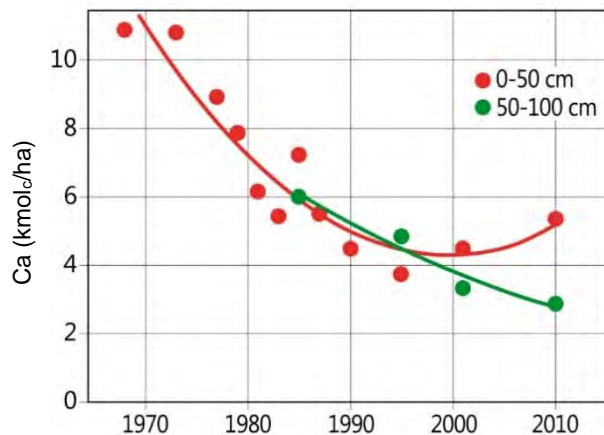


Abbildung 27: Veränderung der austauschbaren Calciumvorräte (Ca) [kmol_e/ha] für die Bodentiefenbereiche 0-50 und 50-100 cm von 1968-2010 auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling (SLF1)

Im Auflagehumus ist der pH-Wert (H_2O) im Zeitraum 1995-2010 angestiegen (s. Abb. 28). Dies geht einher mit einer Abnahme des Calcium- und Kohlenstoffvorrats im Auflagehumus auf der Fläche (s. Abb. 29), der in der vorigen Phase der Versauerung wiederum zugenommen hat (s. Abb. 26).

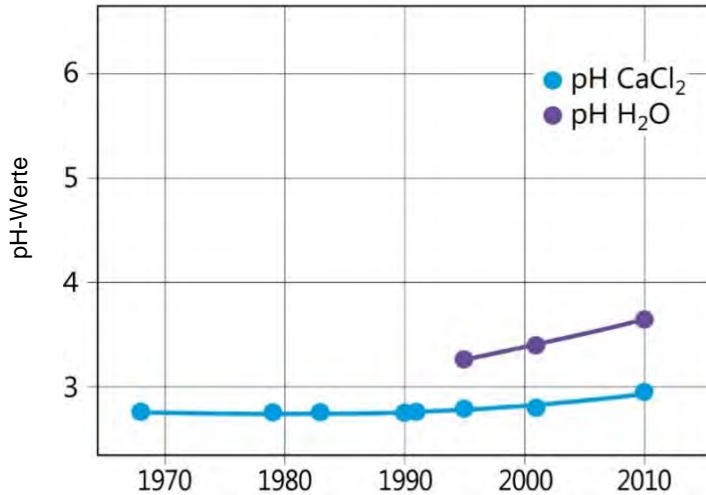


Abbildung 28: Veränderung der pH-Werte im Auflagehumus in Wasser (H_2O) und Calciumchlorid (CaCl_2) von 1968-2010 auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling (SLF1)

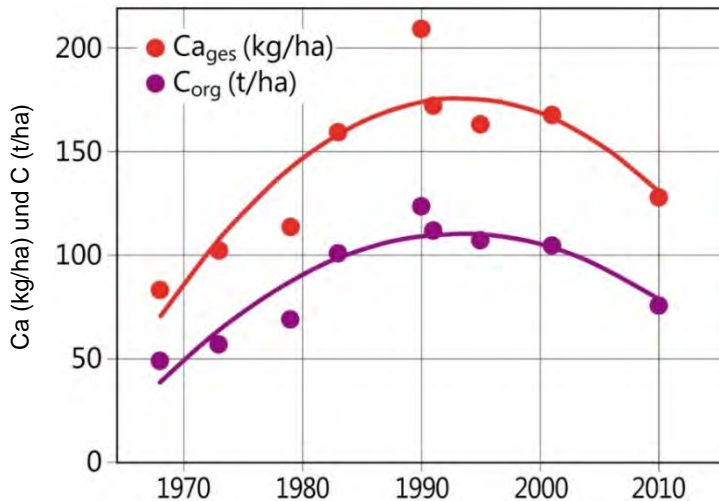


Abbildung 29: Veränderung der Calciumvorräte (Ca_{ges}) [kg/ha] und der Vorräte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) [t/ha] im Auflagehumus von 1968-2010 auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling (SLF1)

Diese Ergebnisse sind in ähnlicher Form auch auf den übrigen Flächen des Basensättigungstyps 5 festzustellen. Wegen der größeren Inhomogenität anderer Versuchsflächen sind die Tendenzen jedoch nicht immer so klar erkennbar oder es liegen nicht so lange Zeitreihen vor.

Betrachtet man die 14 ungekalkten Flächen des Basensättigungstyps 5 mit niedrigen Calciumvorräten, auf denen mehr als eine Inventur durchgeführt wurde, gemeinsam, so ergibt sich für eine Reihe von Flächen eine signifikante Abnahme des austauschbaren Calciumvorrates in den vergangenen Jahrzehnten seit 1968 im Oberboden (s. Abb. 30, durchgezogene Linien in roten bis orangenen Farbtönen).

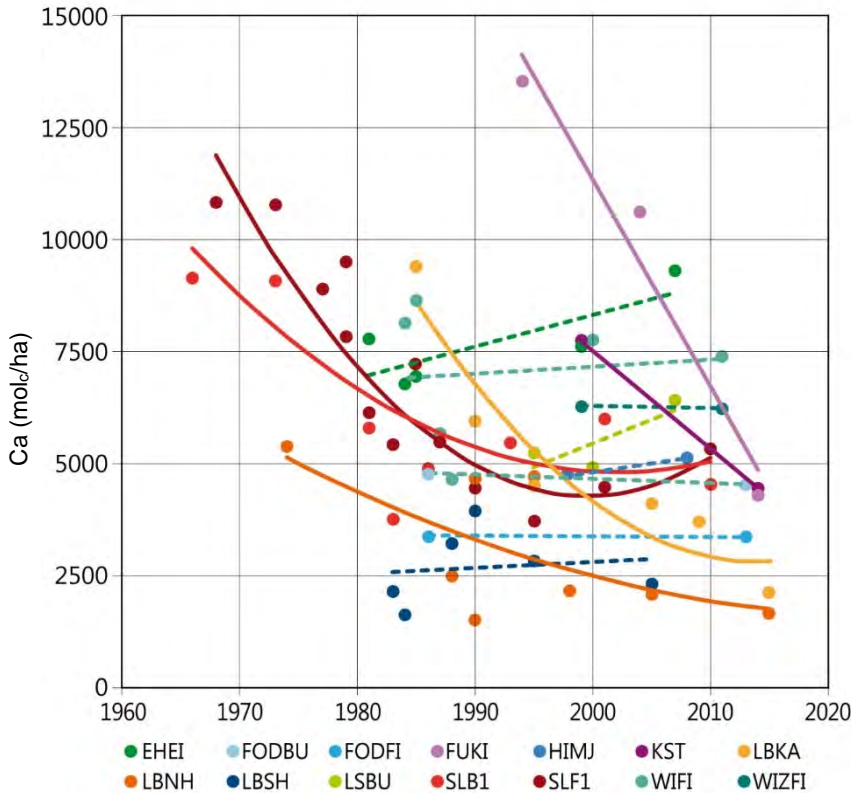


Abbildung 30: Veränderung der austauschbaren Calciumvorräte (Ca) [mol/ha] für die Bodentiefe 0-50 cm auf 14 Flächen des Basensättigungstyps 5 (durchgezogene Linien: signifikante Veränderung, gestrichelte Linien: keine signifikante Veränderung; EHEI = Ehrborn Eiche, FODBU = Fürth im Odenwald Buche, FODFI = Fürth im Odenwald Fichte, FUKI = Fuhrberg Kiefer, HIMJ = Hils Mulde Fichte jung, KST = Königstein Fichte, LBKA = Lange Bramke Kamm Fichte, LBNH = Lange Bramke Nordhang Fichte, LBSH = Lange Bramke Südhang Fichte, LSBU = Löss Buche, SLB1 = Solling Buche, SLF1 = Solling Fichte, WIFI = Wingst Fichte, WIZFI = Witzzenhausen Fichte)

Die Abnahme des austauschbaren Calciums im Mineralboden scheint im letzten Jahrzehnt überwiegend gestoppt zu sein, auf einigen der Flächen ist sogar eine leichte Erholung zu erkennen. Bei vielen Flächen, deren Zeitreihen erst Mitte der 1980er-Jahre oder noch später beginnen, ist in den letzten Jahrzehnten hingegen keine signifikante Veränderung ersichtlich (blaue und grüne Linien).

Insgesamt muss festgestellt werden, dass die Versauerung auf schwach mit Nährstoff versorgten Standorten bis um das Jahr 2000 fortgeschritten ist und die Calciumverluste erst nach dem drastischen Rückgang der Säureinträge gestoppt wurden. Auf einigen Standorten scheint eine langsame Erholung der Calciumvorräte und damit auch der Basensättigung stattzufinden.

3.4.2.2 Kalkung

Auf zehn Monitoringflächen wurden verschiedene Kalkungsmaßnahmen durchgeführt, um den Einfluss der Kalkung auf die Versauerungsindikatoren pH-Wert, Basensättigung, austauschbare Calciumvorräte und andere Parameter zu untersuchen.

Am deutlichsten kann die Wirkung der Kalkung auf einer Buchenfläche im Solling belegt werden, die mit 30 t dolomitischem Kalk je Hektar 1982 einmalig gekalkt wurde. Innerhalb von 25 Jahren stieg die Basensättigung im Oberboden auf bis zu 90 % an und änderte sich bis in eine Bodentiefe von 60 cm (s. Abb. 31). Der pH-Wert (CaCl_2) stieg von 3,2 auf 5,1 in den obersten Zentimetern des Mineralbodens an (s. Abb. 32). Damit einher gingen ein Abbau des Auflagehumus und eine Anreicherung von organischem Kohlenstoff im Oberboden.

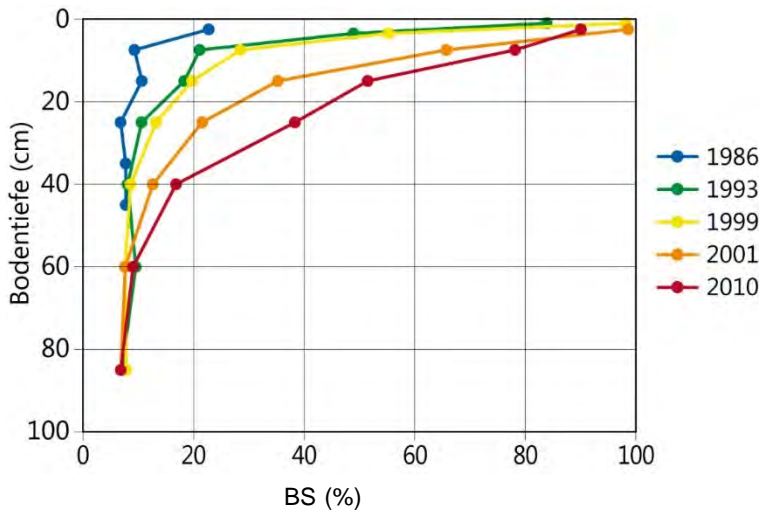


Abbildung 31: Verlauf der Basensättigung (BS) [%] mit der Bodentiefe von 1986-2010 auf der Buchenfläche SLBK im Solling, Kalkung: 30 t je Hektar

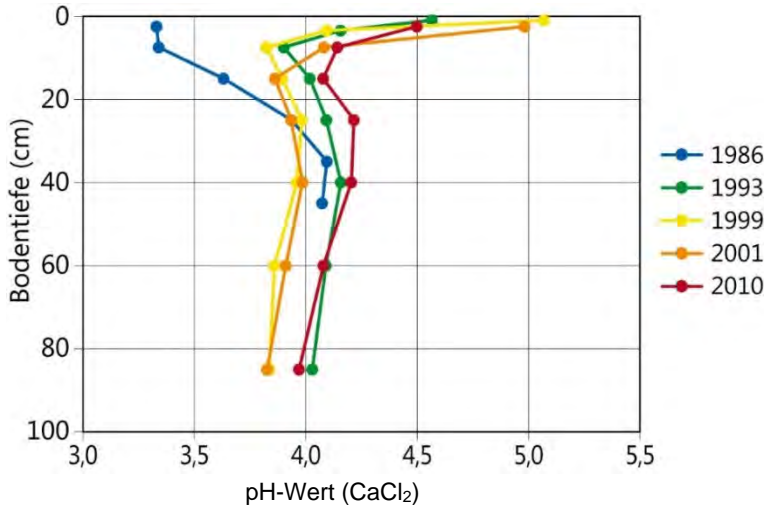


Abbildung 32: Verlauf des pH(CaCl₂)-Wertes mit der Bodentiefe von 1986-2010 auf der Buchenfläche SLBK im Solling, Kalkung: 30 t je Hektar

Zwar ist eine Kalkung mit 30 t je Hektar extrem und nicht praxisüblich; sie zeigt aber deutlich die Trends auf, die grundsätzlich auch bei geringeren Kalkmengen eintreten. In den Abbildungen 33 bis 38 sind die Entwicklungen der Basensättigung im Mineralbodenprofil und die der pH-Werte im Auflagehumus auf drei Buchenflächen im Solling dargestellt. Die erste Fläche wurde nicht gekalkt, die zweite mit 2 x 4 t je Hektar und die dritte mit 30 t je Hektar. Es zeigt sich deutlich die Wirkung der Kalkung: die ungekalkte Fläche versauerte weiter und zeigt eine abnehmende Basensättigung auf unter 5 %, die sich erst in den letzten 10 Jahren mit leicht ansteigendem pH-Wert stabilisierte (s. Abb. 33 u. 34). Die mit 2 x 4 t je Hektar gekalkte Fläche zeigt eine leicht ansteigende Basensättigung auf bis zu 20 % im Oberboden und leicht steigende pH-Werte im Auflagehumus (s. Abb. 35 u. 36). 30 Jahre nach der letzten Kalkung scheinen jedoch beide Indikatoren wieder leicht abzunehmen. Die mit 30 t je Hektar gekalkte Fläche zeigt eine drastisch erhöhte Basensättigung bis in größere Bodentiefen (s. Abb. 37). Der pH-Wert im Auflagehumus steigt zwischenzeitlich auf Werte um pH 6 an, fällt aber nach 25 Jahren unter den Ausgangszustand (s. Abb. 38). Die Bodenschutzkalkung in den Partnerländern der NW-FVA wird i. d. R. mit 3 t je Hektar durchgeführt, der Kalkungsturnus variiert. Von den Versuchsvarianten kommt die mit 2 x 4 t je Hektar gekalkte Fläche der Praxisalkung am nächsten. Der Auflagehumusvorrat hat auf dieser Fläche abgenommen und ist auf der extrem gekalkten Fläche auf die Hälfte reduziert (ohne Abbildung).

Insgesamt kann als Ergebnis der langjährigen Untersuchungen der Kalkung eine positive Wirkung in Bezug auf eine Reduzierung der Folgen der Bodenversauerung sowie einer Verlagerung des organischen Kohlenstoffs vom Auflagehumus in den oberen Mineralboden zugesprochen werden.

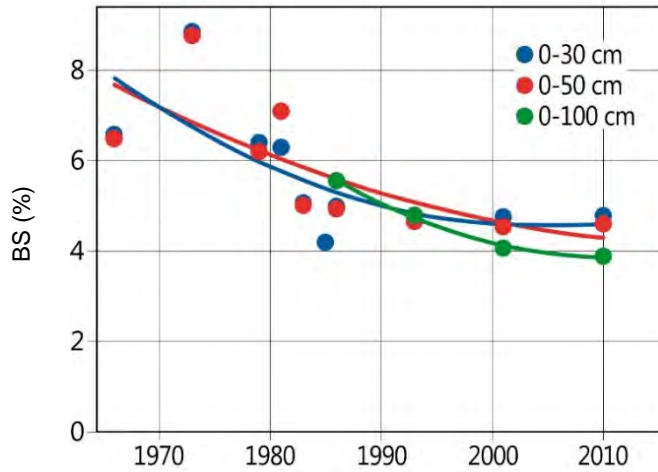


Abbildung 33: Veränderung der mittleren Basensättigung (BS) [%] für die Bodentiefen 0-30, 0-50 und 0-100 cm von 1968-2010 auf der Buchenfläche SLB1 im Solling, ungekalkt

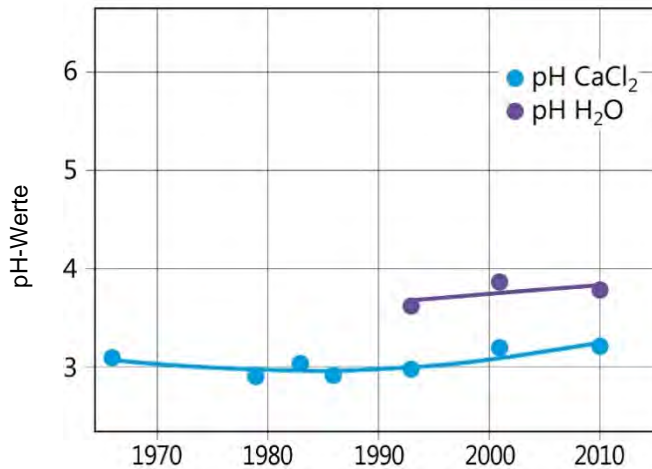


Abbildung 34: Veränderung der pH-Werte im Auflagehumus in Wasser (H₂O) und Calciumchlorid (CaCl₂) von 1968-2010 auf der Buchenfläche SLB1 im Solling, ungekalkt

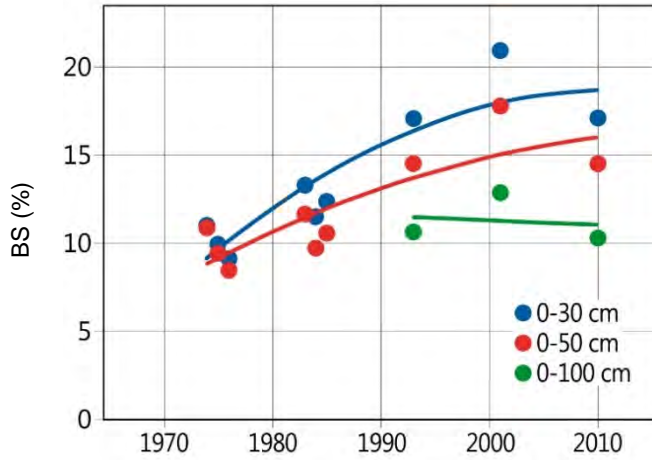


Abbildung 35: Veränderung der mittleren Basensättigung (BS) [%] für die Bodentiefen 0-30, 0-50 und 0-100 cm von 1974-2010 auf der Buchenfläche SLBD im Solling, zweimal gekalkt mit je 4 t je Hektar

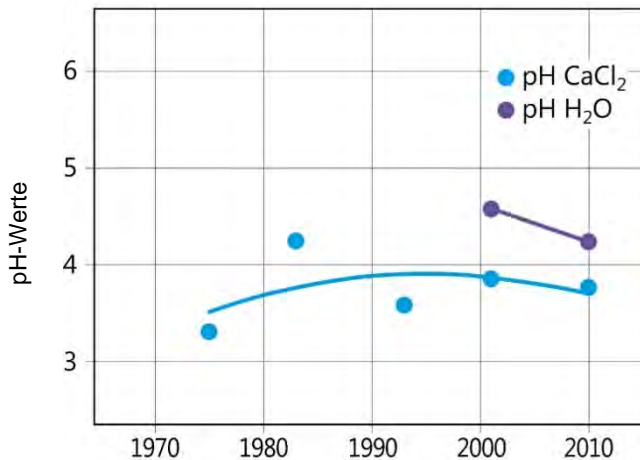


Abbildung 36: Veränderung der pH-Werte im Auflagehumus in Wasser (H₂O) und Calciumchlorid (CaCl₂) von 1975-2010 auf der Buchenfläche SLBD im Solling, zweimal gekalkt mit je 4 t je Hektar

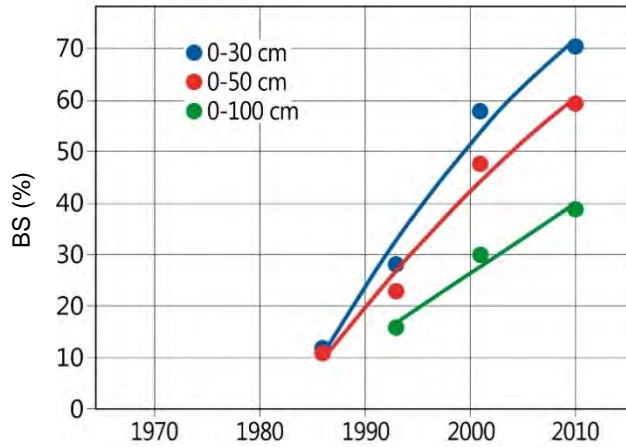


Abbildung 37: Veränderung der mittleren Basensättigungssumme (BS) [%] für die Bodentiefen 0-30, 0-50 und 0-100 cm von 1986-2010 auf der Buchenfläche SLBK im Solling, gekalkt mit 30 t je Hektar

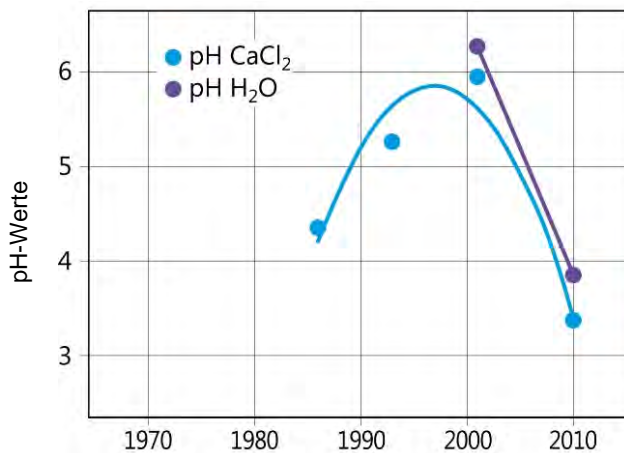


Abbildung 38: Veränderung der pH-Werte im Auflagehumus in Wasser (H₂O) und Calciumchlorid (CaCl₂) von 1986-2010 auf der Buchenfläche SLBK im Solling, gekalkt mit 30 t je Hektar

4 Aufgaben und Ziele der Bodenzustandserhebungen

Uwe Paar, Jan Evers

Die Bodenzustandserhebungen sind im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings integraler Bestandteil der Übersichtserhebungen (Level I).

Die bundesweit systematische Stichprobeninventur zum Zustand der Waldböden liefert ein umfassendes und flächendeckendes Bild hinsichtlich des aktuellen Zustandes und der Veränderungen der Waldbodenfunktionen.

Die Sorge um eine flächendeckende Nährstoffverarmung und eine Versauerung der Waldböden durch luftbürtige Säurebildner sowie der Bedarf an bundesweit vergleichbaren Boden- und Standortinformationen gaben den Anlass für die erste Bodenzustandserhebung im Wald (BZE I). Dementsprechend wurde der Arbeitsauftrag formuliert (WOLFF u. RIEK 1997). Diese Zielsetzung gilt grundlegend auch für die zweite BZE (WELLBROCK et al. 2006).

Demnach hat die Bodenzustandserhebung in Ergänzung zur Waldzustandserhebung die Aufgabe, zuverlässige, flächenrepräsentative und bundesweit vergleichbare Informationen

- über den aktuellen Zustand der Waldböden und deren Veränderungen im Laufe der Zeit in Verbindung mit den Ergebnissen der Erhebung des Waldzustands,
- zur Übertragung der Ergebnisse der Waldbodenforschung auf größere Waldgebiete,
- zur Identifizierung von Ursachen der Veränderungen des Bodenzustandes sowie des Einflusses von Depositionen,
- zur Einschätzung von Gefahren, die sich für den derzeitigen Waldbestand und für die nächste Waldgeneration aus dem Bodenzustand ergeben,
- zur Einschätzung von Risiken für die Qualität von Grund-, Quell- und Oberflächenwasser
- sowie zur Planung und Durchführung von notwendigen Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Bodenzustandes sowie des Nährstoffangebotes im Boden und der Nährstoffaufnahme durch die Baumwurzeln

zu liefern.

Neue Erkenntnisse, politische Anforderungen und neue gesetzliche Aufgaben machten es notwendig, in der Zielsetzung der BZE II weiterführende Aspekte zu berücksichtigen, um Aussagen zu den derzeit wichtigsten Themen der Waldbodenforschung zu ermöglichen (KÖLLING 2005, WELLBROCK et al. 2006). Diese sind:

- der *Stickstoffstatus* von Waldböden und deren Sensitivität gegenüber weiteren Stickstoffeinträgen,
- die *aktuelle Kohlenstoffspeicherung* und Änderungen des Kohlenstoffvorrates in Waldböden (Klimarahmenkonvention und Kyoto-Protokoll),
- die *bodenchemische und waldernährungskundliche Wirkung von Maßnahmen zur Stabilisierung der Waldökosysteme* (Erfolgskontrolle, vor allem Bodenschutzkalkungen und naturnaher Waldbau),
- die Hintergrundbelastung von Böden *mit Schwermetallen und organischen Spurenstoffen* (BBODSCHG 1998),
- *der Wasserhaushalt unter veränderten Klimabedingungen*,
- die Beurteilung von *Waldböden als Produktionsgrundlage der Forstwirtschaft* und
- die Eigenschaften von *Waldböden als Lebensraum*.

Dementsprechend werden Bodeneigenschaften bestimmt, die Auskunft über den Säurezustand, die Belastung mit umweltgefährlichen Stoffen, den Stickstoffstatus, die Kohlenstoffbindung, die Wasserspeicherung und die Bedeutung des Bodens für die Baumernährung, das Baumwachstum und als Lebensraum geben.

5 Methoden

Jan Evers, Uwe Paar, Inge Dammann, Marcus Schmidt

5.1 Allgemeine Einführung

In der Zeit von 2006 bis 2008 fand in den Wäldern Niedersachsens und Bremens die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung (BZE II) statt. Sie folgte der ersten Waldbodenzustandserhebung (BZE I), die in Niedersachsen und Bremen in den Jahren 1990 bis 1991 durchgeführt und 1997 publiziert wurde (BÜTTNER 1997). Voraussetzung für die Ermittlung von Veränderungen bei Folgeinventuren ist die grundsätzliche Einhaltung gleicher Erhebungsprinzipien, wie insbesondere des Erhebungsrasters, des Stichprobenkonzepts und der Methoden. Bei der konzeptionellen Ausgestaltung der BZE II wurden daher möglichst viele methodische Vorgaben aus der BZE I übernommen. Im Hinblick auf länderübergreifende Vergleiche ist von Bedeutung, unterschiedliche Definitionen der Standortselemente der Länder zu vereinheitlichen. Das ist für die Partnerländer der NW-FVA 2015 von einer Expertengruppe erstmalig zusammengestellt worden (SCHMIDT et al. 2015). Darüber hinaus musste die Vergleichbarkeit von Analyseverfahren beachtet bzw. eine Angleichung unterschiedlicher Tiefenbeprobungen vorgenommen werden (s. a. EVERS et al. 2010).

Das BZE II-Stichprobennetz in Niedersachsen ist von dem 215 Punkte umfassenden BZE I-Raster der Unterstichprobe der Waldzustandserhebung (WZE, STRELETZKI 1987) inklusive 37 EU-Punkten auf ein einheitliches 8 x 8 km-Netz mit 173 BZE II-Punkten überführt worden. Insgesamt gibt es 116 BZE-Punkte, die sowohl zum Kollektiv der BZE I als auch der BZE II gehören. Auf Bremen entfallen 5 BZE-Punkte. Im Rahmen der zeitgleichen Erhebungen des BioSoil-Projekts der EU sind zwischen 2006 und 2008 insgesamt 42 BZE-Punkte auch nach den BioSoil-Kriterien im 16 x 16 km-Raster beprobt und analysiert worden (HIEDERER et al. 2011). Insgesamt gibt es 272 BZE I und/oder II-Punkte in Niedersachsen und Bremen (s. Tab. 3).

Tabelle 3: Anzahl BZE-Punkte der BZE I und II sowie des BioSoil-Projekts in Niedersachsen und Bremen

BZE-Punkte	nur BZE I	BZE I und II	nur BZE II	BZE I	BZE II	gesamt
Niedersachsen	98	75	52	173	127	225
BioSoil	0	37	5	37	42	42
Bremen	1	4	0	5	4	5
Summe	99	116	57	215	173	272

5.2 Merkmalsgruppen

Bei der BZE II wurden folgende Merkmalsgruppen erfasst:

- Forstliche Daten und allgemeine Angaben (Punktdate, raumbezogene Daten, Daten zur Aufnahmesituation und Angaben zu Boden verändernden Ereignissen)
- Boden (Profilbeschreibung, Bodenchemie inkl. Schwermetalle und Organika sowie Bodenphysik, jeweils getrennt nach Mineralboden und Humusaufgabe)
- Nadel-/Blatternahrung
- Bestandesdaten
- Vitalität (Waldzustandserhebung)
- Bodenvegetation

5.3 Untersuchungsdesign und -module am BZE II-Punkt

Das in Abbildung 39 dargestellte Design für die verschiedenen Untersuchungsobjekte wurde auf sämtlichen BZE II-Punkten in Niedersachsen umgesetzt.

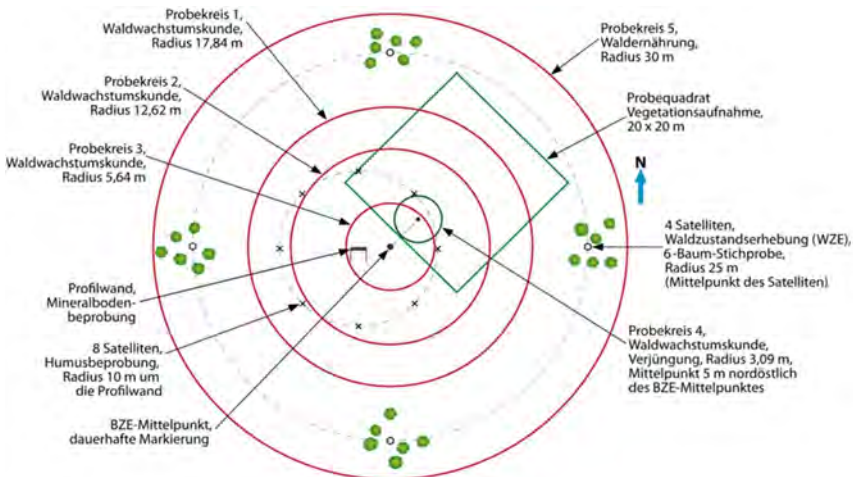


Abbildung 39: Inventurdesign an niedersächsischen BZE II-Punkten

In der Nähe des BZE-Mittelpunktes, der zugleich auch Mittelpunkt der Waldzustandserhebung (WZE, 4 x 6-Baum-Stichprobe, Radius 25 m (äußere gestrichelte Linie)) ist, wurde ein Bodenprofil angelegt und eingemessen. Der BZE-Mittelpunkt war zugleich Mittelpunkt der konzentrischen Probekreise für die waldwachstumskundlichen Aufnahmen. Die Vegetationsaufnahmen fanden i. d. R. in einem

20 x 20 m-Quadrat nordöstlich des BZE-Mittelpunktes statt, um möglichst ungestörte Vegetationsaufnahmen sicherzustellen. Dieses Quadrat konnte bei Bedarf um jeweils 90° gegen den Uhrzeigersinn verschoben werden. Die Ecken wurden verpflockt und eingemessen. Die Gesamtbeschreibung des BZE-Punktes (Bestand, Geländeform, Vegetationsarten, Bodenbearbeitung) bezog sich auf einen 30 m-Radius-Kreis (Probekreis 5). Die Satelliten der Bodenprobennahme wurden von der Profilwandmitte aus, jeweils 10 m entfernt, in den Haupt- und Zwischenhimmelsrichtungen eingemessen.

5.3.1 *Beprobung und Analyse des Auflagehumus und des Mineralbodens*

Die 173 BZE II-Punkte wurden im Zeitraum vom 31.10.2006 bis 15.10.2007 beprobt. An 3 BZE-Punkten konnten aufgrund von nachhaltig anstehendem Grundwasser keine Proben gewonnen werden.

Die Beprobung orientierte sich an der bundesweiten BZE II-Arbeitsanweisung (WELLBROCK et al. 2006). Der Auflagehumus und Mineralboden wurde nach den BZE-Tiefenstufen (0-5, 5-10, 10-30, 30-60, 60-90 und 90-140 sowie 140-200 cm, sofern möglich) an den 8 Satelliten mit dem Murach'schen Wurzelbohrer (Innendurchmesser 8 cm, 50,26 cm²) bis 10 cm bzw. 30 cm (sofern möglich) oder Stechrahmen (Auflagehumus) und Stechzylinder (Mineralboden) volumengerecht beprobt. In tieferen Bereichen wurde mit dem N-Min-Bohrerset für die bodenchemischen Analysen gearbeitet und die bodenphysikalische Beprobung mit Stechzylindern am Profil durchgeführt.

Die Beprobung des Auflagehumus und Mineralbodens erfolgte auf Ebene der Einzelprobe jeweils an derselben Stelle, um Fehler bei der Vorratsberechnung durch Standortwechsel eines Beprobungsvorgangs zu vermeiden. Bei einer deutlichen Haupthorizontgrenze innerhalb einer Tiefenstufe wurde von der Tiefenstufebeprobung abgewichen. Dies trat z. B. regelmäßig bei organisch geprägten Horizonten, wie z. B. Anmooren, auf. In den meisten dieser Fälle sind dann zusätzlich die BZE-Tiefenstufen unterteilt worden, sodass eine Rückführung in die betreffende Tiefenstufe problemlos (rechnerisch) möglich wurde. Um eine Verschleppung humosen Oberbodens in tiefere Schichten zu vermeiden, verlief die Beprobung stufenweise, indem immer die obere Schicht bei der Beprobung der darunterliegenden abgetragen wurde. Die Proben wurden in Probesäcken (Baumwolle) verpackt und zeitnah in das Umweltlabor der NW-FVA zur Analyse transportiert.

Zeitgleich sind Proben für das EU Forest Focus Programm (BioSoil), für die Bestimmung der Hintergrundwerte für Schwermetalle durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR Hannover) und für die Bestimmung persistenter organischer Schadstoffe durch das Umweltbundesamt (UBA Dessau) gewonnen worden. Diese Proben wurden zur Vorbereitung ebenfalls zum Umweltlabor der NW-FVA geliefert und anschließend an die o. g. Institutionen zur Analyse geschickt.

Die Probenvorbereitungen, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden erfolgten auf Basis des „Handbuches Forstliche Analytik“ (HFA inklusive Ergänzungslieferungen, GAFA 2005, 2014) und Methodendokumentationen des Umweltlabors der NW-FVA (KÖNIG u. FORTMANN 1996, 1999, 2012, KÖNIG et al. 2009). Die in den Laboren angewandten Methoden sind dem Kapitel 11 „Qualitätssicherung“ zu entnehmen. In der ECO-Datenbank der NW-FVA (SCHULZE u. EVERS 2013) ist für jeden Analysenwert auch der HFA-Code hinterlegt.

5.3.2 Blatt- und Nadelernährung

Die bei der BZE II angewandten Methoden und Zeitpunkte der Blatt- und Nadelbeprobung sind in Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt identisch. Die Analyse der Nadeln und Blätter wurde einheitlich im Umweltlabor der NW-FVA durchgeführt.

An 162 Inventurpunkten des systematischen BZE II-Rasters in Niedersachsen (inkl. Bremen) wurden Nadeln und Blätter aus der Oberkrone von drei Probestämmen je Baumart als Mischprobe chemisch analysiert. An elf BZE II-Punkten wurden keine Blatt- oder Nadelproben gewonnen, weil der Bestand durch Windwurf zerstört bzw. keine der Hauptbaumarten vertreten war. Zeitgleich mit der Blatt- und Nadelbeprobung der vier Hauptbaumarten auf dem 8 x 8 km-Raster wurden 65 BZE I-Punkte, die nicht zum BZE II-Kollektiv gehören, beprobt (s. Tab. 4). Insgesamt umfasste die Beprobung der Laubbäume im Juli 2007 sowie der Fichten und Kiefern im Winter 2007/2008 227 BZE-Punkte. Da an vielen Erhebungspunkten mehrere Baumarten vorkommen, sind insgesamt 277 Beprobungen von jeweils drei Probestämmen in Niedersachsen (inkl. Bremen) erfolgt. Grundlage für die Erhebung war auch hier die Arbeitsanleitung zur Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (WELLBROCK et al. 2006).

Bei der BZE I wurden 1990/1991 von 146 BZE I-Punkten Nadel- und Blattproben analysiert. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag damals bei Beständen im Alter über 40 Jahre. 1996 folgte eine Zwischeninventur, bei der die Probestämme der BZE I erneut beprobt wurden. Auch Bestände unter 40 Jahre wurden bei dieser Inventur berücksichtigt. Bei der BZE II wurden ebenfalls – soweit die Probestämme noch vorhanden waren und den Auswahlkriterien der Arbeitsanleitung zur Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) entsprachen – die Probestämme der BZE I und der Inventur 1996 beprobt, allerdings umfasst diese Inventur nur die Hauptbaumarten Kiefer, Fichte, Buche und Eiche.

Für den zeitlichen Vergleich der Nährelementversorgung der Fichte konnten die Daten der Immissionsökologischen Waldzustandserfassung (IWE) verwendet werden, die in den Wintern 1983/1984 und 1984/1985 an 46 Beprobungspunkten mit je sechs Probestämmen als Mischprobe durchgeführt wurde.

Tabelle 4: Übersicht der Blatt- und Nadelproben im Rahmen der BZE I in Niedersachsen (inkl. Bremen), Sachsen-Anhalt und Hessen

	Niedersachsen		
	BZE I	1996	BZE II (inkl. Bremen)
Beprobte Inventurpunkte	146	204	162 (8 x 8 km-Raster) + 65 (BZE I-Raster)
Baumarten*	Bu, Ei, Fi, Ki, Dgl, Bi, Erl, Stro	Bu, Ei, Fi, Ki, Dgl, Bi, Erl, Stro, Ta	Bu, Ei, Fi, Ki
Alter der Probebäume (zum Zeitpunkt der Probennahme)	> 40 Jahre (bis auf 3 Ausnahmen) 22-207	alle Alter 17-212	alle Alter 10-189
Zeitpunkt der Probennahme	Laubholz: Juli-August 1990 (1991) Nadelholz: Winter 1990/1991	Laubholz und Lärche: Juli-August 1996 Nadelholz: Februar- März 1996	Laubholz: Juli-August 2007 Nadelholz: Winter 2007/2008
Mischproben	Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart	Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart	Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart
Anzahl der Proben	153 Bu 46, Ei 18, Fi 29, Ki 53, Bi 2, Dgl 2, Erl 2, Stro 1	215 Bu 51, Ei 22, Fi 43, Ki 80, Bi 4, Dgl 5, Erl 4, Stro 1, Lä 4, Ta 1	206 (8 x 8 km-Raster) Bu 44, Ei 28, Fi 52, Ki 82 + 71 (BZE I-Raster) Bu 25, Ei 10 Fi 11, Ki 25
Analysierte Nadeljahrgänge	Ki, Str: 1+2; Fi, Dgl: 1-3	Ki, Str: 1; Fi, Dgl, Ta: 1-3	Ki: 1+2; Fi: 1-3

	Sachsen-Anhalt	
	BZE I	BZE II
Beprobte Inventurpunkte	40	67
Baumarten*	Fi, Ki	Bu, Ei, Fi, Ki
Alter der Probebäume (zum Zeitpunkt der Probennahme)	alle Alter 5-191	alle Alter 18-206
Zeitpunkt der Probennahme	Winter 1992	Laubholz: Juli-August 2007 Nadelholz: Winter 2007/2008
Mischproben	Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart	Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart
Anzahl der Proben	40 Ki 32, Fi 8	78 Bu 11, Ei 13, Fi 10, Ki 44
Analysierte Nadeljahrgänge	Ki: 1; Fi: 1+3	Ki: 1+2; Fi: 1-3

(Fortsetzung Tabelle 4)

	Hessen	
	BZE I	BZE II
Beprobte Inventurpunkte	Keine Erhebung	137
Baumarten*		Bu, Ei, Fi, Ki
Alter der Probestämme (zum Zeitpunkt der Probennahme)		alle Alter 12-216
Zeitpunkt der Probennahme		Laubholz: Juli-August 2007 Nadelholz: Winter 2007/2008
Mischproben		Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart
Anzahl der Proben		238 Bu 80, Ei 44, Fi 67, Ki 47
Analysierte Nadeljahrgänge		Ki: 1+2; Fi: 1-3

* Baumarten: Bi (Birke), Bu (Buche), Dgl (Douglasie), Ei (Eiche), Erl (Erle), Fi (Fichte), Ki (Kiefer), Lä (Lärche), Stro (Strobe), Ta (Tanne)

Die Beprobungen auf den Flächen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings entsprachen der Methodik des ICP Forests-Manuals (ICP FORESTS 1998) mit ein- bis zweijährigem Beprobungsturnus. Pro Fläche wurden 6 bis 9 Bäume beprobt.

Bei der BZE I in Sachsen-Anhalt wurden die Probestämme gefällt, daher wurden bei der BZE II andere Probestämme ausgewählt. In Hessen fand im Rahmen der BZE I keine waldernährungskundliche Untersuchung statt.

5.3.3 Vegetationsaufnahmen

Haupterfassungszeitraum für die Bodenvegetation waren die Monate Mai bis September. Auf basen- und kalkreichen Böden (Vorinformation aus der BZE I) wurde eine erste Erhebung bereits im April/Mai vorgenommen, um Frühjahrs-Geophyten zu erfassen. Ein zweiter Aufnahmedurchgang erfolgte bei voller Entwicklung der Waldgräser ab Mitte Juni. Die Waldvegetation bodensaurer Standorte wurde von Mai bis September (notfalls noch im Oktober) aufgenommen. Um eine zeit- und kostenaufwändige zweimalige Begehung zu vermeiden, wurde die Aufnahmereihenfolge an die Gegebenheiten angepasst.

Die Flächengröße der Vegetationsaufnahme am BZE-Punkt beträgt einheitlich 400 m². Die Aufnahmefläche hat immer eine quadratische Form (20 x 20 m). Sie befindet sich möglichst nahe am Bodenprofil, damit eine enge Verbindung von Boden-Kenngrößen und Vegetation gewährleistet ist, und wurde an allen 4 Eckpunkten oberirdisch mit Holzpflocken sowie unterirdisch mit Dauermagneten markiert.

Die Flächenauswahl erfolgte nicht nach Homogenität wie bei pflanzensoziologischen Untersuchungen, sondern nach Kriterien einer systematischen Stichprobe. Ausgehend vom BZE-Mittelpunkt (3 m nordöstlich von der Außenseite des Bodenprofils) liegt die Mittelachse des Quadrates auf der nordöstlichen Linie. Dabei befindet sich der Mittelpunkt der Grundseite (profilnahe Seite) in 1,91 m Entfernung vom BZE II-Mittelpunkt auf dieser Linie (s. Abb. 39). In begründeten Fällen konnte von diesem Schema abgewichen werden. Ausgangspunkt blieb dann der BZE-Mittelpunkt, von dem aus die Fläche durch Drehung nach Südosten verlegt werden kann. War auch die dabei erreichte Fläche ungeeignet, so konnte durch „freies Drehen“ eine geeignete Alternative ausgewählt werden. Als massive Störungen der Bodenvegetation, die ein Abweichen vom Schema rechtfertigten, wurden hier insbesondere angesehen: Erdaushub des Bodenprofils, Waldrandlage, Bestandeswechsel, Fahrwege und Rückelinien.

Auf den so ausgewählten Flächen erfolgte die Erfassung aller Arten der Moos-, Kraut-, Strauch- und Baumschicht mit Schätzung der Deckungsgrade der Gefäßpflanzen in Prozent. Für die Moose, die teilweise erst nachbestimmt werden mussten, erfolgte keine Deckungsgrad-Schätzung. Aufgenommen wurde schließlich noch die Höhe der Vegetationsschichten. Zusätzlich zu dieser Vegetationsaufnahme wurde eine vollständige Artenliste der Gefäßpflanzen für den gesamten 30-m-Probebereich erstellt.

5.3.4 Waldwachstumskundliche Aufnahmen

Der methodische Ansatz und die Ergebnisse der waldwachstumskundlichen Aufnahmen werden in diesem Band nicht aufgeführt, sondern gesondert veröffentlicht.

6 Ergebnisse der Bodenuntersuchungen

6.1 Repräsentativität des Erhebungsnetzes

Jan Evers, Uwe Paar, Swen Hentschel

Die 169 BZE II-Punkte des Landes Niedersachsen (ohne Bremen) liegen auf einem systematischen 8 x 8 km Rasternetz. Inwieweit die Ergebnisse der BZE II als repräsentativ für die Waldfläche Niedersachsens gewertet werden dürfen, wird nachfolgend einerseits durch einen Vergleich mit der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte (BÜK 1000 N; BGR 2007) und andererseits durch einen Vergleich der Standortelemente „Trophie“ sowie „Geländewasserhaushalt“ für den Landes- und Körperschaftswald mit Ergebnissen der niedersächsischen Standortkartierung überprüft.

6.1.1 Vergleich BZE II und BÜK 1000 N

Die BÜK 1000 N stellt bundesweit flächendeckend – differenziert nach den Nutzungstypen Acker, Grünland und Wald – die unterschiedlichen Böden dar. Den 69 Legendeneinheiten der BÜK 1000 N Wald wurden die in der BZE II verwendeten Substratgruppen zugewiesen. Die sich daraus ergebende Verteilung der Substratgruppen nach den Legendeneinheiten der BÜK 1000 N bezogen auf die Koordinaten der BZE II-Punkte lässt sich für die Einschätzung der Repräsentativität mit der Verteilung der Substratgruppen nach der BZE II vergleichen. Weiterhin liefert eine Verschneidung der BÜK 1000 N mit den ATKIS-Walddecker die Verteilung aller Flächen der BÜK 1000 N-Legendeneinheiten für Niedersachsen und damit eine Abschätzung der flächenhaften Verteilung der BZE II-Substratgruppen in Niedersachsens Wäldern. Die jeweilige prozentuale Verteilung ist in Tabelle 5 und Abbildung 40 dargestellt.

Für den Vergleich mit der BÜK 1000 N wurden die Substratgruppen verlehmtter und schwach verlehmtter Sand zusammengefasst, um die Zuordnung mit den Legendeneinheiten der BÜK zu vereinfachen. Die Legendeneinheiten orientieren sich stark an Bodentypen, erst an zweiter Stelle werden die Substrate genannt. Daher sind die Zuweisungen, z. B. zu den Substratgruppen Grauwacke und Tonschiefer, schwierig, da diese Substrate in der BÜK bei den Braunerden mit verschiedenen basenarmen Substraten (z. B. mit Sandstein, Quarzit und Phyllit bzw. Schluff-schiefern und Gneis) zusammen stehen. Dennoch zeigt sich in der Auswertung, dass sich die große Gruppe der unverlehmtten Sande mit 37 % Anteilen in der BZE II auch in der BÜK mit 42 % sowohl punkt- als auch flächenbezogen in ähnlichen Größenordnungen wiederfindet. Auch die Anteile der schwach- und verlehmtten Sande sind mit 13 % in der BZE II gut mit den Werten der BÜK (15 und 13 %)

vergleichbar. Die Lösslehme sind in der BZE II mit rund 11 % stärker vertreten als in der BÜK (rund 8 %). Dies steht aber im direkten Zusammenhang mit der bevorzugten Zuweisung zur Substratgruppe Lösslehm an BZE-Punkten, wenn der überwiegende Anteil bis 90 cm Bodentiefe durch den Löss geprägt wird. Ähnliches gilt für die Zuweisung zu der Substratgruppe „organisch geprägte Standorte“. Hier sind in der BZE II auch Anmoore enthalten, die in der BÜK anderen Einheiten zugeordnet werden. Auch relativ gering vertretene Substratgruppen (Buntsandstein 6 %, Lehm 3,5 %, Granit unter 1 %) finden sich in gut vergleichbaren Größenordnungen in beiden Verteilungen der BÜK wieder.

Zusammenfassend ergibt sich zwischen der BZE II und der BÜK 1000 N für Niedersachsen hinsichtlich der Verteilung der Substratgruppen sowohl punkt- als auch flächenbezogen eine relativ gute Übereinstimmung und damit eine gute Repräsentativität des BZE II-Rasters.

Tabelle 5: Verteilung [%] der Substratgruppen in der BZE II (ohne Bremen), nach BZE II-Koordinaten auf der BÜK 1000 N und nach Flächen aus der Verschneidung mit ATKIS und BÜK 1000 N (Basis Substratgruppen zugewiesen auf die BÜK-Legendeneinheiten; BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Mer: Mergel, Org: organisch geprägte Standorte; Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Substratgruppe	BZE II (ohne Bremen) [%]	BÜK 1000 N an den BZE-Punkten [%]	ATKIS-Verschneidung mit BÜK 1000 N [%]
Suv	37,2	41,9	42,2
Ssv	13,5	14,8	13,2
Loe	10,6	7,7	8,1
Kal	8,2	5,3	4,7
Org	7,6	5,3	5,7
BS	5,9	8,3	7,8
ToS	4,1	0,6	0,9
Leh	3,5	3,6	4,2
Grw	2,9	7,7	6,1
Ton	2,4	0,6	1,3
Grt	0,6	0,6	0,3
Mer	0,0	0,6	1,1
andere	3,5	3,0	4,4

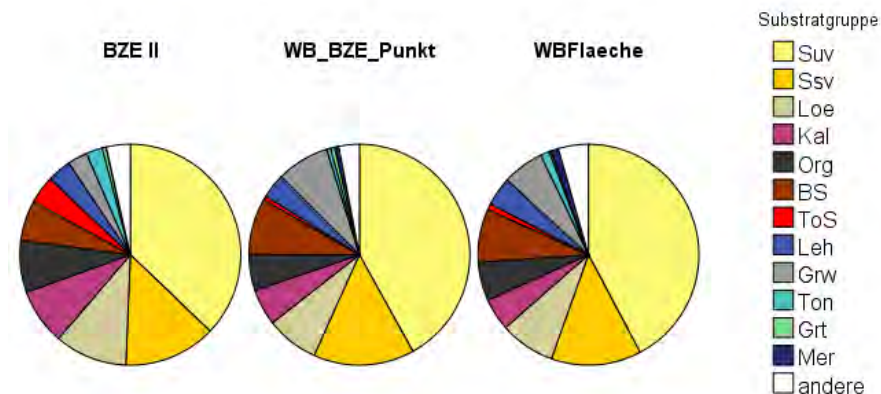


Abbildung 40: Prozentuale Verteilungen der Substratgruppen in der BZE II, nach der Wald-BÜK an den BZE II Punkten (WB_BZE_Punkt) und den mit der Wald-BÜK verschnittenen ATKIS-Daten für Wald (WBFlaeche) in Niedersachsen (Legende der Substratgruppen siehe Tabelle 5)

6.1.2 Vergleich BZE II und Standortkartierung

Für diesen Vergleich werden die Befunde der BZE (Trophiestufen am Profil unter Einbeziehung der Bodenchemie und des Wasserhaushaltes) anhand der Vollaufnahmen der Forstlichen Standortkartierung (punkt- und flächenbezogen) validiert. Für diese Auswertung konnte der Privatwald nicht einbezogen werden, da dort keine vollständige Standortkartierung vorliegt.

6.1.2.1 Trophiestufen

Vergleicht man die Verteilung der Trophiestufen gemäß der Synopse der Standortkartierung der Nordwestdeutschen Bundesländer (SCHMIDT et al. 2015) der BZE-Punkte (profilbezogen mit bodenchemischen Analysen) einerseits mit den punktbezogenen Trophie-Einschätzungen (BZE-Punkt im entsprechenden Polygon) und andererseits mit den flächenhaften Vorkommen der entsprechenden Trophiestufen im Landes- und Körperschaftswald, so dokumentieren die Ergebnisse eine relativ gute Übereinstimmung des BZE II-Rasternetzes mit der Standortkartierung (Spalten 2 und 3 in Tabelle 6).

Tabelle 6: Verteilung [%] der Trophiestufen gemäß der Standortskartierung insgesamt und an den BZE II-Punkten sowie Trophieeinschätzung an den BZE II-Punkten mit BZE-Bodenchemie

Trophiestufe	Nach digitaler Standortstypenkarte für Niedersachsen (ohne Privatwald)* [%]	Trophiestufen nach der Standortstypenkarte an den BZE-Punkten** [%]	Trophieeinschätzung an BZE-Punkten mit BZE-Bodenchemie [%]
eutroph	16	18	21
gut mesotroph	13	7	13
mesotroph	53	56	44
schwach mesotroph	13	18	21
oligotroph	5	1	1

* Flächenanteile in %; Auswertung der digitalen Standortstypenkarten; Datensatz (2017): Landes- und Betreuungswald entsprechend den Angaben im Kapitel 3.2.4

** nach digitaler Standortskarte (Lage im Polygon); Stand 2010; relative Häufigkeiten in %

Die mesotrophen Standorte (Nährstoffziffern 3 bis 4) haben in allen Verteilungen die höchsten Anteile. Nach der Trophieeinschätzung an den BZE II-Punkten (Spalte 4) liegen diese bei 44 % und damit unter den Schätzungen der Standortskartierung an den jeweiligen BZE-Punkten (56 %, Spalte 3) und unter den Werten der digitalen Standortstypenkarte (53 %, 1. Datenspalte). Die Anteile der Trophiestufen eutroph und schwach mesotroph sind hingegen im BZE-Datensatz (Spalte 4) höher. Die oligotrophe Stufe wurde in der Fläche mit einem Anteil von 5 % kartiert, im BZE-Datensatz dagegen nur zu 1 % vergeben sowohl beim punktbezogenen Standortskartierungsdatensatz als auch bei der Einschätzung am Profil. Die Trophiestufe gut mesotroph hat im BZE-Datensatz mit 13 % die gleichen Anteile wie bei der kartierten Fläche, die Anteile dieser Trophiestufe der jeweiligen Polygone der Standortskartierung an den BZE-Punkten ist deutlich geringer. Die Einbeziehung der Bodenchemie in die Trophieeinschätzung ermöglicht eine gesichertere Differenzierung der Trophiestufen. Insbesondere der höhere Anteil mesotropher Standorte nach der digitalen Standortskarte differenziert sich unter Einbeziehung bodenchemischer Kenngrößen deutlich feiner, was zu einer Umverteilung von mesotrophen entweder zu gut mesotrophen oder auch schwach mesotrophen Standorten führt. Dennoch zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung der Standortskartierung mit den Einschätzungen an den BZE-Punkten. Dies spricht für die Aussagekraft und Qualität sowohl der Standortskartierung als auch der BZE.

6.1.2.2 Geländewasserhaushalt

Eine ebenfalls gute Übereinstimmung wird bei dem Vergleich des Geländewasserhaushaltes zwischen der Standortskartierung und BZE II (ohne Privatwald) erreicht. Die Wasserhaushaltgruppe der Täler im Bergland wurde in der BZE II nicht kartiert,

im Datensatz der Standortskarte kommen sie zu 3 % vor. Die Abweichungen in den anderen Geländewasserhaushaltsgruppen betragen nur wenige Prozentpunkte (s. Tab. 7).

Tabella 7: *Verteilung [%] der Wasserhaushaltsgruppen gemäß der Standortkartierung und an den BZE-Punkten*

Wasserhaushaltsgruppe (nach Schlüsselziffer)	Nach digitaler Standortstypenkarte Niedersachsen (Flächenanteile in %; ohne Privatwald)*	Wasserhaushaltsgruppe an den BZE-Punkten (relative Häufigkeiten in %)
nass/staunass	4,7	4,7
grundfeucht bis grundfrisch	9,0	9,3
wechselfeucht	5,4	3,3
wechseltrocken	0,0	0,7
nachhaltig frisch bis frisch	54,5	56,0
mäßig frisch bis trocken	14,8	18,0
Moore	2,5	4,0
sommertrocken	6,0	4,0
Täler	3,1	0,0

* Flächenanteile in %; Auswertung der digitalen Standortstypenkarten; Datensatz (2017): Landes- und Betreuungswald entsprechend der Verteilung im Kapitel 3.2.4

6.2 Bodenmorphologische Kenngrößen

Jan Evers, Uwe Paar, Jörg Weymar

Eine Zielsetzung im Rahmen der Analyse der BZE II für die Trägerländer der NW-FVA ist es, länderübergreifend Muster zur zeitlichen Veränderung von bodenchemischen Kennwerten aufzuzeigen. Als länderübergreifende Stratifizierungseinheiten wurden daher Substratgruppen und Substrat-Lagerungstypen generiert. Zudem wurde eine Synopse der Hauptmerkmale der Forstlichen Standortkartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer erarbeitet (SCHMIDT et al. 2015). Die Überprüfung der Trophieeinstufungen mit metrischen Größen (z. B. Basenvorräte) anhand der BZE II-Ergebnisse ist bereits erfolgt und wurde gesondert veröffentlicht (EVERS et al. 2013a, EVERS u. PAAR 2013).

6.2.1 Substratgruppen

Durch eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern, wurde jedem der 388 BZE-Punkte (Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt) eine Substratgruppe zugeordnet (EVERS et al. 2013b). Die Einteilung der länderübergreifenden Substratgruppen erfolgte nach den Merkmalen

Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Insgesamt werden 16 Substratgruppen unterschieden (s. Tab. 8).

Tabelle 8: Beschreibung der Substratgruppen der nordwestdeutschen Bundesländer nach EVERS *et al.* 2013b

Substratgruppe	Substrate	Kriterien/Merkmale/Herkunft
Buntsandstein	reine Sande bis schluffig, lehmige Sande, tlw. mit Tonsteinwechsellagerung	kalkfreie Buntsandsteinformationen
Lösslehm	feinsandig lehmige Schluffe bis schluffig-schwach tonige Lehme	Mächtigkeit > 70 cm (auch Kolluvien); über silikatarem oder -reichem Ausgangssubstrat; Pleistozän und tlw. Holozän
Basalt/Diabas	überwiegend schluffige Lehme	silikatreiche tertiäre Ergussgesteine und devonische Diabase
Tonschiefer	überwiegend lehmige Tone	z. B. devonische Schieferformationen, Hunsrückschiefer
unverlehnte Sande	Sande und Kiese, Reinsande, schwach schluffige Sande, geringmächtige schluffige Bänder toleriert	Flugsande, Talsande; Wasserabsätze; Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte; Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän
schwach verlehnte Sande	schwach lehmige Sande, schluffige Sande	Geschiebedecksande, Sandlösse; Wasserabsätze > 20 cm Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte, Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän
verlehnte Sande	verlehnte Sande, schluffige Sande, tonige Sande	Geschiebedecksande, Lösssande; Wasserabsätze > 50 cm Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte, Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän
Grauwacke	sandige bis tonige Lehme	z. B. unterkarbonische Grauwacken, Kulmgrauwacken
Ton(stein)	sandige, schluffige, lehmige Tone bis reine Tone	Röt, tertiäre Tone, Marschen, Beckenablagerungen; hier werden auch schluffige Feinsande toleriert
Kalkstein	überwiegend lehmige Tone bis tonige, schluffige Lehme	z. B. Muschelkalk, Keuper, Jura, Geschiebemergel, Kalkgehalt mindestens c4 (carbonatreich)
Lehm	stark lehmige Sande bis tonige Lehme	Hochflutlehme, Auenlehme, Geschiebelehme; Pleistozän und Holozän
Quarzit	schluffige Lehme; sandige, tonige Schluffe	devonische Quarzite
Zechstein/Rotliegendes	verlehnte Sande bis tonige Lehme	Perm: Dolomite, Kalksteine bzw. Sandsteine, Konglomerate
Granit	grusig, sandig, schluffige Lehme	Plutonite
Kreidesandstein	schwach verlehnte bis verlehnte Sande	z. B. Hilssandstein, untere Kreidezeit
organisch geprägte Standorte	organisch geprägte Standorte über diversen Substraten	Hochmoortorf, Niedermoortorf, Übergangsmoor bis Quellmoor, auch Anmoor; Spätpleistozän und Holozän

6.2.1.1 Verteilung der Substratgruppen der BZE II in Niedersachsen

In Niedersachsen kommen 13 der für Nordwestdeutschland insgesamt nach EVERS et al. (2013b) definierten 16 Substratgruppen vor. Für 63 BZE-Punkte (36 %) wurde die Substratgruppe „unverlehmte Sande“ ausgewiesen. 23 BZE-Punkte (13 %) wurden als „schwach verlehmte Sande“ eingruppiert. 10 % der BZE-Punkte werden standörtlich von Lösslehmvorkommen bestimmt. Auf weiteren 16 BZE-Punkten (9 %) finden sich organisch geprägte Standorte (v. a. ehemalige Moore). Kalkstein- und Buntsandsteinstandorte kommen im BZE-Kollektiv mit einem Anteil von 8 % bzw. 6 % vor. Vier Prozent der BZE-Punkte gehören zu den Tonschieferstandorten. Die Substratgruppen „Granit“, „Grauwacke“, „Kreidesandstein“, „Lehm“, „Ton(stein)“ und „verlehmte Sande“ sind jeweils mit Anteilen von rund 1-3 % vertreten (s. Abb. 41).

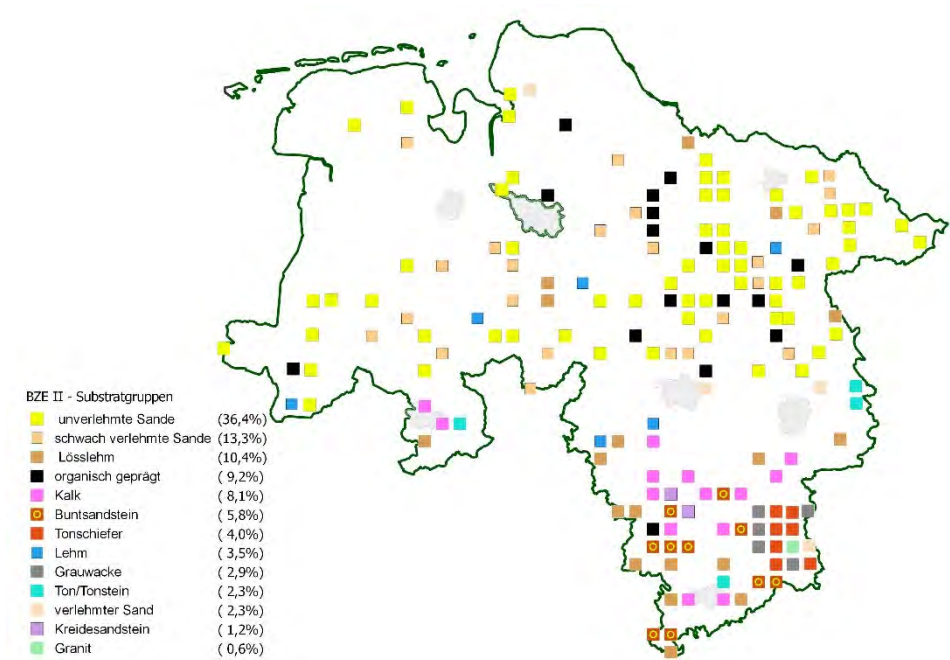


Abbildung 41: Zuordnung der 173 niedersächsischen (inkl. Bremen) BZE II-Punkte zu den Substratgruppen

6.2.1.2 Kalkungen und Substratgruppen

Die untersuchten Waldstandorte unterliegen einer Vielzahl von Umwelteinflüssen. Hinzu kommt die Bodenschutzkalkung als forstliche Maßnahme. Um den aktuellen Zustand der Standorte beurteilen zu können, aber auch um Veränderungen zu bewerten, ist es wichtig, den Einfluss der Kalkung auf die Böden zu untersuchen und von der „natürlichen“ Entwicklung der Böden seit der BZE I zu unterscheiden.

Eine detaillierte Recherche zur Kalkung der BZE-Punkte wurde mittels folgender Schritte realisiert:

- Verschneidung der BZE-Punkte mit dem Kalkungskataster (soweit vorhanden)
- Übernahme der Informationen zum Kalkungsstatus aus der BZE I
- aktuelle Befragungen der Forstämter, Reviere bzw. Waldeigentümer
- Analyse chemischer Parameter des Auflagehumus auf das Vorhandensein von freiem Carbonat auf sonst kalkfreien Standorten

Tabelle 9 zeigt den Anteil der gekalkten und ungekalkten Inventurpunkte je Substratgruppe. In Niedersachsen wurden demnach insgesamt 55 % der BZE-Punkte mindestens einmal gekalkt. 44 % der Punkte sind nicht gekalkt, wovon 30 BZE-Punkte (17 %) nicht zur Kalkungskulisse zählen. Für zwei Punkte (1 %) blieb der Kalkungsstatus ungeklärt.

Tabelle 9: Anzahl und Anteil der gekalkten und ungekalkten BZE-Punkte je Substratgruppe in Niedersachsen (inkl. Bremen) (BZE II)

Substratgruppe	Kalkungsstatus							
	gekalkt		ungekalkt*		unklar		keine Kalkung	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
unverlehmte Sande	32	51	29	46	2	3		
schwach verlehnte Sande	16	70	7	30				
Lösslehm	13	72	5	28				
Kalkstein							14	100
organisch geprägte Standorte							16	100
Buntsandstein	10	100						
Tonschiefer	7	100						
Lehm	4	67	2	33				
Grauwacke	5	100						
verlehmte Sande	2	50	2	50				
Ton(stein)	3	75	1	25				
Kreidesandstein	2	100						
Granit	1	100						
Gesamt	95	55	46	27	2	1	30	17

* ungekalkt bedeutet, eine Kalkung ist vorgesehen, der Punkt gehört also zur Kalkungskulisse, wurde aber bisher noch nicht gekalkt

Von den gekalkten BZE II-Punkten sind 84 % einmal, 14 % zweimal und 2 % dreimal gekalkt worden. Die meisten Kalkungen sind vor der BZE I durchgeführt worden, 42 % sind einmalig vor der BZE I, 14 % zweimal gekalkt (einmal vor der BZE I und einmal zwischen den Erhebungen), 15 % sind einmalig zwischen den Erhebungen und 2 % sind dreimal zu unterschiedlichen Zeiten gekalkt worden. An 27 % der BZE II-Punkte konnte der Kalkungszeitpunkt nicht ermittelt werden.

Von den BZE-Punkten auf Sand-Standorten sind 57 % gekalkt. In Niedersachsen sind alle BZE-Punkte der Substratgruppen Buntsandstein, Tonschiefer, Grauwacke, Kreidesandstein und Granit gekalkt, wobei die letzten beiden Substratgruppen nur mit zwei und einem BZE-Punkt vertreten sind. Die Standorte des Lösslehms der BZE II sind überwiegend (72 %) gekalkt. Kalkstein und organisch geprägte Standorte wurden nicht gekalkt.

6.2.2 *Substrat-Lagerungstypen*

Wichtige Elemente zur Beschreibung des Standortstyps sind u. a. die Bodenart und die Bodenartenschichtung, aus denen Rückschlüsse auf den Luft- und Wasserhaushalt gezogen werden können. In der Verbindung von Bodenart und Bodenartenschichtung mit dem geologischen Ausgangssubstrat sind differenzierte Ableitungen zur Nährstoffversorgung möglich.

Wasserhaushalts- und Nährstoffansprachen, die Kennzeichnung des Bodentyps und die Darstellung der genetischen Bodenentwicklung sind Ableitungen, die ihre Basis auf der Bestimmung der Substrat-Lagerung haben (OTTO 1972). Der Begriff „Substrat-Lagerung“ umfasst die Angaben zur Bodenart und den Lagerungsverhältnissen und entspricht somit der Substratzahl der Forstlichen Standortaufnahme in Niedersachsen (NFP 2007, NFP u. LLUR 2009a, b).

Für sämtliche BZE-Profile der nordwestdeutschen Bundesländer bestimmte eine Expertengruppe aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortkartierern anhand von Profilbeschreibungen und Profildotos die Substrat-Lagerung. Anschließend wurden die 40 möglichen Substratzahlen für den Anwendungsbereich Mittelgebirge, Bergland und Hügelland und die 68 möglichen Substratzahlen für das pleistozäne (diluviale) Tiefland zu insgesamt 33 Substrat-Lagerungstypen zusammengefasst (s. Abb. 42 und Tab. 10).

Die Ausgangssubstrate in Niedersachsen lassen sich dem pleistozänen Tiefland oder dem Bergland zuordnen.

Mit 21 % der niedersächsischen BZE-Profile bilden die unverlehnten Sandsubstrate des Tieflandes die verbreitetste Gruppe. Dieses Substrat ist typisch bei Flugsanden, fluvioglazialen Tal- und Schmelzwassersanden, Sandern sowie auch sehr silikatarmen, Geschiebe führenden Sanden (Typ 2). Etwas stärker geschichtete Sande kommen auf 15 % der Standorte vor, z. B. Talsande mit schluffigen Einlagerungen oder auch mit zwischengeschalteten, stark zerschwemmten Geschiebelehmen, auch überlagert von Flugsanddecken oder bei Grundwassereinfluss mit Moorauflagen

(Typ 5). Schwach verlehmt über unverlehmtten Sanden bilden eine Gruppe von 11 % aller BZE-Standorte, wobei sowohl Sandlöss-Beeinflussung im Oberboden (bis 70 cm), schwach verlehmt Geschiebedecksande als auch gering mächtige, humos-schlickig-feinsandige Wasserablagerungen über unverlehmtten Tal-, Schmelzwasser- bzw. Geschiebesanden vorkommen können (Typ 7). Geschiebelehme unter schwächer verlehmtten Geschiebedecksanden oder unter Sandlöss (bis zu 70 cm) bzw. fluviatile Lehme mit lehmiger Sandüberlagerung liegen wurzelerreichbar auf gut 4 % aller Standorte vor (Typ 9).

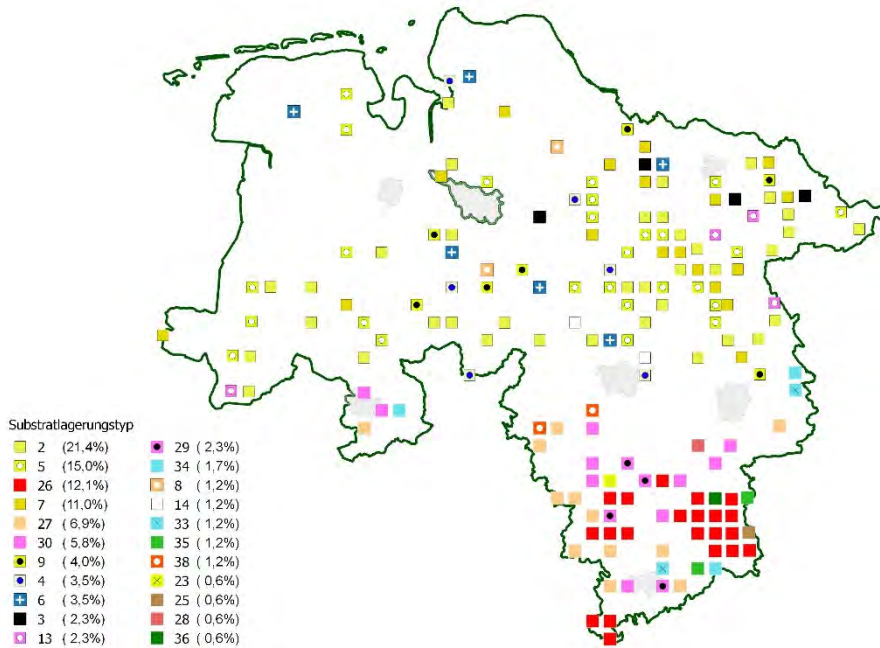


Abbildung 42: Substrat-Lagerungstyp je BZE-Punkt (BZE II) in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Klassifizierung nach der Standortkartierungsanleitung Niedersachsen (NFP 2007, NFP u. LLUR 2009a, b)); Legendenergänzung s. Tab. 10

Tabelle 10: *Legendenergänzung zu Abbildung 42*

Substrat / Lagerung im Tiefland			
Code für Substrat-Lagerungstyp	Hauptbodenart bis 70 cm Unterboden	Substrat/Lagerung nach Rahmenschema ¹	Bemerkung
1	OB: Kies UB: Kies	1.1, 8.1	auch kalkhaltig
2	OB: unverlehmter Sand UB: unverlehmter Sand/Kies	1.2, 2.1, 2.2, 2.3, 2.9	im UB auch kiesig
3	OB: unverlehmter Sand UB: schwach verlehmter Sand	2.6, 3.2, 9.5	im UB auch Sandlöss
4	OB: unverlehmter Sand UB: Lehm	2.7, 2.8, 4.2, 6.3	
5	OB: unverlehmter Sand UB: schluffige Feinsande	2.5, 5.3, 5.6	UB: schluffig, schlickige Feinsande
6	OB: unverl. u. schwach verlehmter Sand UB: Ton*	7.3, 7.4, 7.5	* Beckenabsätze, auch feinsandig, schluffig
7	OB: schwach verlehmter Sand UB: unverlehmter Sand	1.3, 2.4, 3.1, 3.3, 3.4, 5.1, 9.4	OB auch mit Sandlöss u. schluffig schlickig; UB auch mit Kies
8	OB: schwach verlehmter Sand UB: schwach verlehmter Sand	3.5, 3.6, 5.2, 5.4, 5.5, 9.1, 9.2	OB und UB auch mit Sandlöss u. schluffig, schlickig
9	OB: schwach verlehmter Sand UB: Lehm	3.7, 4.3, 4.5, 5.8, 6.4, 9.3	OB auch mit Sandlöss
10	OB: Lehm UB: unverl. u. schw. verl. Sande/Kiese	1.4, 4.1, 6.1, 6.2, 6.5	
11	OB: Lehm/Ton* UB: Lehm/Ton*	4.4, 4.6, 6.6, 6.8, 7.1, 7.2, 7.6	* Beckenabsätze, auch feinsandig, schluffig
12	Mergel oder Kalk bis oben	7.8, 8.6, 8.7	
13	Mergel/Kalk unter versch. Decken	3.9, 4.7, 5.7, 6.7, 7.7, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 9.6	
14	Moore	Römisch I bis V	
15	Übererdete Moore u. Humushorizonte	5.9, 6.9	

OB = Oberboden, UB = Unterboden

¹ NFP u. LLUR 2009a, b

(Fortsetzung Tabelle 10)

Substrat / Lagerung im Bergland		
Code für Substrat-Lagerungstyp	Beschreibung	Substrat/Lagerung nach Rahmenschema ²
22	Felsen, Blockhalden, Geröll, Kies, feinbodenarme Gesteinsböden	1.1, 1.2
23	maximal anlehmige Sande (≤ 70 cm) über basenarmem Silikatgestein	1.3, 2.1
24	skelettreiche und unverlehmte Decken (≤ 70 cm) über Ton, Kalk oder basenreichem Untergrund	1.4, 1.5
25	schluffige, verlehmte Decken (≤ 70 cm) über Geröll, Schotter, Kies oder Sand	1.6
26	lehmige/schluffige sandige Decken (≤ 70 cm) über basenarmem Silikatgestein	2.2, 2.3
27	Lösslehm (≥ 70 cm), auch vermischt über basenarmem Silikatgestein	3.1, 3.2, 3.4, 3.5
28	Lösslehm und verlehmte Fließerden (≥ 70 cm) über Kalk und basenreichem Untergrund	2.5, 3.3
29	geringmächtige Kalksteinböden (≤ 20 cm) mit geringem Feinbodenanteil	4.1, 4.2
30	Löss- und Mischlehm (≤ 70 cm) über Kalkstein- und Verwitterungsprodukten	4.3, 4.4
31	kalkhaltige Fließerden (≥ 30 cm) über basenreichem Untergrund oder Ton	4.5, 4.8
32	kalkhaltige Fließerden (≥ 30 cm) über basenarmem Grundgestein	4.6
33	Tonböden mit geringen Deckschichten (≤ 30 cm), auch Bröckeltone	5.1, 5.2, 5.5
34	sandige/lehmige Fließerden ($30 - \leq 70$ cm) über Ton, auch Bröckeltone	2.4, 5.3, 5.6
35	feinbodenarme Decken (≤ 40 cm) über basenreichem Grundgestein (c3 max.)	6.1, 6.2
36	feinbodenreiche Decken (≤ 70 cm) über basenreichem Grundgestein (c3 max.)	6.3
37	basenreiche Mischlehme (≥ 30 cm) über basenarmem oder kompaktem Grundgestein	2.6, 5.4, 6.4, 6.5
38	Kolluvien und Alluvien über basenarmem oder basenreichem Grundgestein, kein Stau	7.1, 7.2, 7.3
39	Kolluvien und Alluvien mit Stau im Untergrund	7.4

² NFP 2007

Im Bergland bilden die basenarmen Silikatgesteine eine heterogene und weit verbreitete Gruppe von Ausgangsgesteinen, wie z. B. Sandstein (aus dem Buntsandstein, aber auch anderen Formationen), Quarzit, Kieselschiefer, Granit, Grauwacke und Tonschiefer, aber auch basenarme Fließerden. Zweischichtige Böden aus lehmig-sandigen bis schluffig-lehmigen Decken (Lösslehm-Einfluss 20 bis 70 cm) über basenarmen Silikatgesteinen kommen auf über 12 % der BZE-Standorte vor (Typ 26). Mächtigere Lösslehmstandorte (über 70 cm) über basenarmen Silikatgesteinen treten auf 7 % auf. Dabei überwiegen durch Fließerde-Bildung mit Fremdmaterial vermengte Lösslehme. Darüber hinaus kommen typische, unvermengte Lösslehme und Feinlehme mit Staukörper vor (Typ 27). Mächtigere Mischlehme über Kalksteinen unterschiedlicher Formationen bzw. Kalk-Verwitterungsprodukten (häufig in Fließerden und mit Löss-Einfluss von 20 cm bis 70 cm) bilden Waldstandorte auf knapp 6 % der Standorte (Typ 30).

6.2.3 Bodentypen

Bodentypen unterscheiden sich nach charakteristischen Horizonten und Horizontfolgen, die spezifische pedogene Prozesse in den Ober- und Unterbodenhorizonten widerspiegeln (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Bodentypen lassen sich nach qualitativen Kriterien in Subtypen mit spezifischer Horizontabfolge untergliedern. Es werden drei Arten von Subtypen unterschieden:

- Normsubtyp
- Abweichungssubtyp
- Übergangssubtyp

Der Normsubtyp wird durch eine charakteristische Horizontabfolge gekennzeichnet, die der regulären Horizontabfolge des Typs entspricht. Abweichungstypen müssen prinzipiell die Horizonte des Typs (bzw. des Normsubtyps) aufweisen, besitzen jedoch zusätzliche abweichende Merkmale. Bei Übergangstypen treten stark ausgeprägte Merkmale anderer Typen hinzu. Zur Bezeichnung von Übergängen können die Namen zweier Typen bzw. eines Typs und eines Abweichungstyps kombiniert werden, wobei der zuletzt genannte die Zuordnung bestimmt. Für die Auswertung wurde der Bodentyp je BZE-Profil auf der Basis der Subtyp-Informationen ggf. bis zur Varietät abgeleitet.

Abbildung 43 verdeutlicht, dass auf den niedersächsischen Waldstandorten zwei Hauptbodentypen dominieren: im Bergland die Braunerden und im Tiefland die Podsole. Insgesamt sind 33 % der BZE-Punkte in Niedersachsen durch den Bodentyp Braunerde gekennzeichnet (s. Abb. 44 a u. b). Auf 24 % der BZE-Punkte sind Podsole (s. Abb. 44 c u. d) zu finden. Darüber hinaus wurde für 8 % der BZE-Punkte der Bodentyp Pseudogley (s. Abb. 44 e u. f) ausgewiesen. Auf 6 % finden sich Parabraunerden (s. Abb. 45 a u. b) und auf je 6 % der BZE-Punkte Treposole

(s. Abb. 45 c. u. d) bzw. Gleye (s. Abb. 45 e u. f). Diese Hauptbodentypen charakterisieren insgesamt 83 % der niedersächsischen BZE-Punkte. Auf den restlichen BZE-Standorten finden sich Moore, Pelosole, Ranker, Kolluvisole, Regosole, Rendzinen und Terraefuscae sowie Plaggeneschböden mit prozentualen Anteilen von jeweils rund 1-4 %.

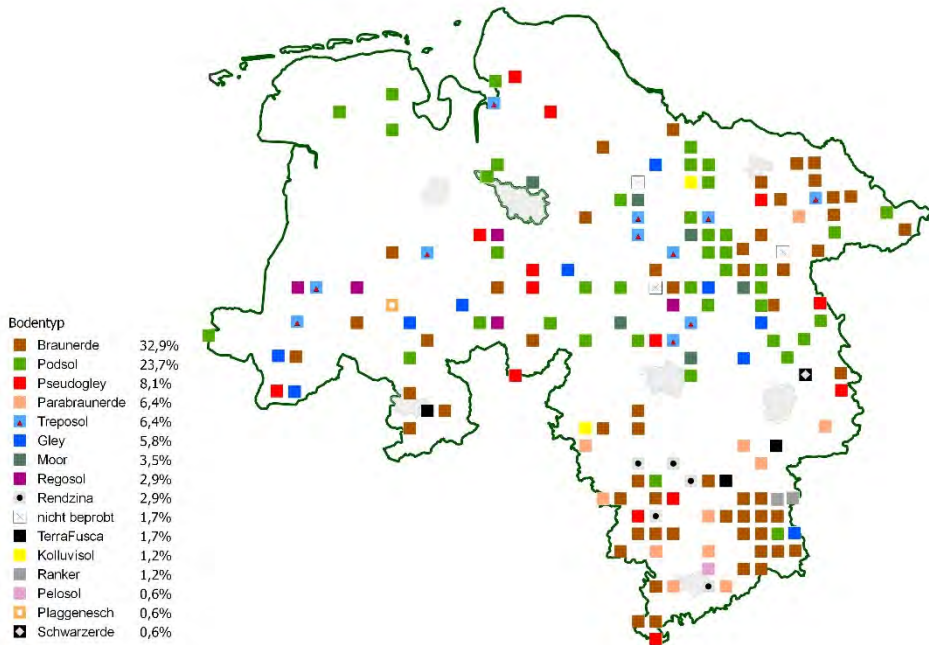


Abbildung 43: Bodentypen der BZE-Punkte in Niedersachsen (inkl. Bremen) (BZE II)

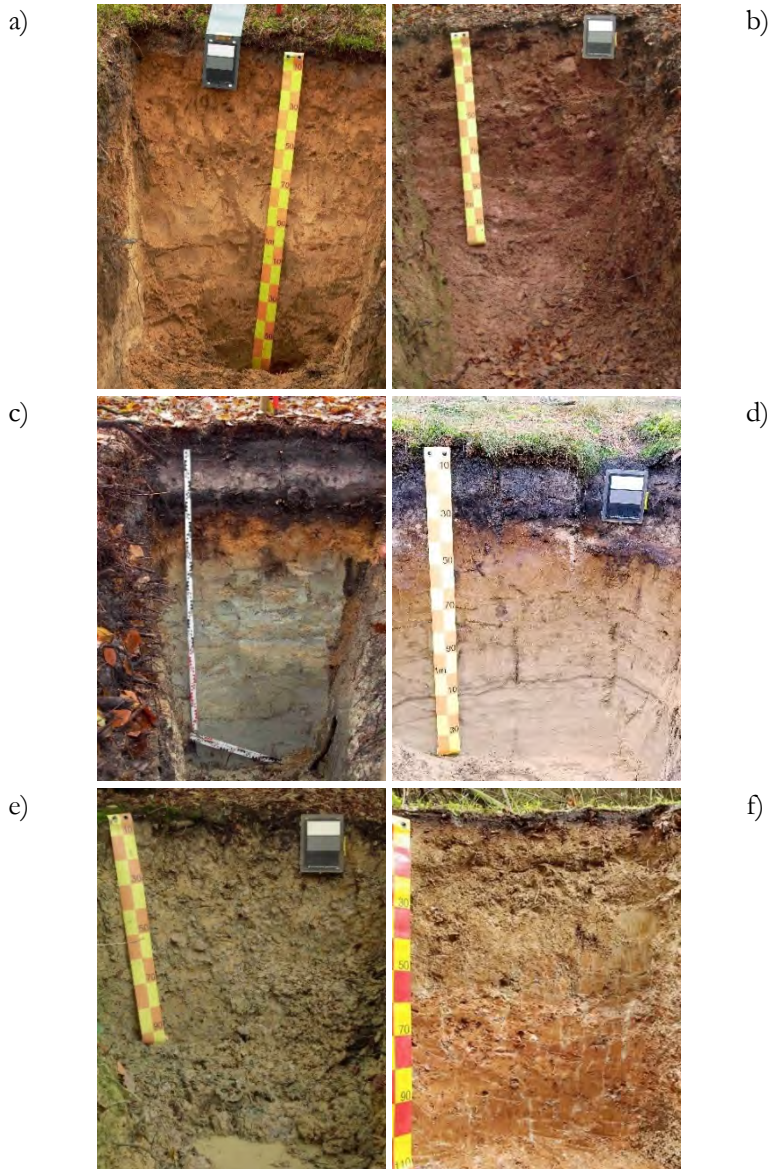


Abbildung 44: Die häufigsten Bodentypen in Niedersachsen: Braunerde (Podsol-Braunerde) aus Geschiebedecksand über Schmelzwassersanden (a), Braunerde (schwach podsolige Braunerde) aus Lösslehmfließerde über Buntsandstein (b), Podsol (Gley-Podsol) aus Flugsand über Talsand (c), Podsol aus Flugsand über Talsand (d), Pseudogley (Pelosol-Pseudogley) aus Fließerde über Jura-Ton (e), Pseudogley aus umgelagerten Lösslehmen (f)

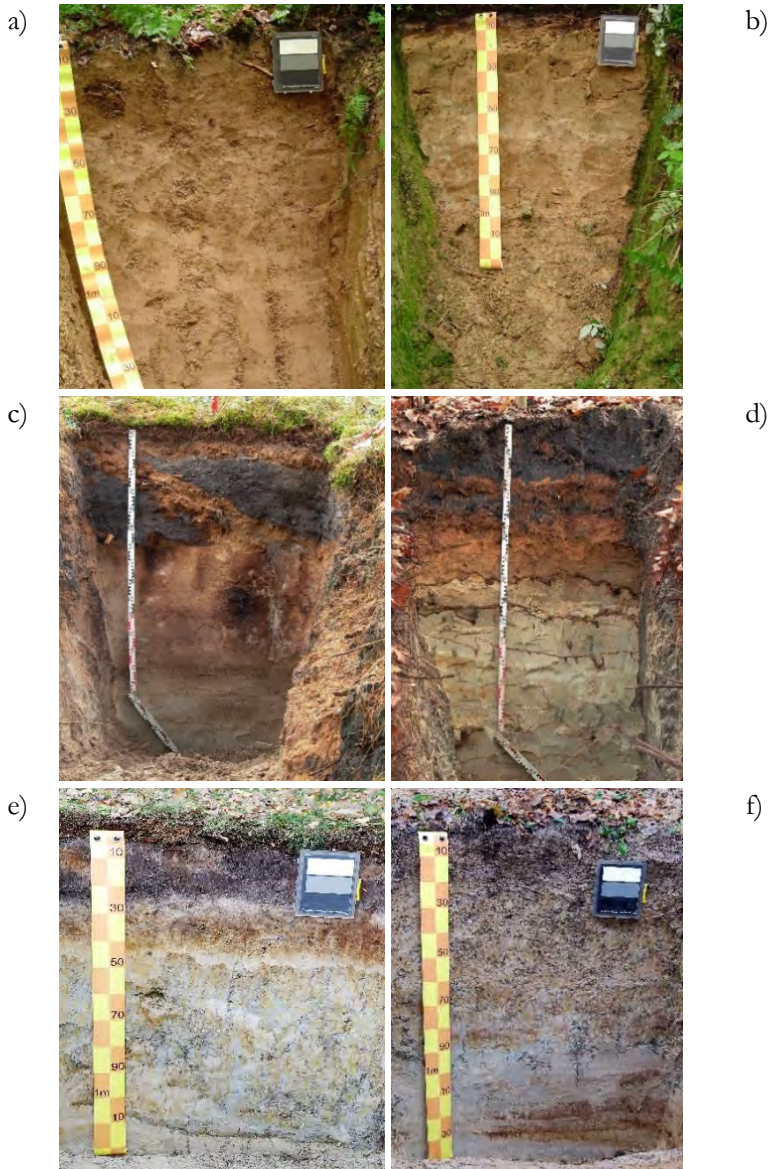


Abbildung 45: Die häufigsten Bodentypen in Niedersachsen: Parabraunerde (Kolluvium-Parabraunerde) aus Kolluvium über Lösslehm (a), Parabraunerde (mäÙig podsolige, pseudovergleyte Parabraunerde) aus Lösslehm über quarzitischen Sanden (b), Treposol (Podsol-Treposol) aus Flugsand über Talsand (c), Treposol (Podsol-Treposol) aus Geschiebedecksand über Schmelzwassersand (d), Gley (schwach podsoliger Gley, gepflügt) aus Auenablagerungen (e), Gley (Pseudogley-Gley) aus Auenablagerungen (f)

6.2.3.1 *Bodentypen nach Substratgruppen*

Ordnet man das Vorkommen von Bodentypen den Substratgruppen zu, so zeigen sich die folgenden Ergebnisse:

Auf 41 % der BZE-Standorte mit unverlehmtem Sand als Substratgruppe sind Podsole ausgebildet. Weitere 24 % der Standorte dieser Substratgruppe sind durch Braunerden gekennzeichnet. Treposole kommen mit einem Anteil von 10 % vor.

Charakteristische Bodentypen innerhalb der Substratgruppe schwach verlehnte Sande in Niedersachsen sind Braunerden (43 %), Podsole (17 %), Treposole (13 %) und Pseudogleye (13 %).

Die Substratgruppe Lösslehm ist durch das Vorkommen der Bodentypen Parabraunerde (39 %), Braunerde (33 %) und Pseudogleye (28 %) gekennzeichnet.

Auf den organisch geprägten Standorten sind zumeist verschiedene Varianten von Moorböden (46%) zu finden. Darüber hinaus finden sich in dieser Substratgruppe zwei Anmoorpseudogleye, zwei Niedermoorgleye, ein Anmoorgley, ein Moorgley und ein Gley-Treposol.

In der Substratgruppe Kalkstein zeigen sich vorrangig die Bodentypen Rendzina (26 %) sowie Terra fusca und Braunerde mit je 21 %.

Für den Buntsandstein im niedersächsischen BZE-Kollektiv sind Braunerden charakteristisch.

6.2.4 *Humusformen*

Als Humus bezeichnet man die zersetzten und umgeformten Bodenbestandteile pflanzlicher oder tierischer Herkunft. Die organische Substanz kann als Auflagehumus (Humusdecke) dem Mineralboden aufliegen oder im mineralischen Boden verteilt sein. Die Humusdecke lässt sich in die Streulage (L), die Vermoderungslage (Of) und die Humifizierungslage (Oh) unterteilen (HOFMEISTER 2004). Humusformen, die noch keinen durchgehenden Oh mit mehr als 5 mm Mächtigkeit entwickelt haben, heißen Mineralbodenhumusformen. Alle Humusformen, die einen Oh-Horizont mit mehr als 5 mm besitzen, werden als Auflagehumusformen bezeichnet (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Die Einordnung der Humusform erfolgte in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Die Humusform wurde an acht Satellitenpunkten pro Inventurpunkt erhoben. Auf der Basis dieser Einzelerhebungen wurde für jeden Inventurpunkt eine dominante Humusform abgeleitet. Die Auswertung erfolgte auf der Ebene Subtyp und Varietät (WELLBROCK et al. 2006, s. Tab. 11).

6.2.4.1 Verteilungen der Humusformen

Insgesamt ca. 20 % der niedersächsischen BZE II-Punkte zeigen den Humustyp Mull, wobei der Typische Mull nur auf 12 Inventurpunkten vorkam. Für 22 Punkte wurde F-Mull kartiert. Der Anteil von BZE-Punkten mit der Humusform Mull-artiger Moder liegt bei 9 %. Moder-Standorte haben insgesamt einen Anteil von 40 % (feinhumusarm: 43 %, feinhumusreich: 57 %). Rohhumusartige Humusformen sind auf 9 % der Inventurpunkte festzustellen. Die schlechtesten Humusformen (Typischer Rohhumus-feinhumusarm bzw. feinhumusreich) sind auf nur 5 % der niedersächsischen BZE-Punkte ausgeprägt (s. Abb. 46). Auf 10 % der BZE-Punkte findet sich die Sonderform „Graswurzelfilzmoder“.

Der Anteil der Mull-Humusformen hat sich von der BZE I zur BZE II in Niedersachsen nicht verändert. Deutlich verringert hat sich dagegen der Anteil von Standorten mit Rohhumus von 14 % bei der BZE I auf 5 % bei der BZE II. Neben dem moderaten Abbau der Auflagehumusdecken zwischen den Inventuren ist damit auch eine qualitative Verbesserung der Humusformen vom Rohhumus zu besseren Humusformen im Moder verbunden.

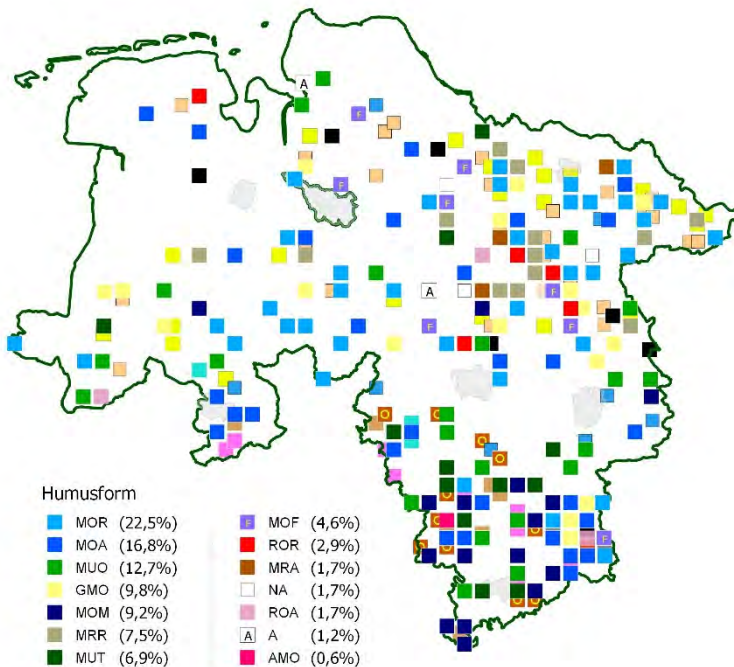


Abbildung 46: Humusform der BZE-Punkte in Niedersachsen (inkl. Bremen) (BZE II), Abkürzungen der Humusformen s. Tab. 11

Tabelle 11: Humusformen (nach WELLBROCK et al. 2006), Legende zu Abb. 46

Typ	Subtyp	Varietät	BZE I	Bedeutung	Bemerkung
	Kürzel BZE II				
Aeromorphe Humusformen					
MU	MUT		mu, mup, muk, muw	Mull Typischer Mull	Ah basenreich
	MUO		muf, mus	F-Mull	
MO	MOM	MOA MOR	mou	Mullartiger Moder	Oh locker, bröckelig
	MOT		mot	Typischer Moder	
	GMO TA MR		mota	- feinhumusarm	Oh < 2 cm
			motr	- feinhumusreich	Oh ≥ 2 cm
		SHGM	Graswurzelfilzmoder	Sonderform	
	MRA MRR	ta	Tangel	Oh unscharf, brechbar	
		mor	Rohhumusartiger Moder	Oh < 3 cm	
		- feinhumusarm - feinhumusreich	Oh ≥ 3 cm		
RO	ROT	ROA ROR	rot	Rohhumus Typischer Rohhumus	Oh scharfkantig, brechbar
			rota	- feinhumusarm	
	ror		- feinhumusreich	Oh ≥ 4 cm	
	HMO	SHHA, SHMO	Hagerhumus	Sonderform	
	SRO	SHRO	Streunutzungs- Rohhumus	Sonderform	
Hydromorphe Humusformen (L-, Of-, Oh-Horizonte schmierig feucht, A-Horizonte hydromorph (Sw-Ah, Go-Ah))					
MUF			amu	Feuchtmull	Aa-Horizont, Oh fehlend
MOF			amo	Feuchtmoder	
ROF			aro	Feuchtrohumus	
AMO			am	Anmoor	
NA = Nicht angesprochen (Humusform konnte nicht bestimmt werden)					
A = Andere (nicht zu kategorisierende Humusform)					

6.2.4.2 Veränderung der Trockenmasse im Auflagehumus

Die durchschnittliche Trockenmasse des Auflagehumus für alle BZE-Punkte in Niedersachsen hat sich von 75,5 t/ha bei der BZE I rechnerisch um 7 t/ha auf 68,5 t/ha verringert (s. Tab. 12). Da das Erhebungsnetz der BZE in Niedersachsen für die BZE I und II verschieden ist, basiert diese rechnerische Differenz auf unterschiedlichen Kollektiven von BZE-Punkten. Exakter für die Beschreibung von Veränderungen der Trockenmasse im Auflagehumus sind die Differenzen nur der BZE-Punkte, die auch in beiden Erhebungen beprobt wurden. Diese Differenz ist in Tabelle 12 angegeben und weist eine Abnahme von nur noch 3,7 t/ha auf, die ebenfalls nicht signifikant ist. Die hohen Standardabweichungen werden durch die weite Spanne der Trockenmassen des Auflagehumus vom Mull zum Rohhumus der BZE-Punkte in Niedersachsen bestimmt. Die wesentlich geringeren Standardfehler zeigen jedoch, dass der Mittelwert als relativ gut belastbar angesehen werden kann.

Tabelle 12: Durchschnittliche Trockenmasse des Auflagehumus bei der BZE I und II in Niedersachsen sowie Veränderungen [t/ha], *signifikant auf dem 5 % Signifikanzniveau

Trockenmasse des Auflagehumus		BZE I	BZE II	Differenz (nur gepaarte Stichprobe)	p
insgesamt	Mittel	75,5	68,5	-3,7	
	n	209	170	111	
	SE	3,9	4,2	4,9	
	SD	55,8	54,8	51,5	
Kalkung entfällt	Mittel	49,5	50,9	-10,1	
	n	33	29	15	
	SE	11,5	10,6	8,2	
	SD	66,3	57,2	31,8	
gekalkt	Mittel	84,1	67,5	-10,3	*
	n	114	94	69	
	SE	5,3	5,4	6,0	
	SD	56,8	51,9	49,9	
ungekalkt	Mittel	73,6	81,3	16,9	
	n	62	47	27	
	SE	5,4	8,3	11,5	
	SD	42,8	56,8	60,0	

n = Anzahl, SE = Standardfehler des Mittelwertes, SD = Standardabweichung des Mittelwertes

Werden die BZE-Punkte hinsichtlich ihres Kalkungsstatus stratifiziert, zeigt sich ein leichter, nicht signifikanter Anstieg der Trockenmasse des Auflagehumus in dem Kollektiv „Kalkung entfällt“, jedoch ein deutlicher Rückgang der mittleren Differenzen aller BZE-Punkte dieses Kollektives, die sowohl bei der BZE I als auch bei der BZE II beprobt wurden. Dieser Rückgang ist nicht signifikant. Die relativ hohen Streumaße, vor allem auch der Standardfehler des Mittelwertes, belegen die hohe

Variabilität bei geringer Stichprobenanzahl. In diesem Kollektiv sind zudem die Kalksteine und organisch geprägten Standorte enthalten, die an sich schon sehr verschiedene Humusformen aufweisen.

Im Kollektiv „gekalkt“ finden sich vor allem die Standorte der unverlehnten und schwach verlehnten Sande, die Lösslehme, Buntsandstein, Tonschiefer und Grauwacke. Hier zeigt sich ein signifikanter Rückgang der Trockenmassen der Humusaufgaben von 84,1 t/ha auf 67,5 t/ha. Dies ist ein Rückgang um knapp ein Fünftel der Trockenmasse, der auch signifikant ist. Die mittleren Differenzen ergeben mit 10,3 t/ha ebenfalls einen signifikanten Rückgang, der aber mit 12 % bezogen auf die Trockenmasse der BZE I geringer ausfällt.

Im Kollektiv „ungekalkt“ wurde dagegen ein nicht signifikanter Anstieg der Trockenmasse zur BZE II hin festgestellt, der mit 7,7 t/ha einen Anstieg um 10 % und bezogen auf die mittleren Differenzen einen Anstieg um 23 % bezogen auf die BZE I bedeutet. Im Vergleich zum Kollektiv „gekalkt“ ist im Kollektiv „ungekalkt“ die Stichprobenzahl wesentlich geringer, was bei ähnlichen Streuungen zu höheren Standardfehlern führt und den Nachweis statistischer Unterschiede erschwert.

Die Trockenmasse im Auflagehumus wird i. d. R. von der Baumartenzusammensetzung der jeweiligen Bestände (Bestandestyp) beeinflusst. Mit zunehmendem Anteil von Nadelholz erhöht sich die Trockenmasse (s. Abb. 47): In den von Laubholz bestimmten Bestandestypen Buche, sonstiges Laubholz (z. B. Birke, Erle, Rot- eiche, Ahorn oder Esche) und Eiche liegen die durchschnittlichen Trockenmassen des Auflagehumus bei der BZE II überwiegend zwischen 20 und 40 t/ha, im Laubmischwald (bis 30 % Nadelholzanteil möglich) bei 62 t/ha und in den von Nadelholz bestimmten Bestandestypen zwischen 70 und 105 t/ha. Hohe Massen im Auflagehumus können aber auch unter Laubwald auftreten, wie die Extremwerte bei Buche und Eiche zeigen. Ebenso sind geringe Massen im Auflagehumus unter Nadelholz möglich.

Die Trockenmassen im Auflagehumus sind in den Substratgruppen sehr unterschiedlich (s. Abb. 48). Die geringsten Auflagen finden sich auf den besser versorgten Standorten des Kalksteins (Kal) mit durchschnittlich 18 t/ha. Es folgen die Substratgruppen Lehm (Leh), Buntsandstein (BS) und Ton(stein) (Ton) mit Auflagen um 30 t/ha Trockenmasse. Deutlich mächtigere Auflagen um knapp 50 t/ha durchschnittlicher Trockenmasse finden sich bei den Lösslehmen (Loe) und verlehnten Sanden (Sve), jeweils mit einigen für diese Substratgruppen relativ hohen Auflagen. Mit Werten um 70 t/ha folgen die Tonschiefer (ToS) und Grauwacke (Grw). Die mächtigsten Auflagen mit Werten zwischen 80 und 90 t/ha durchschnittlicher Trockenmasse wurden in den Substratgruppen Granit (Grt), schwach verlehmtter Sand (Ssv), Kreidesandstein (KSs), unverlehmtter Sand (Suv) und organisch geprägte Standorte (Org, ohne Berücksichtigung der Torfaufgabe) festgestellt, also den eher ärmeren Waldstandorten. Auf diesen Standorten sind die Nadelholzanteile i. d. R. höher, daher gibt es auch Korrelationen zwischen den Substratgruppen und Bestandestypen.

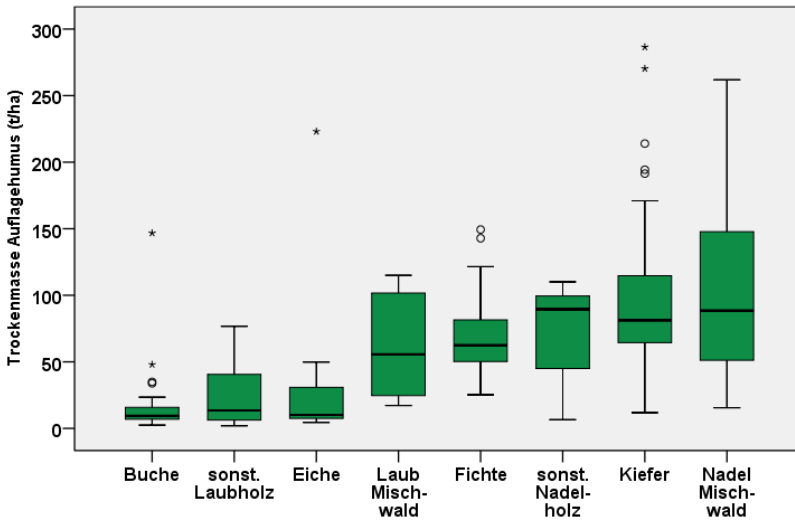


Abbildung 47: Trockenmasse im Auflagehumus [t/ha] bei der BZE II in Niedersachsen nach Bestandestypen

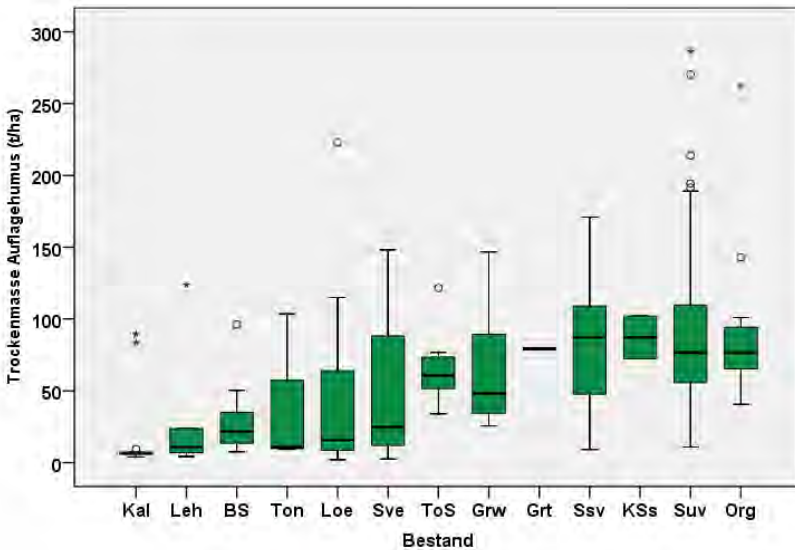


Abbildung 48: Trockenmasse im Auflagehumus [t/ha] bei der BZE II in Niedersachsen nach Substratgruppen (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.3 Bodenphysikalische Kenngrößen

Jan Evers, Uve Paar

Eine zentrale Größe für die Bewertung der Ergebnisse der BZE II ist der jeweilige Elementvorrat im Auflagehumus und Mineralboden von Wäldern. So spielen z. B. der Kohlenstoffvorrat und seine Veränderung eine wichtige Rolle im Klimaschutz. Die Vorräte der wichtigsten Nährelemente im Mineralboden und ihre Veränderung sind außerdem wichtige Indikatoren einer nachhaltigen Nutzung von Wäldern, gerade vor dem Hintergrund von Vollbaumnutzungen und Waldkalkungen.

Definitionsgemäß sind im Mineralboden Korngrößen unter 2 mm Siebdurchmesser als Feinboden und ab 2 mm als Grobboden definiert (AD-HOC ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Bei der Vorratsberechnung ist zunächst der Vorrat des Feinbodens zu bestimmen, der dann multipliziert mit der jeweiligen Elementkonzentration den Elementvorrat ergibt. Der Feinbodenvorrat (t/ha) ergibt sich aus seiner Trockenrohddichte (g/cm^3) abzüglich des Grobbodenanteils (Vol.-%) bezogen auf die jeweilige Schichtmächtigkeit (cm).

Im Rahmen der BZE II wurden die bodenphysikalischen Kenngrößen Trockenrohddichte des Feinbodens und der Grobbodenanteil jeweils gemäß der BZE-Tiefenstufen in den BZE-Profilen Niedersachsens analytisch bestimmt. (GAFA 2005, 2014). Aus diesen Messdaten und der jeweiligen Schichtmächtigkeit wird der Feinbodenvorrat programmgestützt berechnet und für die Berechnung der Elementvorräte verwendet. Die bei der BZE I am Profil geschätzten Grobbodenanteile lagen im Mittel über den tatsächlichen Messwerten der BZE II. Damit wurden die Feinbodenvorräte bei der BZE I unterschätzt. Um Auswertungen auf möglichst einheitlicher Datenbasis mit möglichst genauen und vergleichbaren Messwerten sicherstellen zu können, wurden die Grobbodenanteile der BZE II auch für die BZE I verwendet. Bei den in der BZE I gemessenen Trockenrohddichten wurden bereits die Steine in den Stechzylindern berücksichtigt, sodass diese Trockenrohddichten bei der Berechnung der Feinbodenvorräte der BZE I eingingen.

6.3.1 *Trockenrohddichten des Feinbodens*

Die Trockenrohddichten des Feinbodens (s. Abb. 49) steigen im Allgemeinen mit zunehmender Bodentiefe kontinuierlich an, unterscheiden sich aber in Abhängigkeit von den Substratgruppen. Die geringsten Trockenrohddichten finden sich bei organisch geprägten Standorten, aber auch bei Tonschiefer, Grauwacke, Kreidesandstein und Granit mit Werten von unter $0,8 \text{ g}/\text{cm}^3$ in 0-5 cm und 5-10 cm Bodentiefe. Sie sind Ausdruck der hohen Humusgehalte und des lockeren Mineralbodens direkt unterhalb des Auflagehumus. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Trockenrohddichten des Feinbodens dieser Substratgruppen auf bis zu $1,2\text{-}1,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ an. Der Granit erreicht sogar $1,6 \text{ g}/\text{cm}^3$ in 60-90 cm Bodentiefe. Wesentlich höhere Tro-

ckenrohndichten des Feinbodens im Oberboden finden sich bei den übrigen Substraten. Besonders auffällig sind die hohen Werte für die unverlehmten und schwach verlehnten Sande mit Trockenrohndichten des Feinbodens um $1,1 \text{ g/cm}^3$ im Oberboden. Alle Trockenrohndichten des Feinbodens dieser Substrate steigen mit zunehmender Bodentiefe an und erreichen mit Werten von $1,4$ bis $1,6 \text{ g/cm}^3$ die höchsten Werte in der Tiefenstufe 60-90 cm.

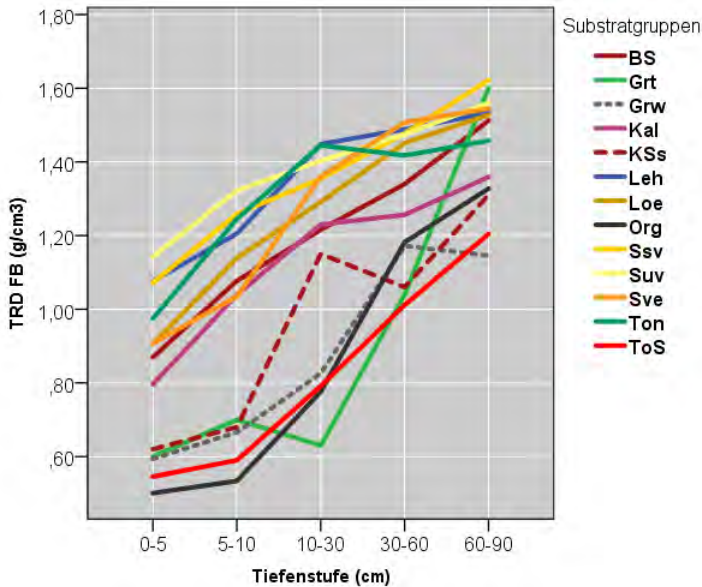


Abbildung 49: Trockenrohndichten des Feinbodens (TRD FB) [g/cm^3] in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Tiefenstufen [cm] und Substratgruppen (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Tonstein), ToS: Tonschiefer)

6.3.2 Grobbodenanteil

Auch beim Grobbodenanteil finden sich typische Muster für die Substratgruppen: Die Grobbodenanteile nehmen mit zunehmender Bodentiefe deutlich zu (s. Abb. 50). Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Substratgruppen. Die Profile der Substratgruppe Grauwacke weisen die höchsten Grobbodenanteile mit 36 Vol.-% in 0-5 cm und 54 Vol.-% in 60-90 cm Bodentiefe auf. Der Granit hat in der Tiefenstufe 60-90 cm mit 71 Vol.-% noch höhere und damit die höchsten Grobbodenanteile. Es folgen die Substratgruppen Kalkstein, Tonschiefer, Kreidesandstein und Buntsandstein mit Grobbodenanteilen in Höhe von 12-20 Vol.-% in 0-5 cm und 40-50 Vol.-% in 60-90 cm Bodentiefe. Relativ geringe

Grobbodenanteile von überwiegend unter 10 Vol.-% weisen die Sande, Tone, Lösslehme und organisch geprägten Standorte auf.

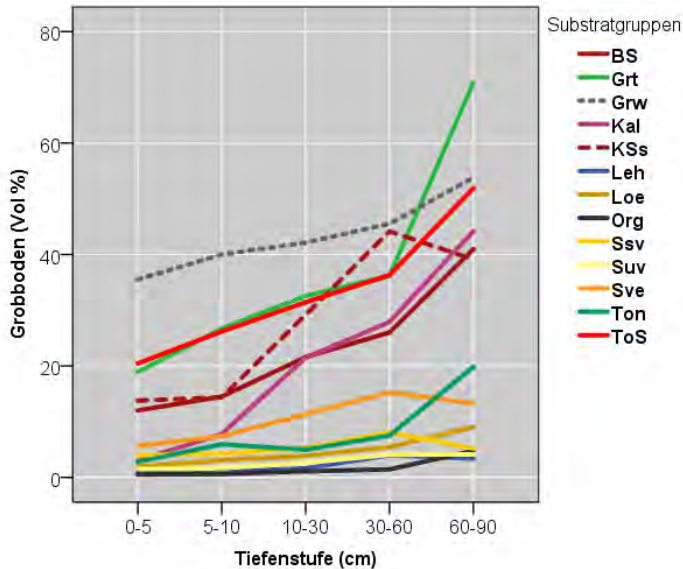


Abbildung 50: Grobbodenanteile [Vol.-%] in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Tiefenstufen [cm] und Substratgruppen (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.3.3 Feinbodenvorrat

Entsprechend der unterschiedlichen Trockenrohdichten des Feinbodens, der Grobbodenanteile und der Gründigkeit ergeben sich für die BZE II-Punkte in den jeweiligen Substratgruppen deutliche Differenzierungen hinsichtlich der Feinbodenvorräte (s. Abb. 51).

Die Spanne der mittleren Feinbodenvorräte bis 90 cm Bodentiefe je Substratgruppe reicht von 4.700 t/ha für Grauwacke bis zu über 12.000 t/ha bei den Sanden und Lehmen. Diese weite Spanne erklärt sich durch geringe Trockenrohdichten und hohe Grobbodenanteile in der Substratgruppe Grauwacke und durch relativ hohe Trockenrohdichten und geringe Grobbodenanteile bei Sand und Lehm. Die mittleren Feinbodenvorräte der anderen Substratgruppen liegen je nach Kombination der Trockenrohdichte und Grobbodenanteile zwischen diesen Extremen, teilweise mit weiten Spannen und Überschneidungen, aber auch deutlichen Mustern. Die Böden mit hohen Grobbodenanteilen (Grauwacke, Granit, Tonschiefer und Kalk-

stein) haben häufig auch geringe Trockenrohdichten und daher relativ geringe Feinbodenvorräte, wohingegen die Böden mit hohen Trockenrohdichten (z. B. Sande und Lehme) geringe Grobbodenanteile und damit höhere Feinbodenvorräte aufweisen. Diese Unterschiede werden bedeutend bei der Beurteilung von Elementvorräten, die – wie beschrieben – schon aufgrund der unterschiedlichen Feinbodenvorräte in Abhängigkeit vom Substrat sehr verschieden sind.

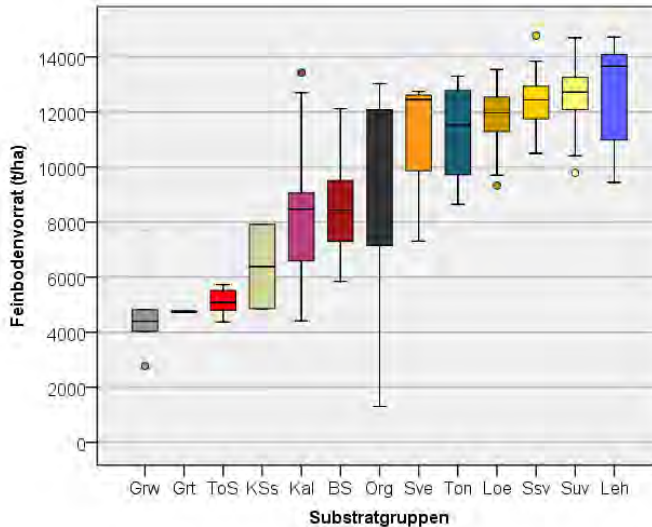


Abbildung 51: Feinbodenvorräte [t/ha] der BZE II in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlebter Sand, Suv: unverlebter Sand, Sve: verlebter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.3.4 Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist ein Maß für den pflanzennutzbaren Bodenwassergehalt¹ und eine grundlegende Größe zur Beschreibung des Wasserhaushaltes an den BZE-Punkten. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel und der Beurteilung der Baumarteneignung am jeweiligen Standort ist von entscheidender Bedeutung, wie hoch der für Pflanzen nutzbare Wasserspeicher (nFK) im Boden maximal ist und wie weit er tatsächlich zu Beginn der Vegetationsperiode im Boden gefüllt ist und damit den Pflanzen in der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Die nFK

¹ Die nFK ist die Menge des Bodenwassers, die in Poren mit Äquivalentdurchmesser zwischen 50 µm und 0,2 µm oder bei einer definierten Saugspannung zwischen pF 1,8 und 4,2 gebunden ist. Sie berechnet sich aus der Differenz zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005).

wurde anhand der Feinbodenart, der Trockenrohichte des Feinbodens, des Grobbodenanteils und des Humusgehalts in Abhängigkeit von der Schichtmächtigkeit für die Tiefenstufen der BZE II programmgestützt (SCHULZE u. EVERS 2013) berechnet. Wie die Trockenrohichte und der Grobbodenanteil folgt auch die nFK in Abhängigkeit vom Substrat bestimmten Mustern. In Abbildung 52 ist die mittlere nFK nach den BZE-Tiefenstufen auf Basis des BZE II-Datensatzes für die Substratgruppen in Niedersachsen dargestellt.

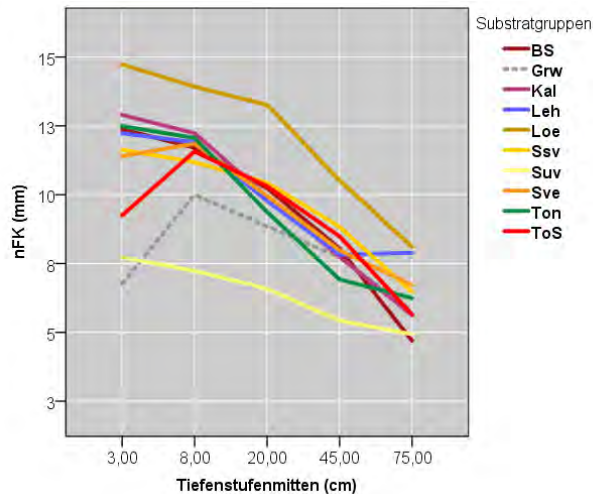


Abbildung 52: Mittlere nutzbare Feldkapazität (nFK) [mm], berechnet nach Stufenmitten der BZE-Tiefenstufen [cm] für die Substratgruppen in Niedersachsen (inkl. Bremen) anhand der BZE II-Daten (nur Substratgruppen mit mind. 4 BZE-Punkten und ohne organisch geprägte Standorte) (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Tonstein, ToS: Tonschiefer)

Grundsätzlich nimmt die nFK mit der Bodentiefe ab, da mit zunehmender Bodentiefe die Trockenrohichten und Grobbodenanteile zunehmen und die Humusgehalte abnehmen. Bei sehr geringen Trockenrohichten, wie beispielsweise bei den Substratgruppen Grauwacke und Tonschiefer in der Tiefenstufe 0-5 cm, ist die nFK geringer als in der folgenden Tiefenstufe 5-10 cm. Die geringste durchschnittliche nFK weist der unverlehmtte Sand auf, die höchste der Lösslehm. Dies liegt an der besonderen Korngrößenzusammensetzung des Lösslehms mit relativ wenig Feinporen und Grobporen, aber vielen Mittelporen und dem weitgehend fehlenden Grobboden, sodass dieser verhältnismäßig viel pflanzenverfügbares Wasser speichern kann. Beim unverlehmtten Sand dagegen ist das Porenverhältnis besonders ungünstig. Die anderen Substratgruppen unterscheiden sich nicht wesentlich (mit Ausnahme von Tonschiefer und Grauwacke im oberen Mineralboden) und zeigen relativ ähnliche Verläufe mit zunehmender Bodentiefe. Die organisch geprägten

Standorte sind zumeist wassergesättigt, es liegen für die organisch geprägten Horizonte auch keine Werte der nFK in der KA 5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005) vor. Sie wurden daher von dieser Auswertung ausgenommen.

Für die Beurteilung der Standorte hinsichtlich ihrer Wasserspeicherkapazität ist die nFK bis maximal 90 cm Bodentiefe aufsummiert und nach Substratgruppen getrennt in Abbildung 53 dargestellt. Die mittlere nFK in Niedersachsen liegt mit 153 mm nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) im relativ hohen Bereich. Die höchsten Werte werden von der Substratgruppe Lösslehm mit durchschnittlich 190 mm erreicht. Diese Standorte sind überwiegend der sehr hohen Bewertungsstufe zugeordnet. Die geringste durchschnittliche nFK hat der unverlehmte Sand mit rund 100 mm. Er fällt damit aber gerade noch in die mittlere Bewertungsstufe. Da diese Böden i. d. R. deutlich tiefergründiger als die hier berücksichtigten 90 cm Bodentiefe sind, ist auch hier mit deutlich höheren tatsächlichen nFK-Summen zu rechnen, zumal die Bäume auch tiefer wurzeln. Die übrigen Substratgruppen der BZE II-Punkte in Niedersachsen befinden sich mit ihrer durchschnittlichen nFK im hohen Bewertungsbereich zwischen 120 und 180 mm, die geringsten liegen bei 50-60 mm. Dies sind die BZE-Punkte der Substratgruppe unverlehmter Sand. BZE-Punkte mit nFK-Summen von unter 30 mm (sehr geringe Bewertungsstufe) treten im BZE-Kollektiv von Niedersachsen nicht auf.

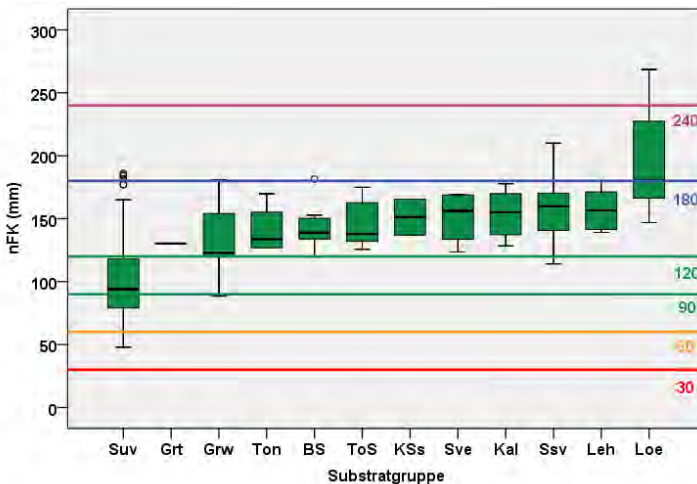


Abbildung 53: Nutzbare Feldkapazität [mm] bis maximal 90 cm Bodentiefe nach Substratgruppen anhand der BZE II-Daten in Niedersachsen (inkl. Bremen) (ohne organisch geprägte Standorte), als Linien sind die Bewertungsgrenzen nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003; s. Tab. 15, S. 164) angegeben (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.4 Bodenmorphologische und bodenphysikalische Kenngrößen im Ländervergleich Nordwestdeutschlands

Jan Evers, Uwe Paar

Da in den nachfolgenden Ergebnisdarstellungen zur Bodenchemie auch die Mittelwerte für die Länder Hessen und Sachsen-Anhalt dargestellt sind, wird in diesem Kapitel auf einige grundsätzliche Unterschiede hinsichtlich der Verteilung der Substratgruppen in den Bundesländern und damit ihrer bodenphysikalischen Kenngrößen eingegangen.

Für die Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt insgesamt bilden die Sande mit knapp 40 % das größte Kollektiv. Dabei sind die unverlehmten Sande mit gut einem Viertel die am häufigsten vorkommende Substratgruppe. Es folgen die Buntsandstein-Standorte mit 13 % und Lösslehme mit 12 %. Mit deutlich geringeren Anteilen schließen sich die Tonschiefer- (8 %), Basalt/Diabas- (6 %) und Kalk-Standorte (5 %) an. Mit jeweils 3 bis 4 %-Anteilen an allen BZE-Punkten in den drei Bundesländern sind die organisch geprägten Standorte sowie die Grauwacke-, Lehm- und Ton(stein)-Standorte trotz regional höherer Bedeutung deutlich seltener. Die Quarzit-, Zechstein(Rotliegendes)-, Granit- und Kreidesandstein-Standorte treten mit jeweils 1 % nur vereinzelt auf (s. Abb. 54).

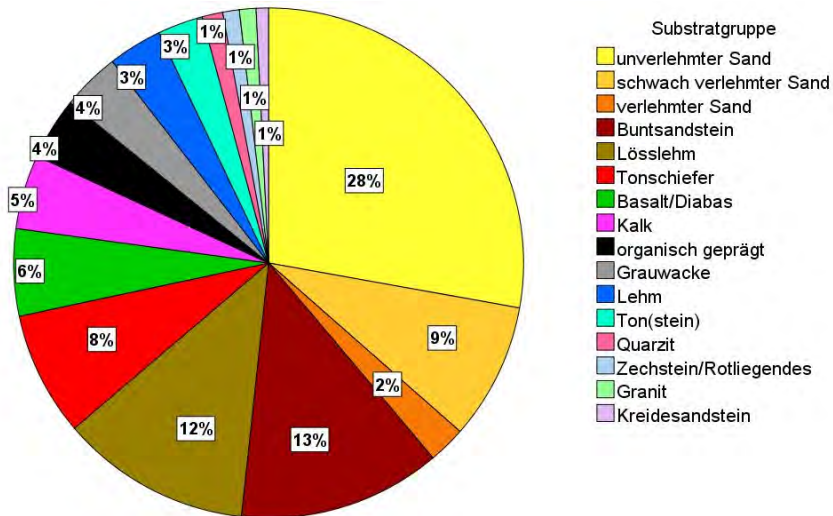


Abbildung 54: Verteilung der BZE-Punkte nach Substratgruppen (Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt)

Alle BZE II-Punkte in Bremen gehören der Substratgruppe unverlehmter Sand an, die folgenden Aussagen zu dieser Substratgruppe beschreiben auch die Verhältnisse in Bremen. Im Folgenden wird Bremen nicht mehr gesondert genannt und ist bei

den Ergebnissen für Niedersachsen bzw. der Substratgruppe unverlehmter Sand eingeschlossen.

Die Verteilungen der Substratgruppen im BZE-Kollektiv sind entsprechend der naturräumlich-standörtlichen Verhältnisse in den Bundesländern Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt unterschiedlich.

Der Ländervergleich zeigt Folgendes (s. Tab. 13):

Tabelle 13: Anzahl und prozentuale Verteilung der BZE II-Punkte auf die Substratgruppen in den Bundesländern

Substratgruppe	Niedersachsen		Hessen		Sachsen-Anhalt	
	n	%	n	%	n	%
Buntsandstein	10	6	39	28	0	0
Lösslehm	18	11	20	14	8	11
Basalt/Diabas	0	0	20	14	1	1
Tonschiefer	7	4	16	11	7	9
unverlehmter Sand	59	36	8	6	39	51
Ton(stein)	4	2	7	5	0	0
Grauwacke	5	3	7	5	2	3
schwach verlehmter Sand	23	14	5	4	5	7
Quarzit	0	0	4	3	1	1
Lehm	6	4	4	3	3	4
Kalk	14	8	4	3	0	0
Zechstein (Rotliegendes)	0	0	3	2	1	1
verlehmter Sand	4	2	1	1	4	5
Granit	1	1	1	1	2	3
organisch geprägt	13	8	0	0	2	3
Kreidesandstein	2	1	0	0	1	1
Summe	166	100	139	100	76	100

n = Anzahl

Bremen: 4 BZE-Punkte der Substratgruppe unverlehmter Sand, nicht in Tabelle 13 enthalten

In Hessen dominieren die Buntsandstein-Standorte mit gut einem Viertel aller Punkte, in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt jedoch die unverlehmten Sande des Tieflandes, die in Sachsen-Anhalt sogar die Hälfte aller Punkte ausmachen. Buntsandstein kommt bei der BZE in Sachsen-Anhalt nicht vor, ist aber in der niedersächsischen BZE mit zehn Punkten (6 %) vertreten. Nur der Lösslehm ist über alle drei Bundesländer relativ gleichmäßig im BZE-Kollektiv verteilt (11 % jeweils Niedersachsen und Sachsen-Anhalt, 14 % Hessen). Basalt/Diabas-Standorte sind

besonders typisch für Hessen. Sie kommen im Rahmen der BZE I in Niedersachsen gar nicht und in Sachsen-Anhalt nur mit einem Punkt vor. Tonschiefer-Standorte haben ihren Schwerpunkt mit 16 Punkten in Hessen, es kommen aber auch jeweils sieben Punkte dieser Substratgruppe in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt vor. Neben den Sanden bilden in Niedersachsen die Lösslehme, Kalk-Standorte und organisch geprägte Standorte regionale Schwerpunkte. In Sachsen-Anhalt sind es neben den Sanden und Lösslehmen die Tonschiefer-Standorte im Harz. Granit-, Kreidesandstein-, Zechstein (Rotliegendes)- und Quarzit-Standorte kommen jeweils in den drei Bundesländern nur vereinzelt oder gar nicht vor. Mit geringen Anteilen sind die Lehme in jedem Bundesland vertreten. Organisch geprägte Standorte haben ihren Schwerpunkt in Niedersachsen. In Hessen kommen diese Standorte im BZE-Kollektiv gar nicht und in Sachsen-Anhalt zweimal vor.

Die länderspezifischen Muster in der Verteilung der Substratgruppen erklären die Unterschiede zwischen den Ländern in den weiteren Auswertungen.

Im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt gibt es hinsichtlich der durchschnittlichen Trockenrohdichten des Feinbodens in Abhängigkeit der Tiefenstufen länderbezogene Unterschiede (s. Abb. 55): In allen Tiefenstufen sind die Trockenrohdichten in Hessen am geringsten, in Niedersachsen etwas höher (mit Ausnahme der Tiefenstufe 60-90 cm) und in Sachsen-Anhalt mit deutlichem Abstand am höchsten. Diese Abstufung ergibt sich aus der bundeslandspezifischen Verteilung der Substratgruppen, hier vor allem der stärkeren Beteiligung der Sande an den Waldstandorten in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. So fallen in Hessen 11 %, in Niedersachsen 52 % und in Sachsen-Anhalt 63 % auf diese Substratgruppen.

Im Vergleich der Bundesländer Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt weisen die Waldböden Hessens mit Abstand die höchsten Grobbodenanteile auf (s. Abb. 56).

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 0-5 cm sind die Grobbodenanteile in Hessen am höchsten. In den Tiefenstufen 10-30 cm und 30-60 cm sind sie fast doppelt so hoch und in der Tiefenstufe 60-90 cm mehr als doppelt so hoch wie in den Bundesländern Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Auch dies hängt unmittelbar mit der Verteilung der unterschiedlichen Substrate in den Bundesländern zusammen. In Hessen sind die steinigen Mittelgebirgs-Standorte aus Buntsandstein, Basalt/Grauwacke sowie Tonschiefer prägend, in Niedersachsen und vor allem in Sachsen-Anhalt dominieren die weitgehend steinfreien Standorte der Sande und Lösslehme.

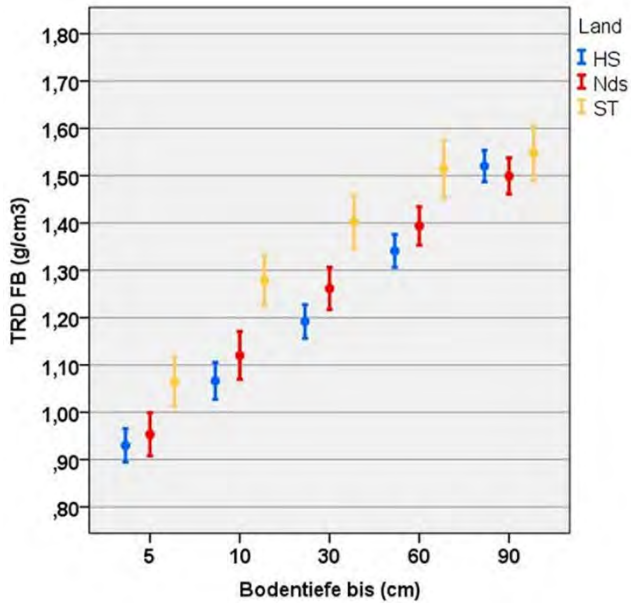


Abbildung 55: Durchschnittliche Trockenrohdichten des Feinbodens (TRD FB) $[g/cm^3]$ nach Tiefenstufen $[cm]$ für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

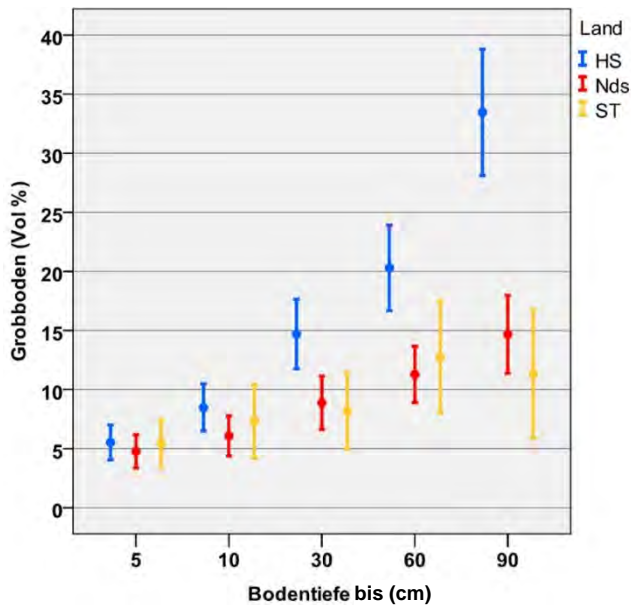


Abbildung 56: Durchschnittliche Grobbodenanteile $[Vol.-%]$ nach Tiefenstufen $[cm]$ für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

Für Hessen ergibt sich der geringste durchschnittliche Feinbodenvorrat in allen Tiefenstufen, es folgt Niedersachsen und dann Sachsen-Anhalt (s. Abb. 57).

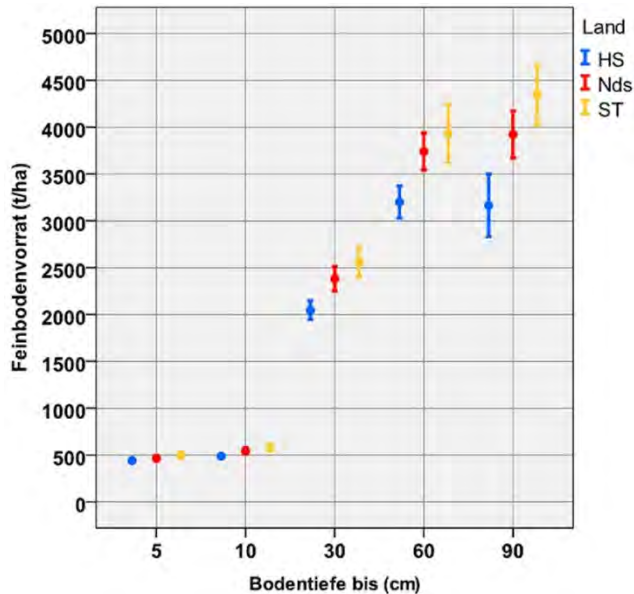


Abbildung 57: Durchschnittlicher Feinbodenvorrat [t/ha] nach Tiefenstufen [cm] für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

In der vergleichenden Auswertung dieser Bundesländer zeigt sich, dass innerhalb der Substratgruppen die durchschnittlichen Feinbodenvorräte gut vergleichbar sind. Die Sande und Lehme haben mit Feinbodenvorräten von 10.000-14.000 t/ha immer die höchsten Werte. Die Feinbodenvorräte nehmen dann über Ton(stein), Buntsandstein, Kalk, Tonschiefer bis hin zur Grauwacke auf rund 4.000 t/ha kontinuierlich ab (s. Abb. 58).

Der durchschnittliche Feinbodenvorrat der Waldböden liegt in Hessen mit 8.500 t/ha deutlich niedriger als in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt mit rund 11.000 t/ha (s. Tab. 14). Aufgrund der unterschiedlichen durchschnittlichen Feinbodenvorräte werden sich die daraus berechneten durchschnittlichen Elementvorräte in den Ländern unterscheiden. Den Boden mit den geringsten Feinbodenvorräten gibt es in Hessen (ein flachgründiger, steinreicher Braunerde-Ranker aus Tonschiefer bei Bischoffen). Der Boden mit den höchsten Feinbodenvorräten ist ein Vega-Gley aus verlehmttem Sand bei Tangerhütte in Sachsen-Anhalt mit 26-mal so hohem Feinbodenvorrat wie der feinbodenärmste Boden in Hessen. Grundsätzlich sind die Spannen zwischen dem leichtesten und schwersten Boden in den drei Bundesländern ähnlich. Die Unterschiede der durchschnittlichen Feinbodenvorräte

in den Ländern erklären sich aus der unterschiedlichen Verteilung der Substratgruppen in den Ländern: In Niedersachsen und Sachsen-Anhalt sind es vor allem die am häufigsten vorkommenden Sande, die aufgrund ihrer hohen Trockenrohdichten und geringen Grobbodenanteile mit 10.000-16.000 t/ha Feinbodenvorrat bis 90 cm Bodentiefe für den höheren Durchschnitt im Vergleich zu anderen Substratgruppen verantwortlich sind. Die Sande sind in Hessen selten, hier kommen hingegen überwiegend Böden mit Buntsandstein, Basalt/Diabas, Lösslehm sowie Tonschiefer vor, die deutlich geringere Feinbodenvorräte zwischen 4.000 und 14.000 t/ha aufweisen (s. Abb. 59).

Bei der Berechnung von Elementvorräten und ihrer Veränderung ist die Kenntnis der zugrunde liegenden Feinbodenvorräte ein wichtiges Kriterium bei der Interpretation, da sich die Feinbodenvorräte zeitlich nicht oder nur unwesentlich ändern können. Weiterhin können Unterschiede von Elementvorräten in den Bundesländern oder auch Regionen wesentlich mit der Ausstattung an Substraten mit unterschiedlichen Feinbodenvorräten zusammenhängen.

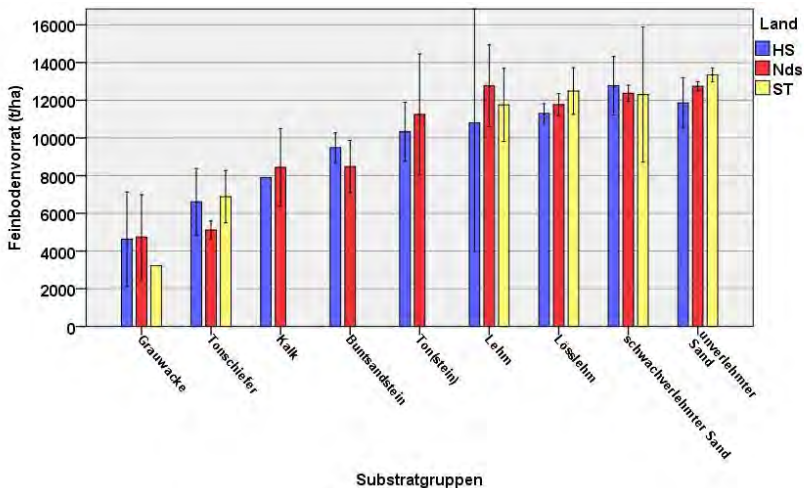


Abbildung 58: Mittlere Feinbodenvorräte [t/ha] in Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST) nach Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe ($n > 3$ je Bundesland, als Streumaß ist das Konfidenzintervall angegeben)

Tabelle 14: Durchschnittliche Feinbodenvorräte [t/ha] bis max. 90 cm Bodentiefe in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt

Feinbodenvorrat	n	Mittel [t/ha]	SD [t/ha]	Median [t/ha]	Min [t/ha]	Max [t/ha]
Niedersachsen	166	10.738	3.271	12.075	918	14.774
Hessen	139	8.501	3.311	8.760	622	14.372
Sachsen-Anhalt	76	11.077	3.844	12.703	1.026	15.631

n = Anzahl, SD = Standardabweichung

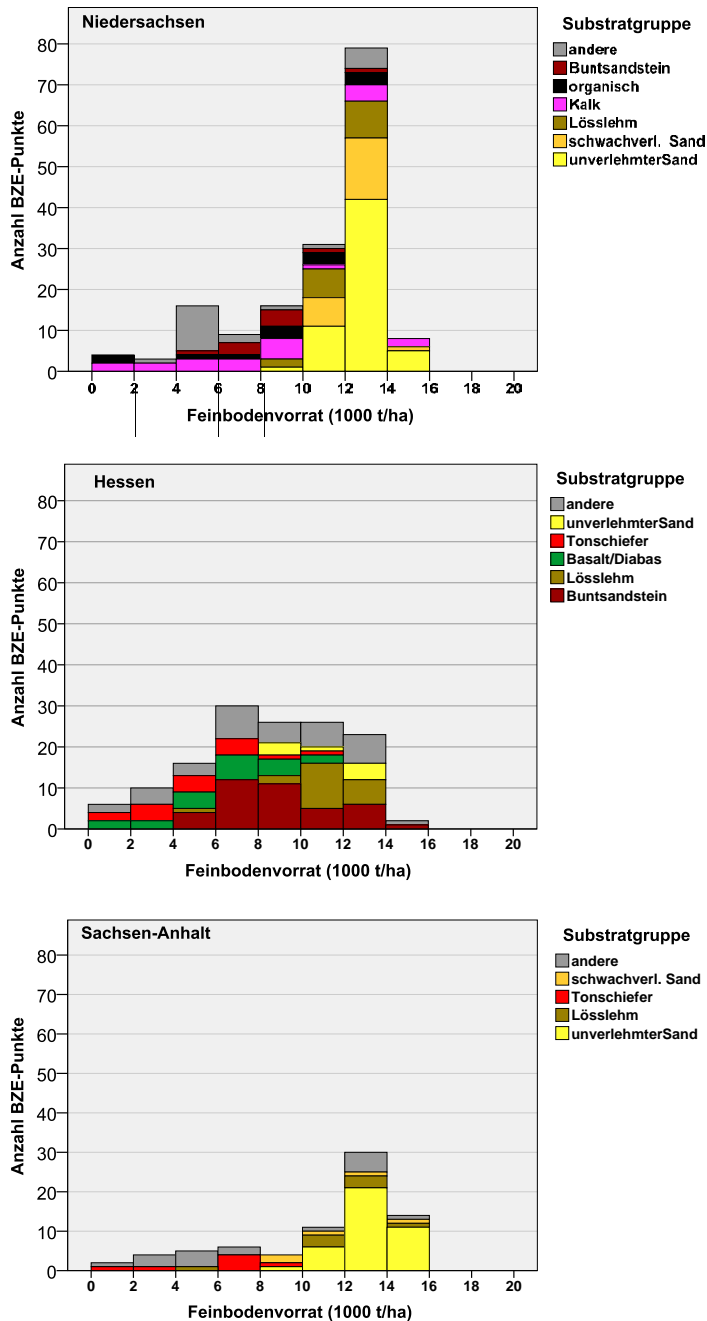


Abbildung 59: Verteilung der Feinbodenvorräte [1.000 t/ha] in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt nach den wichtigsten Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe

6.5 Bodenchemische Kenngrößen in Niedersachsen und Bremen

Jan Evers, Uwe Paar, Egbert Schönfelder

Die wichtigsten bodenchemischen Kenngrößen für den Auflagehumus und den Mineralboden werden anhand der Referenzwerte für die Bewertung von forstlichen Standorten mit „sehr gering“ bis „sehr hoch“ gemäß Tabelle 15 eingestuft (nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Die Grenzwerte für die verschiedenen Bewertungsbereiche sind als Orientierung mit fließenden Übergängen zu verstehen und nicht als scharfe Trennung. Die farbliche Hinterlegung in den folgenden Abbildungen basiert auf diesen Bewertungsbereichen und soll die Interpretation erleichtern. Die Angaben beziehen sich auf die Auflage und den effektiven Wurzelraum im Mineralboden. Die folgenden Auswertungen basieren auf der Annahme, dass der effektive Wurzelraum mit der am tiefsten einheitlich beprobten Tiefenstufe (60-90 cm) der BZE erfasst wird. Dies trifft für die intensivere Durchwurzelung (mittlere bis extreme Durchwurzelung) i. d. R. zu, nur vereinzelt wurden diese Durchwurzelungsstufen für Grob- und Feinwurzeln in tieferen Bodenschichten im BZE-Kollektiv gefunden. Im Bergland wurde in 90 cm Bodentiefe häufig bereits das anstehende Gestein erreicht, im Tiefland traten unter 90 cm Bodentiefe intensivere Durchwurzelungsstufen nur mit weniger als einem 10 %-Anteil auf. Schwache und vor allem sehr schwache Durchwurzelung konnte aber, sofern das Substrat durchwurzelbar war, auch in tieferen Schichten im Tiefland festgestellt werden. Für die Einschätzung der Standortpotenziale von Waldbäumen sollten gerade im Tiefland auch tiefere Bodenschichten einbezogen werden (EVERS et al. 2015).

Tabelle 15: *Bewertungsrahmen der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) (Ake, Basensättigung und Pufferbereiche: ohne Auflagehumus)*

(eff. Wurzelraum mit Auflagehumus)	sehr gering	gering	gering mittel	mittel	mittel hoch	hoch	sehr hoch
Ake (kmolc/ha)	50	100	250	500	1000	2000	
Basensättigung (%)	7	20	30	50	70	85	
Ca (kg/ha)	200	400	800	2000	4000	8000	
Mg (kg/ha)	50	100	200	500	1000	2000	
K (kg/ha)	200	400	600	800	1200	1600	
C (t/ha)	50		100	200		400	
N (t/ha)	2,5		5,0	10,0		20,0	
C/N	35	25	20	16	12	10	
Pufferbereiche	Fe	Al-Fe	Al	Austauscher	Kohlensäure/Silikat	Carbonat	
pH (H ₂ O)	3,0	3,8	4,2	5,0	6,2		

6.5.1 *Austauschkapazität*

Die Kenntnis der Kationenaustauschkapazität, kurz Austauschkapazität, spielt bei der standörtlichen Bewertung des Nährstoffhaushaltes von Waldböden eine bedeutende Rolle (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Die Austauschkapazität ist die bestimmende Größe zur Beschreibung von Speicherung und Austausch von pflanzenverfügbaren Nährstoffen (vor allem von Calcium, Magnesium und Kalium) an den negativ geladenen Oberflächen der Tonminerale. Weiterhin werden aus der Austauschkapazität abgeleitete Größen, wie z. B. die Basensättigung, zur Beurteilung des Säure-Basenzustandes herangezogen (BLOCK et al. 2000, RIEK u. WOLFF 2007, EVERS et al. 2013a, EVERS et al. 2013b). Die Austauschkapazität wird bei pH(H₂O)-Werten unter 6,2 als effektive Austauschkapazität (Ake) bestimmt, wobei der Austausch im Perkolat annähernd bei bodeneigenem pH vollzogen wird. Die Kationenkonzentrationen werden im Perkolat gemessen, in Ionenäquivalente umgerechnet und auf die Bodenmenge bezogen. Bei pH(H₂O)-Werten von über 6,2 wird die potenzielle Austauschkapazität (Akt) bestimmt (GAFA 2005, 2014). In den folgenden Auswertungen sind Ake und Akt vereinfachend gemeinsam betrachtet und werden als Austauschkapazität bezeichnet.

Die Austauschkapazität wird stark von der Tonmineralzusammensetzung, dem Humusgehalt und dem pH-Wert des Bodens bestimmt. Hohe Tonmineral- und Humusgehalte führen zu hohen Werten der Austauschkapazität und entsprechend positiver standörtlicher Bewertung. Bei fortgeschrittener Versauerung des Bodens bei pH(H₂O)-Werten unter 4,2 lagern sich Al-Hydroxy-Polymere in die Tonmineral-Zwischenschichten ein. Es kommt langfristig zur Tonmineralzerstörung und damit zu einer Verringerung der Austauschkapazität. Je geringer die Austauschkapazität im Waldboden ist, umso weniger Kationen stehen den Waldbäumen austauschbar zur Verfügung und umso empfindlicher sind diese Waldböden gegenüber Veränderungen durch Säurebelastung oder intensiver Nutzung.

In Abbildung 60 ist die mittlere Austauschkapazität für den Auflagehumus und die Mineralboden-Tiefenstufen der BZE I und II für Niedersachsen mit Konfidenzintervallen (orange) und Mittelwerten der Länder Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt (rote Kreise) dargestellt.

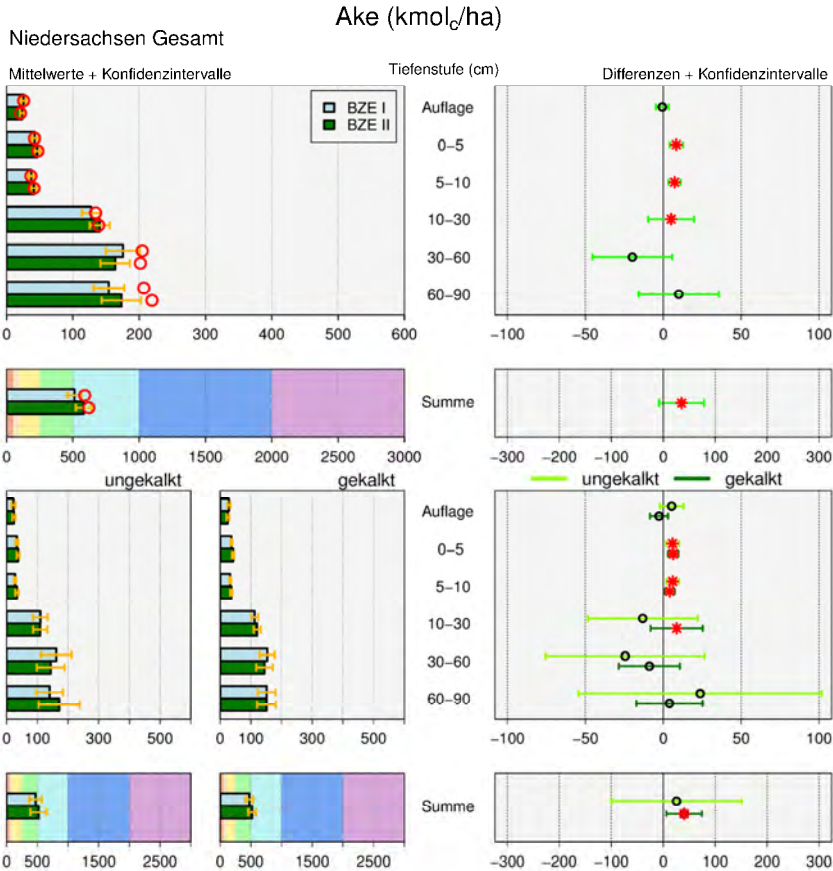


Abbildung 60: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 208) und II (n = 170) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I, (n = 111) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und gegliedert nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken)

Abbildung 61 gibt einen Überblick über den schematischen Aufbau der vorigen und der folgenden Abbildungen mit identischem Layout.

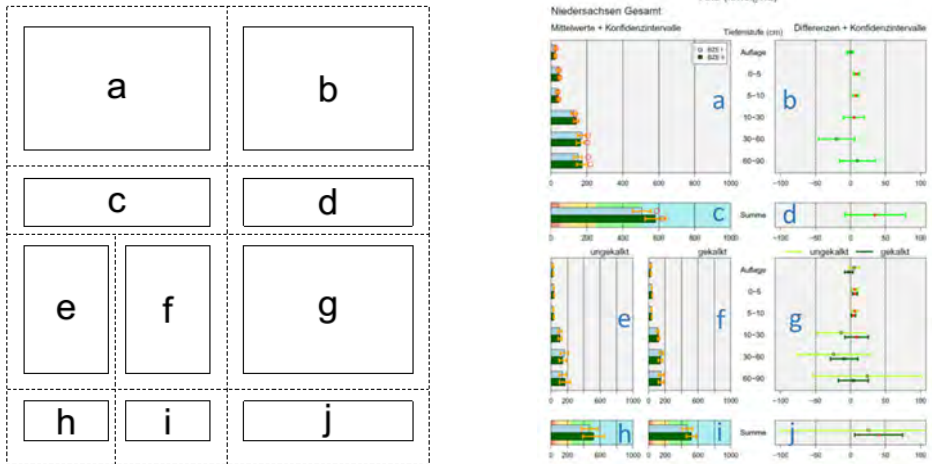


Abbildung 61: Schematischer Aufbau der Abbildungen zu bodenchemischen Kenngrößen am Beispiel der Austauschkapazität (Ake). Die Erläuterungen der Teilgrafiken sind jeweils im Text zu finden.

Im Folgenden werden die Teilgrafiken erläutert:

Teilgrafik a: Mittlerer Vorrat der BZE I (hellblau) und BZE II (dunkelgrün) für die Auflage und die BZE-Tiefenstufen 0-5, 5-10, 10-30, 30-60 und 60-90 cm für Niedersachsen. In Orange sind die 95 %-Konfidenzintervalle und mit roten Kreisen der Gesamtmittelwert der Länder Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt für die jeweilige Tiefenstufe angegeben.

Teilgrafik b: Bewertung der zeitlichen Unterschiede eines Merkmals zwischen der BZE II und I als mittlere Differenzen (BZE II minus BZE I) für Profile, die bei der BZE I und BZE II mit gleichen (!) Tiefenstufen vorliegen (Schnittmenge beider Inventuren). 95 %-Konfidenzintervall. Roter Stern: signifikant gegen 0 verschieden (5 %-Niveau, Wilcoxon).

Teilgrafik c: Mittlerer Profilvorrat (Summe Auflage und aller jeweiligen Tiefenstufen auf Profilebene) aller BZE I- und BZE II-Profile mit 95 %-Konfidenzintervall (orange) und Gesamtmittelwert der Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt (roter Kreis). Farblich hinterlegt sind für den jeweiligen Parameter die Bewertungsstufen nach der Forstlichen Standortsaufnahme (AK Standortskartierung 2003): rot = sehr gering, orange = gering, gelb = gering-mittel, grün = mittel, hellblau = mittel-hoch, dunkelblau = hoch, violett = sehr hoch (s. a. Tab. 15).

Teilgrafik d: Mittlere Unterschiede zwischen der BZE II und BZE I aller bei der BZE I und BZE II beprobten BZE-Punkte auf Profilebene, wenn eine Auflage und jede Tiefenstufe bei der BZE I und II vorhanden sind. 95 %-Konfidenzintervall. Roter Stern: signifikant gegen 0 verschieden (5 %-Niveau, Wilcoxon).

Teilgrafiken e und f: Inhalt wie Teilgrafik a, aber für die Kollektive der BZE differenziert nach gekalkt und ungekalkt, wobei von der Bodenschutzkalkung ausgeschlossene Standorte (z. B. Kalk, Basalt/Diabas, organisch geprägte Standorte) in diese Darstellung nicht einbezogen sind.

Teilgrafik g: Entspricht Teilgrafik b, aber bezogen auf die Kollektive gekalkt und ungekalkt und bei Vorhandensein des jeweiligen Wertes in der Tiefenstufe bei der BZE I und II.

Teilgrafiken h und i: Entsprechen der Teilgrafik c, aber bezogen auf die Kollektive gekalkt und ungekalkt.

Teilgrafik j: Entspricht der Teilgrafik d, aber bezogen auf die Kollektive gekalkt und ungekalkt.

Insgesamt liegt die Austauschkapazität in den Waldböden Niedersachsens im Mittel aller BZE-Punkte bei der BZE II mit rund $560 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ im Mineralboden nach der Forstlichen Standortaufnahme (s. Tab. 15, S. 164 in diesem Band) noch im mittelhohen Bewertungsbereich. Damit haben die Waldböden in Niedersachsen im Vergleich zum Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt eine geringere mittlere Austauschkapazität (s. Abb. 60, Teilgrafik c). Dies folgt insbesondere aus den Befunden für tiefere Bodenschichten ab 30 cm des Mineralbodens (Teilgrafik a). Substratabhängig streuen die Ake-Werte von $153 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ in einem Regosol aus feinsandigem Mittelsand bei Wietze (Südheide) bis $1.900 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ in einem tiefgründigen Braunerde-Pelosol bei Göttingen mit Ton des Oberen Buntsandsteins. Dies zeigt die große Spanne der Austauschkapazität der forstlichen Waldböden in Niedersachsen und verdeutlicht, weshalb eine zusätzliche Auswertung nach Substratgruppen sinnvoll ist.

Mit durchschnittlich $23 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ trägt der Auflagehumus etwa 4 % zur gesamten Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe bei. In den oberen Bodentiefen (0-30 cm) sind mit rund $230 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ etwa 40 %, in den mittleren (30-60 cm) und unteren (60-90 cm) Bodenschichten mit jeweils etwa $170 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ jeweils 28 % der Austauschkapazität des Gesamtbodens bis 90 cm verteilt. Die höchste Austauschkapazität (bezogen auf jeweils 5 cm Bodenschicht) mit $46 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ findet sich vor allem aufgrund hoher Humusgehalte in den oberen 5 cm des Mineralbodens (s. Abb. 60, Teilgrafik a).

Die durchschnittliche Austauschkapazität hat sich in den Tiefenstufen 0-30 cm gegenüber der BZE I um $21 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ erhöht. Dies entspricht einer Zunahme von 9 %-Punkten (s. Abb. 60, Teilgrafik b). Das Gleiche gilt auch für das Gesamtprofil (s. Abb. 60, Teilgrafik d). Hier erhöhte sich die durchschnittliche Austauschkapazität um $35 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ (+6 %). Die Zu- bzw. Abnahmen im mittleren und unteren Mineralboden sind nicht signifikant.

Bei den Zunahmen der Austauschkapazität stellt sich die Waldkalkung als wichtiger Einflussfaktor dar (Teilgrafiken e-j). Auf Tiefenstufenebene (Teilgrafik g) hat

sich die Austauschkapazität bei den gekalkten und ungekalkten BZE-Punkten signifikant erhöht, und zwar in den Tiefenstufen 0-5 und 5-10 cm Bodentiefe. In 10-30 cm Bodentiefe erhöhte sich die Austauschkapazität nur im gekalkten Kollektiv. Auf Profilebene ergibt sich insgesamt für das gekalkte Kollektiv eine signifikante Zunahme von 40 kmol_c/ha, im ungekalkten Kollektiv eine nicht signifikante von 26 kmol_c/ha (Teilgrafik j). Eine mögliche Ursache für die Erhöhung ist die durch die Waldkalkung ausgelöste Zunahme der organischen Substanz mit ihrer variablen Ladung im Mineralboden.

6.5.1.1 Austauschkapazität in den Substratgruppen

Die Austauschkapazität in den Mineralböden niedersächsischer Waldböden ist sehr verschieden. Sie reicht von durchschnittlich 340 kmol_c/ha in den unverlehmten Sanden im Tiefland bis zu über 1.500 kmol_c/ha im oberen Buntsandstein mit tonigem Röt im Bergland. Die unverlehmten Sande, Granite, Kreidesandsteine, schwach verlehmten Sande, Grauwacken und Tonschiefer fallen mit ihren durchschnittlichen Austauschkapazitäten bis 90 cm Bodentiefe in den mittleren Bewertungsbereich (Abb. 62, zwischen den grünen Linien).

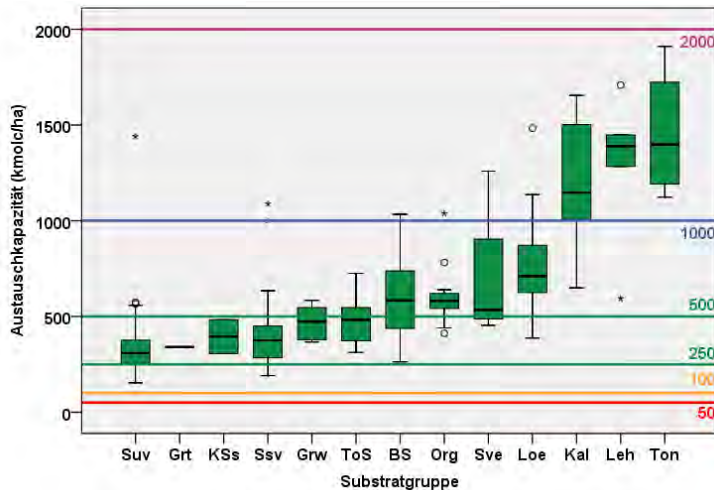


Abbildung 62: Austauschkapazität [kmol_c/ha] im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe bei der BZE II nach Substratgruppen in Niedersachsen (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

Die BZE-Punkte in den Substratgruppen Buntsandstein, organisch geprägte Standorte, verlehmte Sande und Lösslehme liegen im Durchschnitt mit ihren mittleren Austauschkapazitäten im mittel-hohen Bereich (zwischen oberer grüner und blauer Linie), die Kalksteine, Lehme und Tone befinden sich im hohen Bewertungsbereich

(zwischen blauer und pinkfarbener Linie). Dabei sind die Streuungen innerhalb der einzelnen Substratgruppen, vor allem in den besseren Bewertungsstufen, erheblich.

Die Mehrzahl der BZE II-Punkte in Niedersachsen weist mindestens eine Austauschkapazität im mittleren Bereich auf, nur rund 10 % der BZE II-Punkte sind mit einer gering-mittleren Austauschkapazität ausgestattet (zwischen oranger und grüner Linie). Hier handelt es sich überwiegend um unverlehmte Sande und einige schwach verlehmte Sande im Tiefland.

Bei den Standorten mit eher geringer Austauschkapazität finden sich die Austauschplätze hauptsächlich in den oberen 30 cm des Mineralbodens (s. Abb. 63), so z. B. bei den unverlehmten Sanden und Tonschiefer mit jeweils rund 45 % sowie den schwach verlehmten Sanden, Grauwacke, organisch geprägten Standorten und Buntsandstein mit rund 40 %. Dies liegt vor allem an den hohen relativen Anteilen organischer Substanz im Oberboden (Sande) und geringen Trockenrohdichten (Tonschiefer, Grauwacke). Bei den Substratgruppen im eher mittel-hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität (verlehmte Sande, Lösslehme, Lehme und Tone) sind die relativen Anteile der unteren Bodenschichten 30-60 cm und 60-90 cm an der Austauschkapazität des Profils höher. Dies liegt an den relativ hohen pH-Werten und Basensättigungen dieser Schichten bei den entsprechenden Substraten. Eine Ausnahme bildet der Kalkstein, hier liegen die höchsten relativen Anteile der Austauschkapazität mit 40 % im Oberboden, was auf die hohen Skelettanteile und damit geringeren Feinbodenvorräte in tieferen Bodenschichten zurückgeführt werden kann. Die Anteile des Auflagehumus an der Austauschkapazität sind relativ gering. Sie haben nur auf den ärmeren Standorten mit maximal 8 % nennenswerte Anteile an der gesamten Austauschkapazität im Profil.

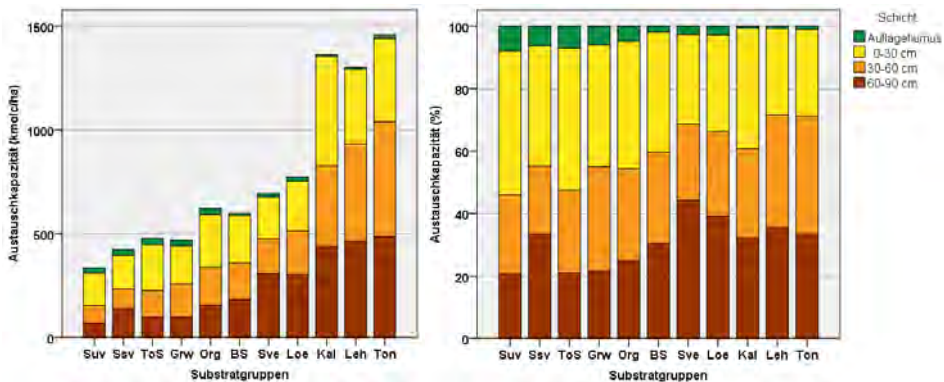


Abbildung 63: Austauschkapazität (Ake) im Auflagehumus und Mineralboden nach Bodenschichten (0-30, 30-60, 60-90 cm) in den Substratgruppen in kmol./ha (links) und % (rechts) bei der BZE II in Niedersachsen, dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.5.1.1.1 Unverlehmte Sande

In Abbildung 64 ist die Austauschkapazität für die Substratgruppe unverlehmter Sand dargestellt.

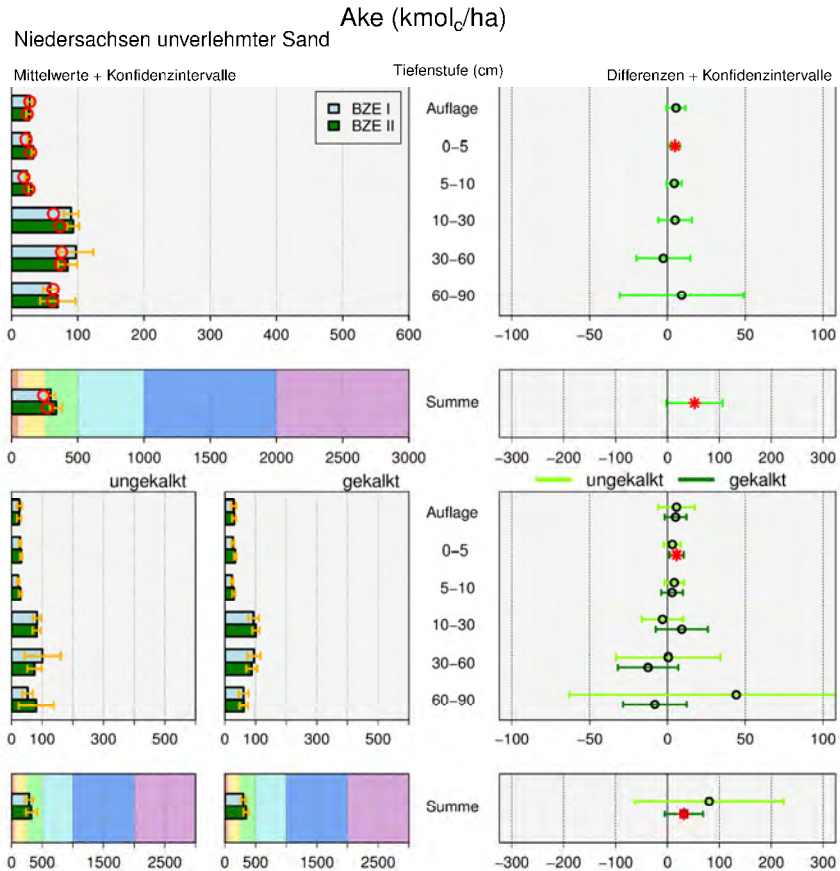


Abbildung 64: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe unverlehmte Sande in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 62) und II (n = 63) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 40) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und gegliedert nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Mit rund 340 kmol_c/ha Austauschkapazität (summiert bis 90 cm Bodentiefe) liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe unverlehmter Sand im mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 64). Dieser Durchschnitt ist höher als die mittleren Vergleichswerte in Hessen (220 kmol_c/ha) und Sachsen-Anhalt (255 kmol_c/ha) (s. Abb. 64, Teilgrafik c). Die geringste Austauschkapazität in dieser Substratgruppe beträgt

153 kmol_c/ha, die höchste 1440 kmol_c/ha (BZE II). Im ersten Fall handelt es sich um einen Regosol aus Schwemmmaterial auf einer Allerinsel bei Wietze, beim zweiten um einen Pseudogley-Podsol in der Nordheide mit tertiärem Ton im Untergrund, der für die ungewöhnlich hohe Austauschkapazität verantwortlich ist.

Die mittlere Zunahme der Austauschkapazität bezogen auf die BZE I auf Profilebene ist mit rund 50 kmol_c/ha mit 17 % relativ hoch und signifikant (s. Abb. 64, Teilgrafik d). Diese Veränderung ergibt sich nicht aus den Größenordnungen der Veränderungen auf Ebene der Tiefenstufen, die sich mit Werten um 5 kmol_c/ha je Tiefenstufe bis 30 cm Bodentiefe, -3 kmol_c/ha in 30-60 cm und 9 kmol_c/ha in 60-90 cm als Summe der mittleren Veränderung auf 26 kmol_c/ha summiert. Die Ursache liegt in der für diese Substratgruppe extremen Austauschkapazität des o. g. Pseudogley-Podsols mit tertiärem Ton, der in der BZE I an dieser Stelle nicht gefunden wurde. Ohne diesen BZE-Punkt würde sich eine mittlere Veränderung der Austauschkapazität von 28 kmol_c/ha ergeben. Diese Differenz ist ebenfalls signifikant und ist als deutlich realistischer anzusehen, zumal sie die Summe der mittleren Differenzen der einzelnen Tiefenstufen wiedergibt. In den einzelnen Tiefenstufen ist nur die Differenz in der Tiefenstufe 0-5 cm signifikant (Teilgrafik b).

Die durchschnittliche Austauschkapazität auf Profilebene im ungekalkten und gekalkten Kollektiv zum Zeitpunkt der BZE II liegt mit 320 kmol_c/ha und 340 kmol_c/ha relativ eng beieinander (Teilgrafiken h und i) und können damit als gut vergleichbar angesehen werden. Auf Tiefenstufenebene ist nur die Differenz der Tiefenstufe 0-5 cm im gekalkten Kollektiv mit einer Zunahme von 26 kmol_c/ha (BZE I) auf 34 kmol_c/ha (BZE II) signifikant. Dies steht im engen Zusammenhang mit der Zunahme von Kohlenstoff im Oberboden, was mit auf die Waldkalkung zurückgeführt werden kann (siehe auch Kap. 6.5.6). Auf Profilebene ergibt sich ebenfalls nur für das gekalkte Kollektiv eine signifikante Zunahme der Austauschkapazität von 312 kmol_c/ha auf 344 kmol_c/ha von der BZE I zur BZE II.

6.5.1.1.2 Schwach verlehmtte Sande

Mit rund 420 kmol_c/ha Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe schwach verlehmtte Sande im mittleren Bewertungsbereich der Austauschkapazität (s. Abb. 65). Damit liegen sie um gut 20 % über den Werten der unverlehmtten Sande.

Die Spanne der in dieser Substratgruppe vorkommenden Austauschkapazitäten ist auf Profilebene hoch: Der geringste Wert liegt mit 190 kmol_c/ha bei einer schwach podsoligen Braunerde aus Geschiebedecksand in der Nähe des Steinhuder Meeres, der höchste mit 1.090 kmol_c/ha bei einem Pseudogley mit Ton unterlagert nördlich von Hannover. Ein Plaggeneschboden in dieser Substratgruppe hat ähnlich hohe Werte. Die Veränderungen der Austauschkapazität zwischen den beiden BZE-Zeitpunkten sind nicht signifikant, sie streuen ab 30 cm Bodentiefe mit zuneh-

mender Bodentiefe stark. Die Waldkalkung führte tendenziell zu höheren Austauschkapazitäten auf Profilebene, die Differenzen sind jedoch nicht signifikant (Teilgrafik g).

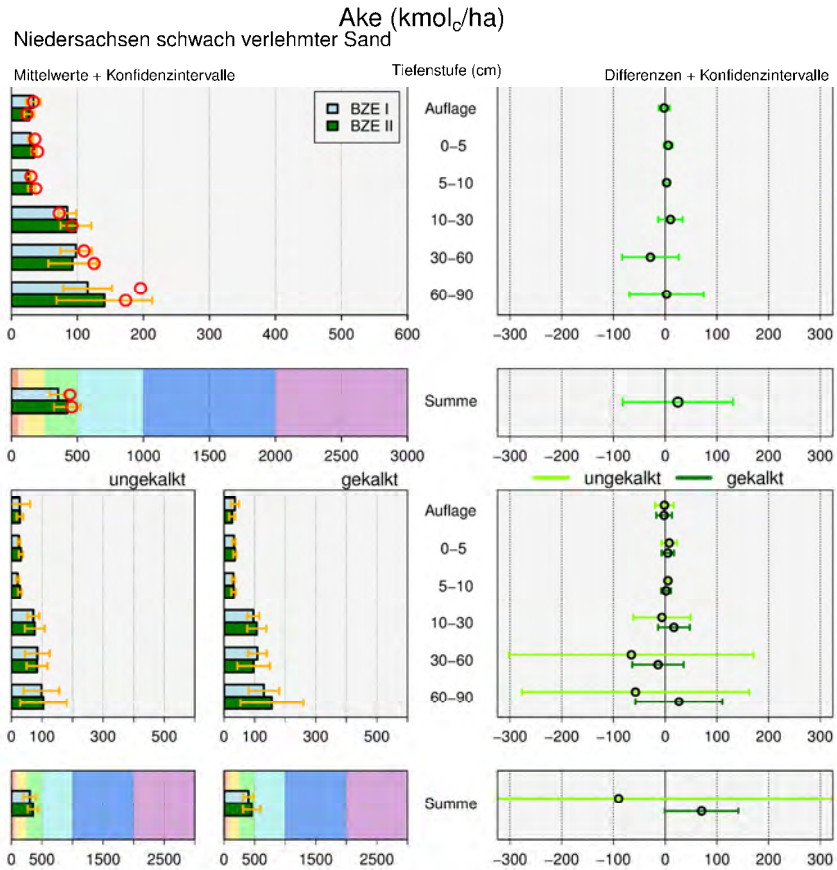


Abbildung 65: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe schwach verlehmt Sande in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 39) und II (n = 23) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 14) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und gegliedert nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.3 Verlehmte Sande

Mit rund 700 kmol_c/ha in der BZE II erreichen die verlehmtten Sande innerhalb der Sande die höchste durchschnittliche Austauschkapazität und liegen damit im mittel-hohen Bewertungsbereich (s. Abb. 66). Die BZE-Punkte streuen mit zunehmender Bodentiefe im Unterboden bei den Summen der Austauschkapazität erheblich. Dafür sind vor allem unregelmäßig unterlagerte Ton- und Lehmschichten verantwortlich. Dies führt zu teilweise hohen Abweichungen zwischen der BZE I und BZE II in den betreffenden Tiefenstufen, die aber als ungerichtet anzusehen sind. Signifikante Unterschiede konnten nicht nachgewiesen werden. Für den Vergleich ungekalkte und gekalkte Standorte stehen nicht genügend BZE-Punkte zur Verfügung.

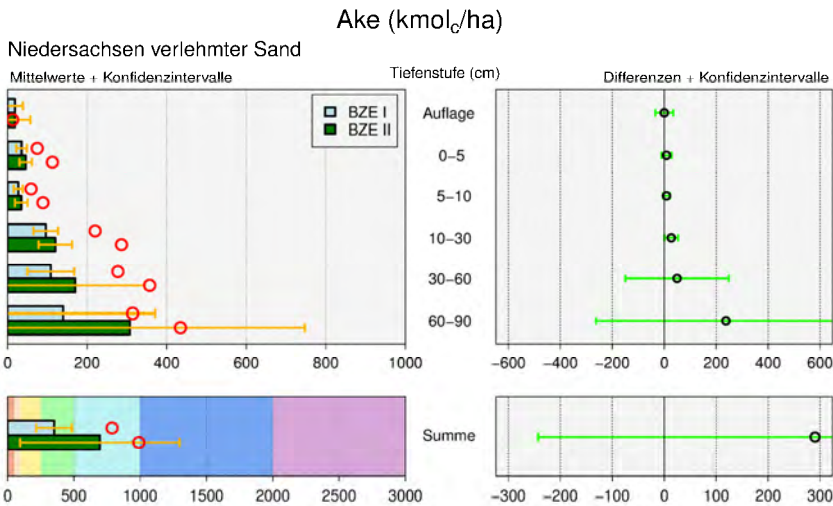


Abbildung 66: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe verlehmtte Sande in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 5$) und II ($n = 4$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 4$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.4 Lösslehm

Mit 775 kmol_c/ha mittlerer Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe Lösslehm im mittel-hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität (s. Abb. 67). Lösslehm-Standorte verfügen im Mittel über eine mehr als doppelt so hohe Austauschkapazität wie ein durchschnittlicher Standort auf unverlehmten Sand.

Die Spanne der vorkommenden Austauschkapazitäten ist bezogen auf die Profilsummenebene hoch: Der BZE-Punkt mit dem geringsten Wert liegt mit

390 kmol_c/ha bei Georgsmarienhütte im Iburger Wald, der höchste mit 1.480 kmol_c/ha bei Salzgitter mit Kreidekalk im Unterboden. In beiden Fällen handelt es sich um Parabraunerden.

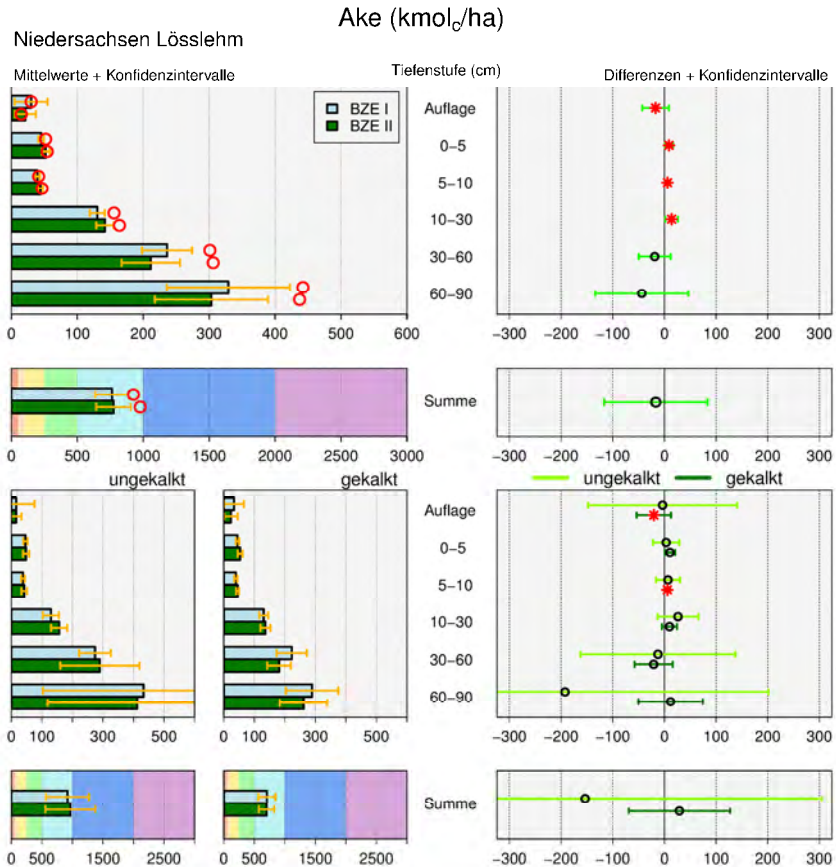


Abbildung 67: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Lösslehm in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 19$) und II ($n = 18$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 12$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Zwischen beiden BZE-Zeitpunkten hat sich die Austauschkapazität im Auflagehumus signifikant verringert und im oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe signifikant erhöht. In tieferen Tiefenstufen verringert sich die Austauschkapazität, die mittleren Differenzen sind jedoch nicht signifikant. Auch auf Profilebene zeigt sich keine signifikante Veränderung. Die Abnahme im Auflagehumus erklärt sich aus einer deutlichen Abnahme der Trockenmasse des Auflagehumusvorrates, besonders

im gekalkten Kollektiv. Hier nahm der Auflagehumusvorrat um knapp 60 % bezogen auf die BZE I ab, im ungekalkten Kollektiv nur um knapp 30 %. Im gekalkten Kollektiv des Lösslehms erhöht sich tendenziell die Austauschkapazität in den einzelnen Tiefenstufen bis 30 cm, signifikant jedoch nur in der Tiefenstufe 5-10 cm (Teilgrafik g). Auf Profilebene ergeben sich keine Unterschiede hinsichtlich der Waldkalkung.

6.5.1.1.5 Kalkstein

Hinsichtlich der Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe liegen die Kalkstein-Standorte in Niedersachsen mit durchschnittlich 1.200 kmol_c/ha im hohen Bewertungsbereich. Bemerkenswert für diese Standorte ist die mit Abstand höchste Austauschkapazität in den oberen 30 cm des Mineralbodens mit 570 kmol_c/ha . Signifikante Veränderungen der Austauschkapazität traten zwischen den beiden BZE-Erhebungen nicht auf (s. Abb. 68). Auffällig sind die hohen Konfidenzintervalle in den Tiefenstufen unter 10 cm. Diese Streuungen lassen sich einerseits auf die teilweise unterschiedlich hohen Skelettgehalte einiger Kalkstein-Standorte zurückführen, die entsprechend die austauschbaren Vorräte vermindern. Andererseits beinhalten Löss- und Mischlehmstandorte über Kalkstein deutlich weniger Steine, entsprechend höher ist die Austauschkapazität. Standorte, die durch Kalkstein geprägt sind, sind i. d. R. nicht versauerungsgefährdet und werden nicht gekalkt.

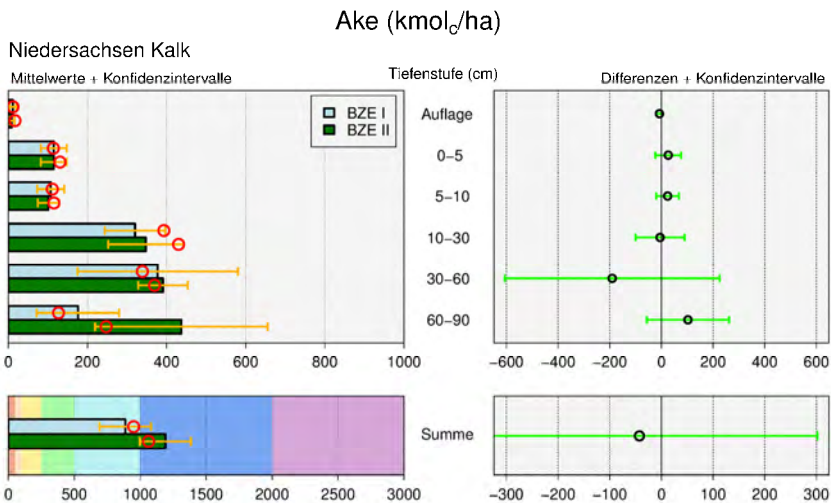


Abbildung 68: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Kalkstein in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 18$) und II ($n = 14$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 9$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.6 Organisch geprägte Standorte

In dieser Substratgruppe sind Standorte zusammengefasst, bei denen Hochmoortorf und Niedermoor, aber auch andere Moorformen sowie Anmoor prägend sind. Kennzeichnend für diese Standorte sind Feuchtgebiete, aber auch ehemalige Feuchtgebiete, wie trockengelegte Hochmoortorfe mit Waldbestockung, fallen in diese Substratgruppe. Hochmoore waren in Niedersachsen früher weit verbreitet, sind aber durch Umwandlung in Grünland, Abtorfung und Ackernutzung flächenmäßig stark reduziert worden. Die BZE-Punkte dieser Substratgruppe finden sich vor allem im niedersächsischen Tiefland. Sie sind aufgrund ihrer hohen Kohlenstoffvorräte und aus Naturschutzgründen bedeutsam.

Mit durchschnittlich $610 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ Austauschkapazität (s. Abb. 69) fallen die organisch geprägten Standorte in den mittel-hohen Bewertungsbereich der Forstlichen Standortskartierung. In der BZE I wurde in den organischen Schichten die Austauschkapazität i. d. R. nicht bestimmt, da sie als Auflagehumus angesehen wurden. Daher liegt die mittlere Austauschkapazität für diese Substratgruppe in der BZE I nur bei rund $390 \text{ kmol}_c/\text{ha}$. Bundeseinheitlich wurde dies bei der BZE II geändert. Diese Schichten zählen nun mit zum Mineralboden.

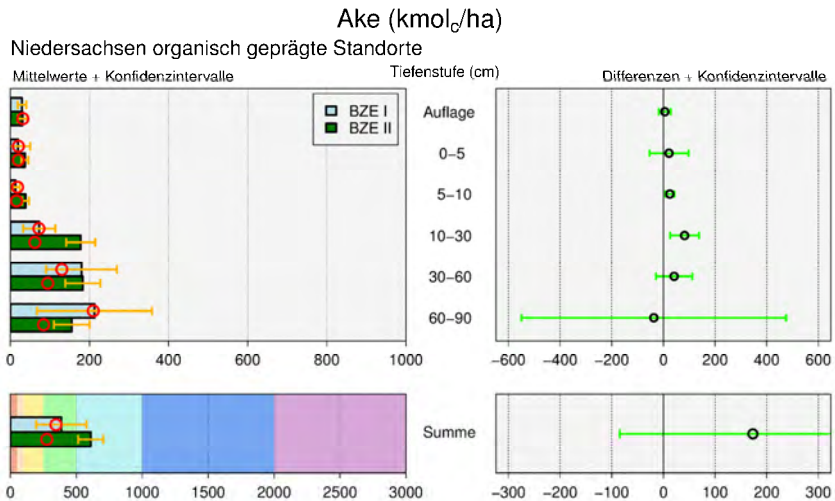


Abbildung 69: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe organisch geprägte Standorte in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 10$) und II ($n = 13$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 4$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikestruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.7 Buntsandstein

Mit rund $600 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe Buntsandstein im mittel-hohen Bewertungsbereich (s. Abb. 70). Die geringste Austauschkapazität in dieser Substratgruppe liegt bei $260 \text{ kmol}_c/\text{ha}$, die höchste bei $1.033 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ (BZE II). Die Veränderungen der Austauschkapazität sind auf Profilebene (+12 % bezogen auf die BZE I-Werte) und für die Tiefenstufen 5-10 cm (+24 %) und 10-30 cm (+19 %) signifikant. Alle BZE-Punkte des Buntsandsteins wurden gekalkt. Die auffällige Zunahme der Austauschkapazität steht im Zusammenhang mit der noch deutlicheren Zunahme von Kohlenstoff im Oberboden (siehe Kapitel 6.5.6).

Im Durchschnitt ist die Austauschkapazität der niedersächsischen Buntsandstein-Standorte höher als in Hessen. Sachsen-Anhalt hat in der BZE II keinen Buntsandstein-Standort (s. Abb. 70, Teilgrafiken a und c).

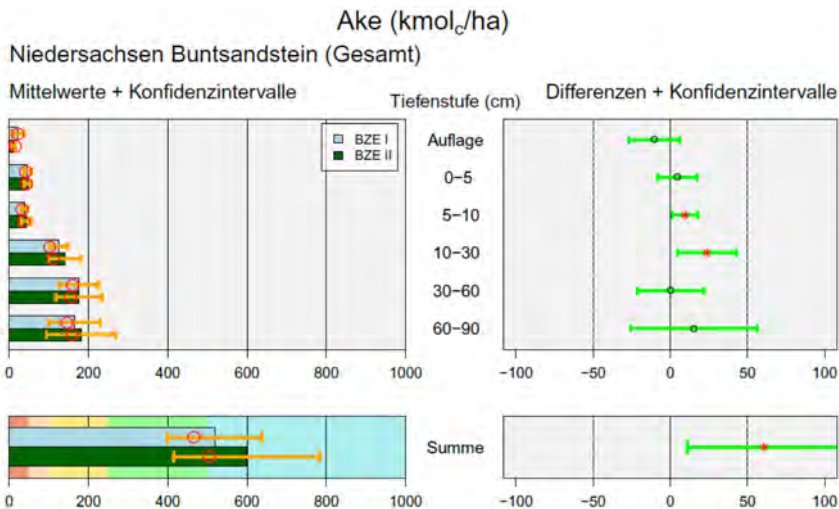


Abbildung 70: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Buntsandstein in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 20$) und II ($n = 10$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 9$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.8 Tonschiefer

Die mittlere Austauschkapazität der Standorte des Tonschiefers liegt für die BZE II in Niedersachsen auf Profilebene bei 480 kmol_c/ha . Bei der BZE I waren es 366 kmol_c/ha (s. Abb. 71, Teilgrafik c). Diese Zunahme ist weder auf Profilebene noch für die Tiefenstufen signifikant. Der Tonschiefer liegt damit auf Profilebene im mittleren Bewertungsbereich der Austauschkapazität. Alle BZE-Punkte der Substratgruppe Tonschiefer sind in Niedersachsen gekalkt worden.

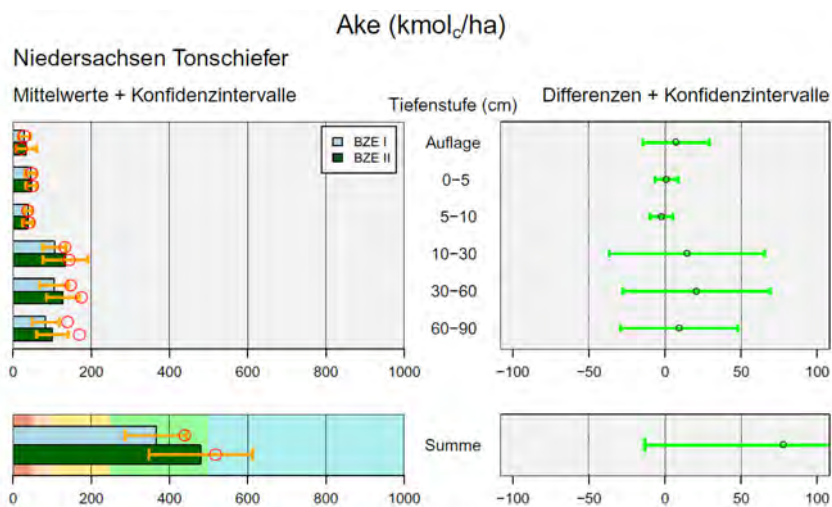


Abbildung 71: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Tonschiefer in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 7$) und II ($n = 7$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 6$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.9 Lehm

In dieser Substratgruppe sind alle vorwiegend lehmigen Mischsubstrate, wie z. B. Kolluvien, Auenlehme und lehmige bis tonige Moränenablagerungen, zusammengefasst. Entsprechend heterogen sind die Böden in dieser Gruppe, entsprechend weit sind die Konfidenzintervalle. Mit $1.300 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ liegen die Lehme bei der Austauschkapazität wie der Kalkstein und Ton(stein) im hohen Bewertungsbereich (BZE II). Im Unterschied zu den Kalken ist die Austauschkapazität relativ gleichmäßig über das Profil verteilt. Signifikante Veränderungen wurden weder auf Tiefenstufenebene noch auf Profilebene oder in Bezug auf die Waldkalkung festgestellt (s. Abb. 72).

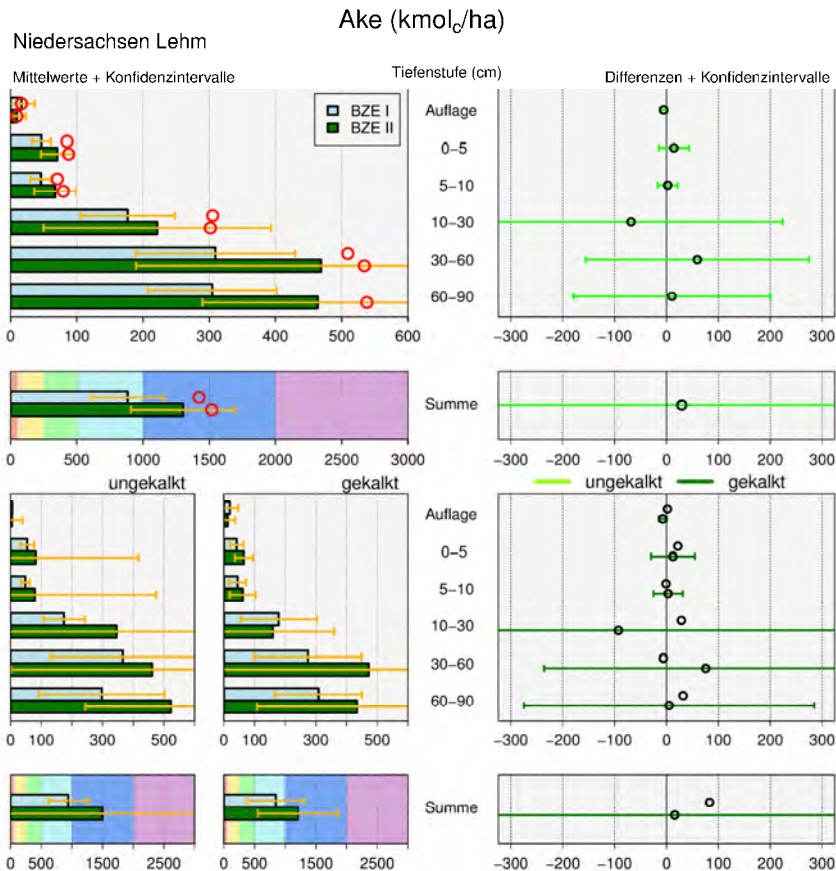


Abbildung 72: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Lehm in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 13$) und II ($n = 6$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 5$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.10 Grauwacke

Die Austauschkapazitäten der durch Grauwacke geprägten BZE-Punkte liegen überwiegend mit rund 470 kmol_c/ha (BZE II) im mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 73). Die bis 90 cm Bodentiefe aufsummierten Austauschkapazitäten liegen zwischen 366 und 584 kmol_c/ha , die Spannweite ist vergleichsweise eng.

Signifikante Änderungen der Austauschkapazität zeigen sich weder auf Ebene des Gesamtprofils noch für die einzelnen BZE-Tiefenstufen. Alle BZE-Punkte in der Substratgruppe Grauwacke sind in Niedersachsen gekalkt.

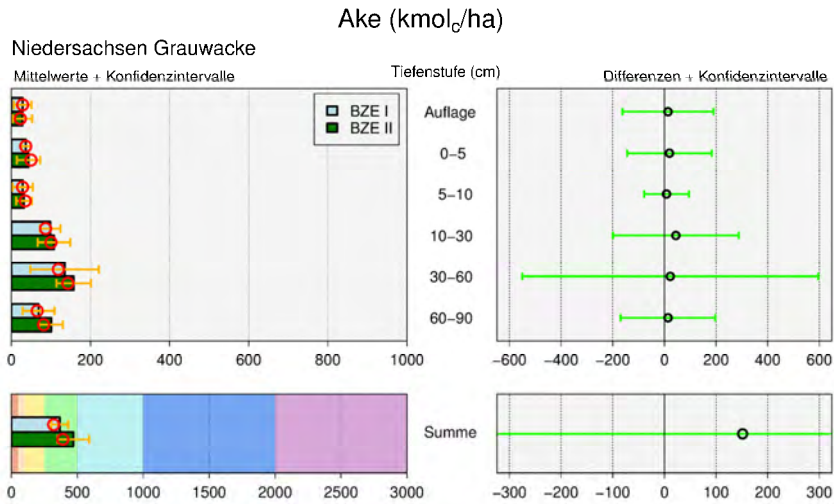


Abbildung 73: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Grauwacke in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 4$) und II ($n = 5$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 6$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.11 Ton(stein)

In der Substratgruppe Ton(stein) treten erwartungsgemäß die höchsten Austauschkapazitäten innerhalb des BZE-Kollektives auf. Der BZE-Punkt mit der höchsten Austauschkapazität im Kollektiv der drei Bundesländer liegt mit 5.250 kmol_c/ha bei Homberg (Hessen), für Niedersachsen ist dies ein Ton(stein) bei Göttingen mit 1.900 kmol_c/ha . Im Mittel liegen die Austauschkapazitäten in der Substratgruppe Ton(stein) in Niedersachsen auf Profilebene bei rund 1.500 kmol_c/ha und damit im hohen Bewertungsbereich (s. Abb. 74).

Vier von den sieben Ton(stein)-Punkten der BZE I und II sind gekalkt worden. Es ergaben sich keine nachweisbaren Veränderungen der Austauschkapazität.

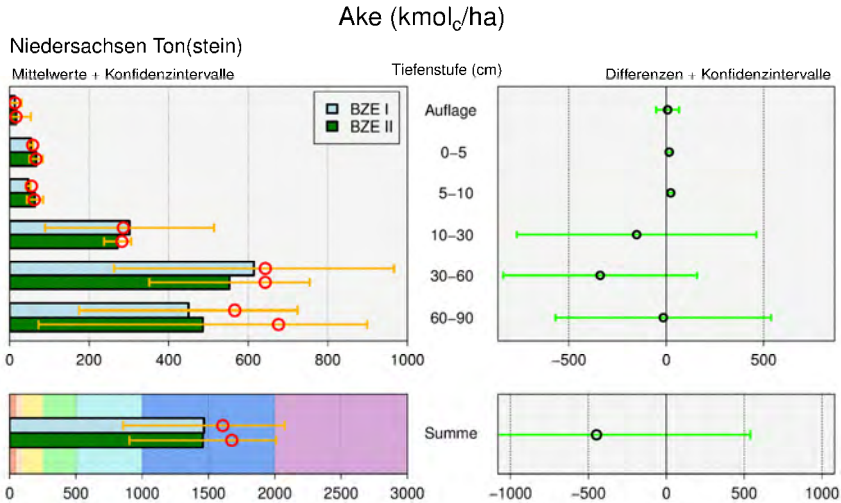


Abbildung 74: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Ton(stein) in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 6) und II (n = 4) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 4) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.1.1.12 Kreidesandstein, Granit, Basalt und Mergel

BZE-Punkte in diesen Substratgruppen kommen nur vereinzelt vor. Der Kreidesandstein ist mit zwei BZE II-Punkten vertreten. Mit 306 und 480 kmol_c/ha liegen beide Punkte bei der BZE II im mittleren Bewertungsbereich der Austauschkapazität auf Profilebene. Mit 340 kmol_c/ha liegt der BZE-Punkt der Substratgruppe Granit (BZE I) ebenfalls in diesem Bereich. Nur in der BZE I findet sich ein BZE-Punkt in der Substratgruppe Basalt/Diabas. Hier lag die Austauschkapazität bei rund 790 kmol_c/ha im mittel-hohen Bewertungsbereich. Dies ist für die Substratgruppe Basalt/Diabas relativ wenig, im Mittel wurden in Hessen 1.300 kmol_c/ha bei der BZE II festgestellt. Mit rund 1.700 kmol_c/ha Austauschkapazität liegt der eine in Niedersachsen vorkommende BZE I-Punkt der Substratgruppe Mergel bei der BZE I im hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität, aber unterhalb des Ton(steins).

6.5.1.2 Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität

An der mittleren prozentualen Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität in Abbildung 75 ist erkennbar, dass Aluminium mit Anteilen zwischen 42 und 66 % im Gesamtkollektiv der BZE I in jeder Bodentiefe das bestimmende Kation war (gelbe Balken, Grafik links oben). Die Protonen (H) belegen Anteile von 1 bis 18 %. Eisen und Mangan als weitere Kationensäuren nehmen jeweils unter 5 % ein. Das häufigste basisch wirkende Kation ist Calcium mit Anteilen an der Austauschkapazität zwischen 14 und 28 %. Deutlich geringere Anteile haben Magnesium (3-9 %) und Kalium sowie Natrium mit Anteilen bis zu 2 %. Die relativ hohen Anteile an basisch wirkenden Kationen im obersten Mineralboden (0-5 cm) können mit Kalkungsmaßnahmen, mit dem Gehalt an organischer Substanz und einer damit verbundenen „Maskierung“ von Al-Kationen sowie der Aufnahme basisch wirkender Kationen aus tieferen Bodenschichten und durch Abgabe über den Streufall erklärt werden, der sogenannten „Basenpumpe“. Die Anteile basischer Kationen fallen in 5-10 cm Bodentiefe deutlich ab, nehmen darunter mit zunehmender Bodentiefe wieder zu, erreichen aber mit 23 % nicht wieder die Werte des oberen Mineralbodens (28 %). Im Unterboden bestimmen vor allem im Bergland höhere Anteile von noch relativ wenig verwittertem Material mit hoher Basensättigung, relativ hoher Pufferkapazität und geringer Versauerung die chemischen Bodeneigenschaften.

Wird im Zeitvergleich (BZE I zu BZE II) das ganze Kollektiv unabhängig von der Waldkalkung betrachtet, so zeigt sich im oberen Mineralboden eine deutliche Zunahme der Anteile basischer Kationen und eine Abnahme der Aluminium-Anteile. Ab 30 cm Bodentiefe ähnelt sich die prozentuale Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität in der BZE I und BZE II.

Wird das Gesamtkollektiv auf die Straten gekalkt, ungekalkt und entfällt (außerhalb der Kalkungskulisse) aufgeteilt, zeigt sich im gekalkten Kollektiv eine Erhöhung der Anteile an basischen Kationen bis in 30 cm Bodentiefe von BZE I zu II. Unter 30 cm Bodentiefe verändern sich die Basengehalte nur unwesentlich.

Im ungekalkten Kollektiv nehmen die Anteile der Protonen bis 10 cm Bodentiefe zu. Eisen und Mangan bleiben relativ konstant. Aluminium nimmt zwischen 10 und 60 cm zu. Dies zeigt die Folgen fortschreitender Versauerung zwischen der BZE I und BZE II an. Allerdings hat sich der Zustand der Tiefenstufe 0-5 cm in Bezug auf höhere Anteile basischer Kationen und einem relativen Rückgang der sauren Kationen auch im ungekalkten Kollektiv gegenüber der BZE I verbessert.

Im Kollektiv außerhalb der Kalkungskulisse (Kalkung entfällt, untere Zeile) fällt eine Zunahme der Protonen von der BZE I zur BZE II auf. Die Anteile von Aluminium nehmen zwischen 10 und 60 cm zu, die von Calcium ab. Die Bewertung mittlerer Parameter dieses Kollektivs ist nicht angezeigt, da mit den Kalksteinen und organischen Standorten sehr unterschiedliche Substrate zusammengefasst sind.

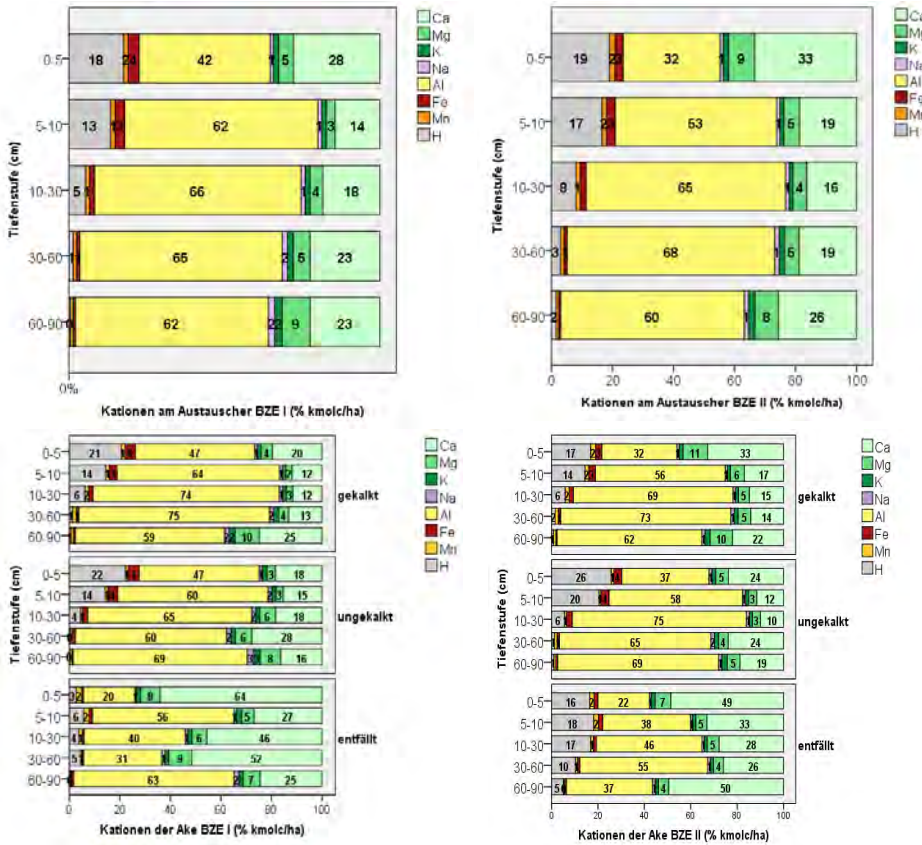


Abbildung 75: Mittlere prozentuale Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität (Ake) der BZE I- (linke Spalte) und BZE II-Punkte (rechte Spalte) in Niedersachsen für das Gesamtkollektiv (obere Zeile) sowie nach gekalkt, ungekalkt und entfällt (untere Zeile) (nicht in der Waldkalkungskulisse enthalten: Kalkstein und organisch geprägte Standorte)

6.5.2 Basensättigung

Die Basensättigung ist ein zentraler Indikator für die Güte des chemischen Bodenzustandes. Sie kennzeichnet die Verfügbarkeit austauschbar gebundener Nährstoffe im Mineralboden und damit wesentlich die Ernährungsbedingungen von Waldbäumen. Die Basensättigung drückt aus, wie hoch der relative Anteil der basischen Nährstoffkationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Vergleich zur Summe aller Kationen ist, die an negativ geladenen Tonmineralen sowie organischer Substanz im Boden gebunden sind. Im Zuge fortschreitender Bodenversauerung werden die an der Pufferung beteiligten basischen Kationen (Mb-Kationen) Calcium, Magnesium und Kalium vom Austauscher durch die sauren Kationen Aluminium, Eisen, Mangan und Wasserstoff-Ionen (Ma-Kationen) verdrängt. Ein starkes

Absinken der Basensättigung im Mineralboden ist eine Folge luftbürtiger versauernd wirkender Stoffeinträge.

Eine Basensättigung unter 20 % wird als gering, unter 7 % als sehr gering eingestuft. Diese Werte werden in den am stärksten versauerten Waldböden erreicht. Für Böden mittlerer Nährstoffversorgung ist eine Basensättigung von 30 bis 50 % definiert und bei gut nährstoffversorgten Standorten erreicht die Basensättigung Werte über 50 % (s. Tab. 15, S. 164).

Basensättigungen unter 20 % zeigen an, dass diese Standorte nicht mehr über das Potenzial an austauschbaren Nährstoffen verfügen, welches grundsätzlich bei gegebener Austauschkapazität an vergleichbaren, unbelasteten Waldstandorten zur Verfügung stand. In diesem Milieu wird der Austauscher und die Bodenlösung durch das Kation Aluminium geprägt. Calcium, Magnesium und Kalium liegen in vergleichsweise geringen Anteilen vor. Für Baumwurzeln kann es schwierig werden, unter diesen Bedingungen ausreichend Nährelemente mit den Wurzeln aufzunehmen. Aluminium wirkt in der Bodenlösung in höheren Konzentrationen zudem toxisch gegenüber Pflanzenwurzeln. Die Bodenlösung ist relativ sauer, Schwermetalle werden gelöst und die Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium mit dem Sickerwasser ausgetragen. Sie gehen damit dem Ökosystem verloren. Allgemein wird dies als ein Zustand angesehen, in dem ein Waldboden wenig elastisch auf weitere Säureeinträge reagieren kann, er in seiner Produktivität eingeschränkt und im Hinblick auf Elemententzüge durch intensive Holznutzung, wie beispielsweise Vollbaumnutzung, empfindlich ist. In diesen Fällen können Kompensationsmaßnahmen in Form von Waldkalkungen sinnvoll sein.

Im Folgenden sind die durchschnittlichen Werte der Basensättigung nach Tiefenstufen und Profil mit den jeweiligen Veränderungen zur BZE I für Niedersachsen insgesamt und getrennt nach Substratgruppen aufgeführt. Für den Auflagehumus wird die Basensättigung nicht angegeben, da im Unterschied zum Mineralboden im Auflagehumus aus methodischen Gründen keine Protonenberechnung erfolgt.

Mit 30 % durchschnittlicher Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe liegen die Waldböden in Niedersachsen sowohl bei der BZE II als auch bei der BZE I im Übergang vom mittleren in den gering-mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 76, Teilgrafik c). Summiert und gemittelt über diese Bodentiefe hat sich die Basensättigung in Niedersachsen nicht verändert. Auch im Mittel über die Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt hat sich die Basensättigung auf Profilebene nicht verändert und fällt mit 36 % in den mittleren Bewertungsbereich.

Die höchsten Werte der mittleren Basensättigung nach Tiefenstufen finden sich mit Werten um 40 % in der Tiefenstufe 0-5 cm in der BZE II. Zum Zeitpunkt der BZE I lag der Durchschnitt in dieser Tiefenstufe noch bei rund 30 %. Diese mittlere Zunahme von 10 %-Punkten ist signifikant (s. Abb. 76, Teilgrafik a und b). Die durchschnittliche Basensättigung der BZE II fällt in den Tiefenstufen 5-10 cm auf 27 % und in 10-30 cm weiter auf 24 %, bleibt in 30-60 cm bei 24 % und steigt in

60-90 cm wieder auf 30 % an (s. Abb. 76, Teilgrafik a). In der BZE I waren für diese Tiefenstufen die Werte auf Landesebene ähnlich. Neben der signifikanten Zunahme in 0-5 cm war auch die Zunahme um 4 %-Punkte von der BZE I zur BZE II in der Tiefenstufe 5-10 cm signifikant. In der Tiefenstufe 60-90 cm gab es eine leichte signifikante Abnahme um 3 %-Punkte.

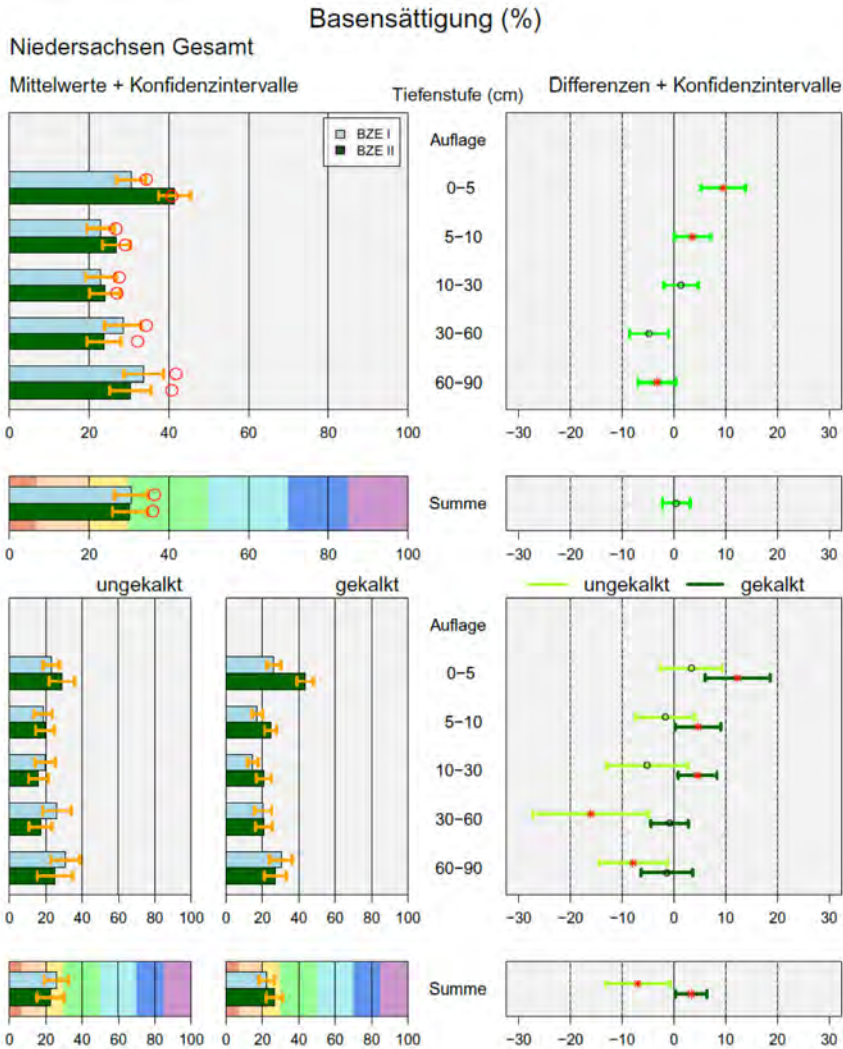


Abbildung 76: Basensättigung [%] in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 202$) und II ($n = 170$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 110$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Diese Durchschnittswerte bieten nur eine allgemeine Orientierung, denn sie sind stark von den jeweiligen Substraten und ihren Anteilen abhängig. So haben die Kalkstein-Standorte annähernd 100 % Basensättigung, während die Buntsandsteine sowie die schwach- und unverlehnten Sande bei unter 20 % durchschnittlicher Basensättigung liegen. Die über das ganze Profil geringste Basensättigung hat in Niedersachsen eine ungekalkte, schwach podsolige Sanddeckkultur über Niedermoor bei Soltau mit einer mittleren Basensättigung von 3 %.

Hinsichtlich der Waldkalkung ergibt sich bei den Durchschnittswerten der Basensättigung ein differenzierteres Bild (s. Abb. 76, Teilgrafiken e-j). In dieser Auswertung sind nur diejenigen Standorte enthalten, die in die Waldkalkungsplanung in Niedersachsen einbezogen wurden. Da hierbei vor allem die Kalkstein- und Mergel-Standorte mit relativ hoher Basensättigung fehlen, liegt die durchschnittliche Basensättigung im ungekalkten Kollektiv mit Werten um 20 % um 10 %-Punkte unter dem Gesamtmittel und damit im Übergang vom gering-mittleren bis geringen Bereich (s. Abb. 76, Teilgrafiken h und i). Im ungekalkten Kollektiv ist die Basensättigung auf Profilebene um 7 % gesunken, im gekalkten Kollektiv leicht um 3 % angestiegen. Beide Differenzen sind signifikant (Teilgrafik j). Auf Ebene der Tiefenstufen (Teilgrafiken e-g) zeigt sich, dass die Basensättigung im gekalkten Kollektiv bis 30 cm Bodentiefe signifikant zunimmt (+12 %-Punkte in 0-5 und jeweils +5 %-Punkte in 5-10 und 10-30 cm). Im ungekalkten Kollektiv dagegen nimmt die Basensättigung ab; signifikant ist dies in den Tiefenstufen 30-60 cm (-16 %) und 60-90 cm (-8 %). Damit fallen im ungekalkten Kollektiv die Böden zwischen 5 und 60 cm Bodentiefe im Mittel schon in den geringen Bewertungsbereich, im gekalkten Kollektiv befinden sich dagegen alle Tiefenstufen (wieder) im gering-mittleren Bewertungsbereich.

6.5.2.1 *Basensättigung nach Substratgruppen*

Die Basensättigung in den Mineralböden der wichtigsten Substratgruppen in Niedersachsens Waldböden zeigt – wie auch in Hessen – bei hohen Streuungen in den einzelnen Substratgruppen typische Muster (s. Abb. 77, PAAR et al. 2016, EVERS u. PAAR 2012): Sie reicht von 13 % im Median in den Substratgruppen Granit, unverlehmter Sand und organisch geprägte Standorte bis hin zu 98 % im Kalkstein, jeweils berechnet bis 90 cm Bodentiefe. Relativ geringe Werte mit unter 20 % im Median finden sich ebenfalls in den Substratgruppen Buntsandstein und Tonschiefer. Die BZE-Punkte der Substratgruppen Kreidesandstein, schwach verlehmter Sand und Lösslehm liegen mit ihrem Median zwischen 20 und 30 % Basensättigung im gering-mittleren Bereich. Es gibt dabei aber auch BZE-Punkte mit durchschnittlichen Werten von unter 7 % Basensättigung. Im Lösslehm erreichen einige BZE-Punkte auch den Bereich mit sehr hoher Basensättigung mit durchschnittlich über 85 %. Dies belegt die hohe standörtliche Vielfalt der Lösslehmstandorte. Den mittleren Bereich der Basensättigung zwischen 30 und 50 % decken überwiegend die BZE-Punkte der Substratgruppen verlehmter Sand und Grauwacke ab. Der Ton(stein)

mit einem Median um 60 % Basensättigung fällt in den mittel-hohen Bereich, wohingegen die Lehme und Kalksteine schon im sehr hohen Bereich um 85 % Basensättigung liegen. Auffällig viele Bewertungsbereiche der durchschnittlichen Basensättigung werden durch BZE-Punkte in den Substratgruppen Lösslehm und Grauwacke, aber auch Ton(stein), abgedeckt. In diesen Substratgruppen ist daher mit einer breiten Spanne an unterschiedlichen Trophiestufen zu rechnen.

Vereinzelt gibt es in einigen Substratgruppen Extreme, die sich z. T. auf Meliorationen zurückführen lassen. So findet sich in der Substratgruppe unverlehmter Sand z. B. ein BZE-Punkt mit einer durchschnittlichen Basensättigung von über 70 %, was vermutlich auf eine Bodenbearbeitung zurückgeführt werden kann.

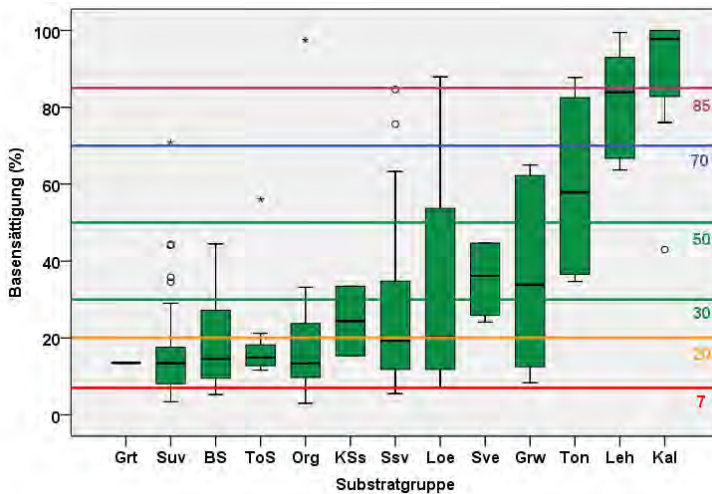


Abbildung 77: Durchschnittliche Basensättigung [%] im Mineralboden bei der BZE II nach Substratgruppen in niedersächsischen Waldböden bis 90 cm Bodentiefe (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalkstein, KSS: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzpunkte: s. Tab. 15, S. 164)

Die Verteilungen der Werte für die Basensättigung in den Bodenschichten 0-30, 30-60 und 60-90 cm (s. Abb. 78) geben noch detailliertere Informationen zu den Substratgruppen: geringe Werte überwiegend unter 20 % Basensättigung kommen durchgängig bis 90 cm Bodentiefe nur in den Substratgruppen unverlehmter Sand, Buntsandstein und Tonschiefer vor. Etwas besser mit Basen ausgestattet sind die organisch geprägten Standorte und schwach verlehmtten Sande, obwohl die Mediane der Basensättigung in den Bodenschichten auch noch unter 20 % liegen. Im Lösslehm, der Grauwacke und verlehmtten Sand ist vor allem die Bodenschicht 60-90 cm besser mit Basen versorgt. Hier reicht die Spanne bis in den mittel-hohen Bewertungsbereich hinein. Bei den Ton(steinen), Lehmen und Kalksteinen steigt die

Basensättigung mit zunehmender Tiefe deutlich an, in allen drei Substratgruppen erreicht die Bodenschicht 60-90 cm Bodentiefe Werte über 85 %. Bei diesen Substraten wird der Einfluss von über die Mineralverwitterung nachgelieferten Basen in unteren Bodenschichten mit höheren Steingehalten erkennbar, vor allem wenn es sich um nährstoffreiche Gesteine handelt. Die in der oberen Bodenschicht 0-30 cm Bodentiefe im Vergleich zur Bodenschicht 30-60 cm deutlich höheren Werte der Basensättigung bei den ärmeren Substraten unverlehmter Sand, Buntsandstein und Tonschiefer, aber auch bei den (schwach) verlehmtten Sanden und Lösslehm, kann auf die Waldkalkung zurückgeführt werden.

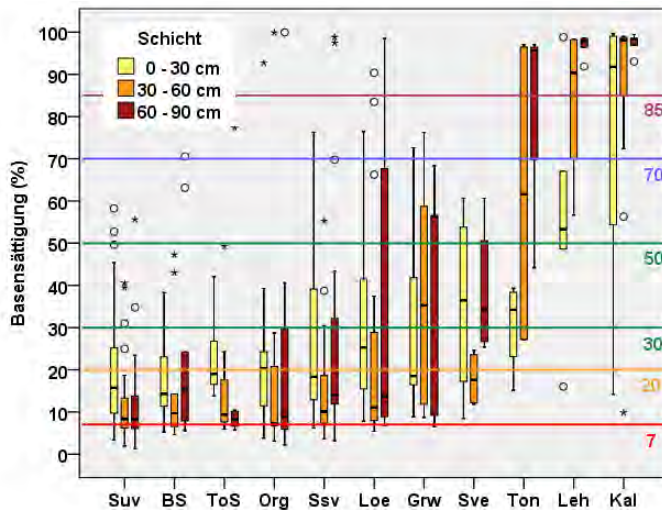


Abbildung 78: Basensättigung [%] in Mineralboden und den Tiefenstufen (0-30, 30-60, 60-90 cm) bei der BZE II (Niedersachsen) nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, SuV: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

6.5.2.1.1 Unverlehmte Sande

Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung hängen bei den Sanden grundsätzlich stark vom Verlehmungsgrad und den Anteilen organischer Substanz ab. Mit 15 % liegen die Werte der durchschnittlichen Basensättigung auf Profilebene in der Substratgruppe unverlehmter Sand bei der BZE II halb so hoch wie der Durchschnittswert aller BZE-Punkte in Niedersachsen. Mit 13 % waren die Werte der durchschnittlichen Basensättigung in der BZE I noch geringer (s. Abb. 79, Teilgrafik c). Beide Durchschnittswerte fallen in den geringen Bewertungsbereich. Die jeweils höchsten Werte bei der BZE I (23 %) und II (34 %) nach Tiefenstufen

finden sich in 0-5 cm Bodentiefe. Hier ist der Einfluss organischer Substanz und der Waldkalkung am höchsten (s. Abb. 79, Teilgrafik a). Mit zunehmender Bodentiefe sinken die Werte deutlich ab und liegen zwischen 10 und 20 %. In 60-90 cm Bodentiefe erreichen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung der BZE II mit 12 % den geringsten Wert. Dies steht im Zusammenhang mit ungünstigen bodenchemischen Verhältnissen in dieser Tiefe, wie geringer Austauschkapazität bei fehlendem organischen Material und geringen Mineralverwitterungsraten der Sande.

Signifikante Veränderungen wurden in der Tiefe 0-5 und 5-10 cm festgestellt. Hier stieg die durchschnittliche Basensättigung um knapp 8 %-Punkte von der BZE I zur BZE II auf insgesamt 34 % bzw. um 4 %-Punkte auf 20 % an (s. Abb. 79, Teilgrafik b). In den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm verringerte sich die Basensättigung auf jeweils 12 %. In der Tiefenstufe 60-90 cm ist die Verringerung mit 8 %-Punkten signifikant. Auf Profilebene änderte sich die durchschnittliche Basensättigung jedoch nicht.

Im Hinblick auf den Faktor Waldkalkung zeigt sich bei den gekalkten Profilen auf Profilebene nur eine leichte, nicht signifikante Zunahme der durchschnittlichen Basensättigung um insgesamt 2 %-Punkte auf insgesamt 13 %. In den einzelnen Tiefenstufen ist der Einfluss der Waldkalkung bis in 10 cm Bodentiefe mit signifikant höheren Werten der Basensättigung bei der BZE II im Vergleich zur BZE I feststellbar: In der Tiefenstufe 0-5 cm stieg die Basensättigung um 10 %-Punkte auf 38 % an und liegt damit im mittleren Bewertungsbereich. In 5-10 cm Bodentiefe stieg die Basensättigung um 5 %-Punkte signifikant auf 21 %. In 10-30 cm gab es keine Änderung der mittleren Basensättigung zur BZE I, im tieferen Mineralbodenbereich kam es zu nicht signifikanten Abnahmen der Basensättigung (s. Abb. 79, Teilgrafik g).

Im ungekalkten Kollektiv der BZE-Punkte in der Substratgruppe unverlehmte Sande dagegen zeigt sich auf Profilebene eine signifikante Abnahme der Basensättigung um 6 %-Punkte auf 10 % im Mittel. In den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm verringerte sich die Basensättigung deutlich, hier sanken die Mittelwerte in 30-60 cm von 15 % auf 9 % und in 60-90 cm von 20 % auf ebenfalls 9 % (s. Abb. 79, Teilgrafik e und g). Damit zeigt sich für die Substratgruppe unverlehmter Sand und den Parameter Basensättigung deutlich, dass sich ohne eine Waldkalkung der schon kritische bodenchemische Zustand im Hauptwurzelraum bis 90 cm Bodentiefe weiter verschlechtert. Zum Zeitpunkt der BZE I lagen die Werte der durchschnittlichen Basensättigung im oberen Mineralboden im gekalkten und ungekalkten Kollektiv noch relativ eng beieinander. Bei der BZE II dagegen liegen die Werte im gekalkten Kollektiv deutlich höher und bis 10 cm Bodentiefe nicht im kritischen Bereich von unter 20 %.

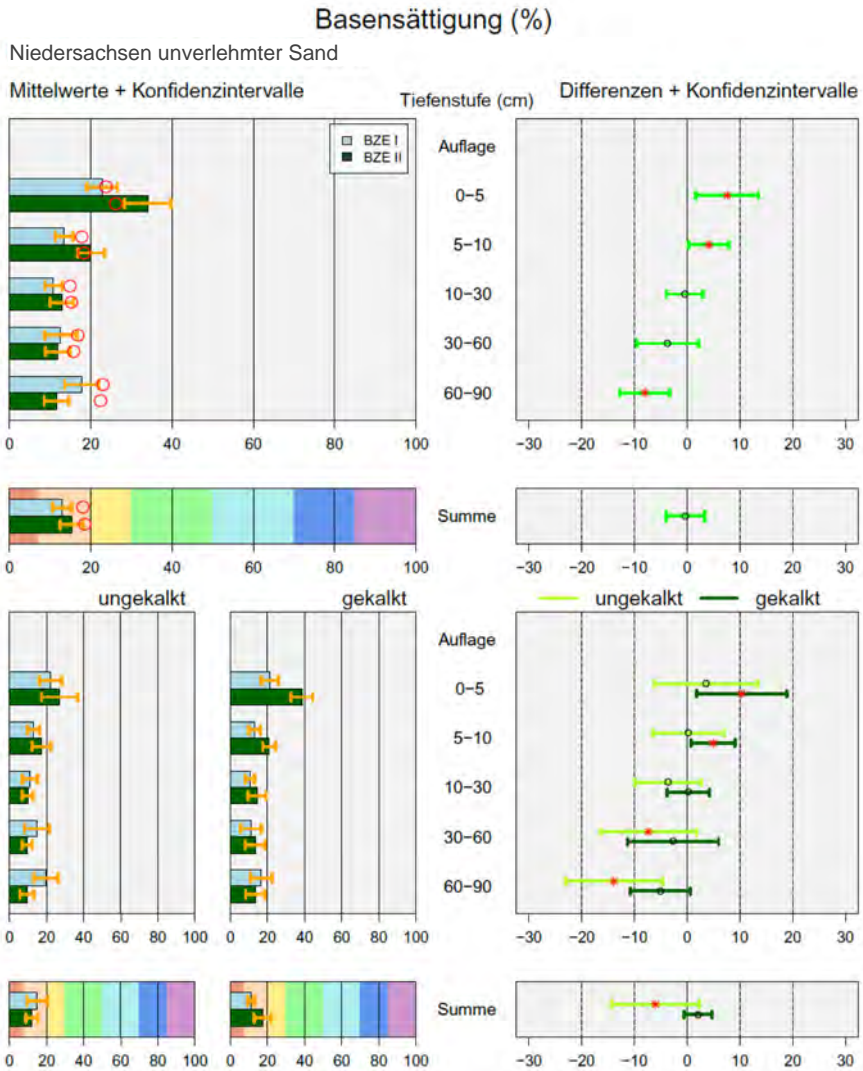


Abbildung 79: Basensättigung [%] der Substratgruppe unverlehmte Sande in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 62$) und II ($n = 63$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 40$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.2 Schwach verlehmte Sande

Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung für die BZE-Punkte in der Substratgruppe schwach verlehmte Sande sind in Abbildung 80 dargestellt. Im Mittel liegen die schwach verlehmtten Sande mit durchschnittlich 27 % Basensättigung an

der Obergrenze des gering-mittleren Bewertungsbereichs und damit deutlich höher als die unverlehmten Sande (15 %, BZE II) und knapp unter dem Mittel für Niedersachsen insgesamt (30 %). Auffällig sind die deutlichen Zunahmen der Basensättigung in fast allen Tiefenstufen, die aber nur in der Tiefenstufe 5-10 cm signifikant sind (+9 %-Punkte auf 26 % in der BZE II). In 30-60 cm Bodentiefe kam es zu einem leichten Rückgang. Die Zunahme der Basensättigung auf Profilebene beträgt 6 %-Punkte, ist aber nicht signifikant.

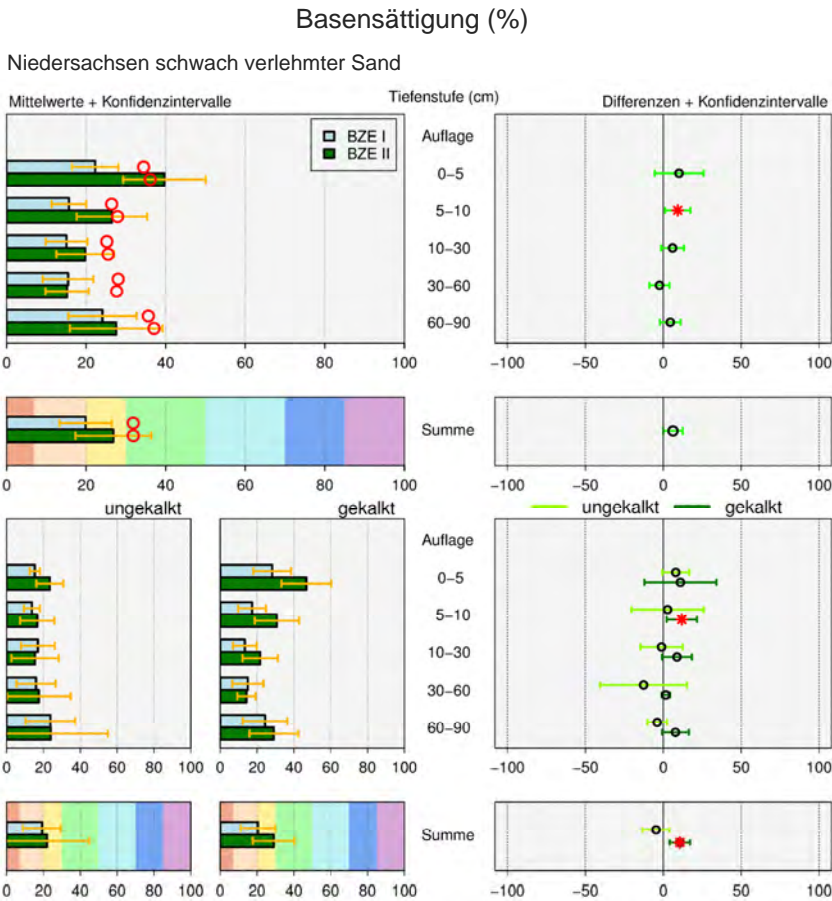


Abbildung 80: Basensättigung [%] der Substratgruppe schwach verlehmtte Sande in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 39$) und II ($n = 23$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 14$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Im gekalkten Kollektiv der schwach verlehmtten Sande gab es auf Profilebene eine signifikante Zunahme um 11 %-Punkte auf 30 %, im ungekalkten Kollektiv dagegen eine weitere, nicht signifikante Abnahme (s. Abb. 80, Teilgrafik j). In den einzelnen Tiefenstufen ist nur die Zunahme im gekalkten Kollektiv der Tiefenstufe 5-10 cm signifikant. Die relativ hohen Konfidenzintervalle sowohl der Tiefenstufendurchschnitte als auch der Differenzen sind der relativ geringen Stichprobenzahl und den unterschiedlichen Verlehmungraden der Sande geschuldet.

6.5.2.1.3 Verlehmtte Sande

In der Substratgruppe verlehmtte Sande sind in der BZE I in Niedersachsen nur 5 und in der BZE II 4 Punkte enthalten. Mit durchschnittlich 35 % Basensättigung auf Profilebene liegen die verlehmtten Sande über den schwach verlehmtten Sanden und dem Mittel Niedersachsens insgesamt (s. Abb. 81). Die mittlere Basensättigung hat um 10 %-Punkte im Vergleich zur BZE I zugenommen und liegt damit nun im mittleren Bewertungsbereich. Signifikante Veränderungen zur BZE I ergaben sich nicht. Aussagen zur Waldkalkung sind auf Basis dieser geringen Stichprobenanzahl nicht möglich. Das hohe Mittel der durchschnittlichen Basensättigung in den Tiefenstufen und auf Profilebene der drei Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt (rote Kreise) liegt im Flugascheeinfluss in Sachsen-Anhalt begründet.

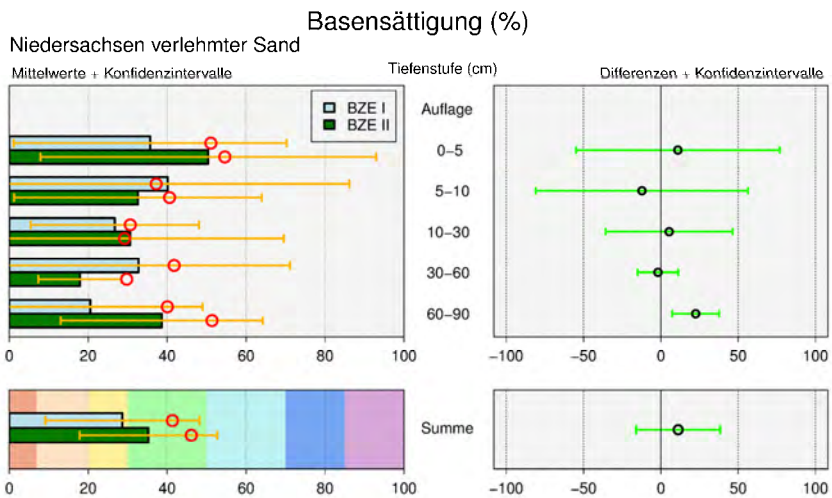


Abbildung 81: Basensättigung [%] der Substratgruppe verlehmtte Sande in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 5) und II (n = 4) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 4) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.4 Lösslehm

Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung an den BZE II-Punkten der Substratgruppe Lösslehm bei 33 % und fällt damit in den mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 82). Die Basensättigung hat seit der BZE I im Mittel auf Profilebene um knapp 6 %-Punkte abgenommen. Dieser Unterschied lässt sich jedoch nicht absichern (s. Abb. 82, Teilgrafik c und d). Im Oberboden kam es zu signifikanten Zunahmen der Basensättigung, in der Tiefenstufe 0-5 cm um 14 %-Punkte auf 50 % und in 10-30 cm um 8 %-Punkte auf 21 %. Im Unterboden unterhalb von 30 cm Bodentiefe verringerte sich die Basensättigung um 12 %-Punkte (30-60 cm) und um 17 %-Punkte (60-90 cm). Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

75 % der BZE-Punkte der Substratgruppe Lösslehm sind gekalkt worden. Die Waldkalkung kann als plausible Erklärung für die signifikante Zunahme der Basensättigung um 14 %-Punkte in der Tiefenstufe 0-5 cm angesehen werden (s. Abb. 82, Teilgrafik b). Sonst ergaben sich keine signifikanten Unterschiede auf Ebene der Tiefenstufen und Waldkalkung. Die mittlere Basensättigung auf Profilebene verringerte sich sowohl im gekalkten als auch im ungekalkten Kollektiv, ebenfalls jedoch nicht signifikant.

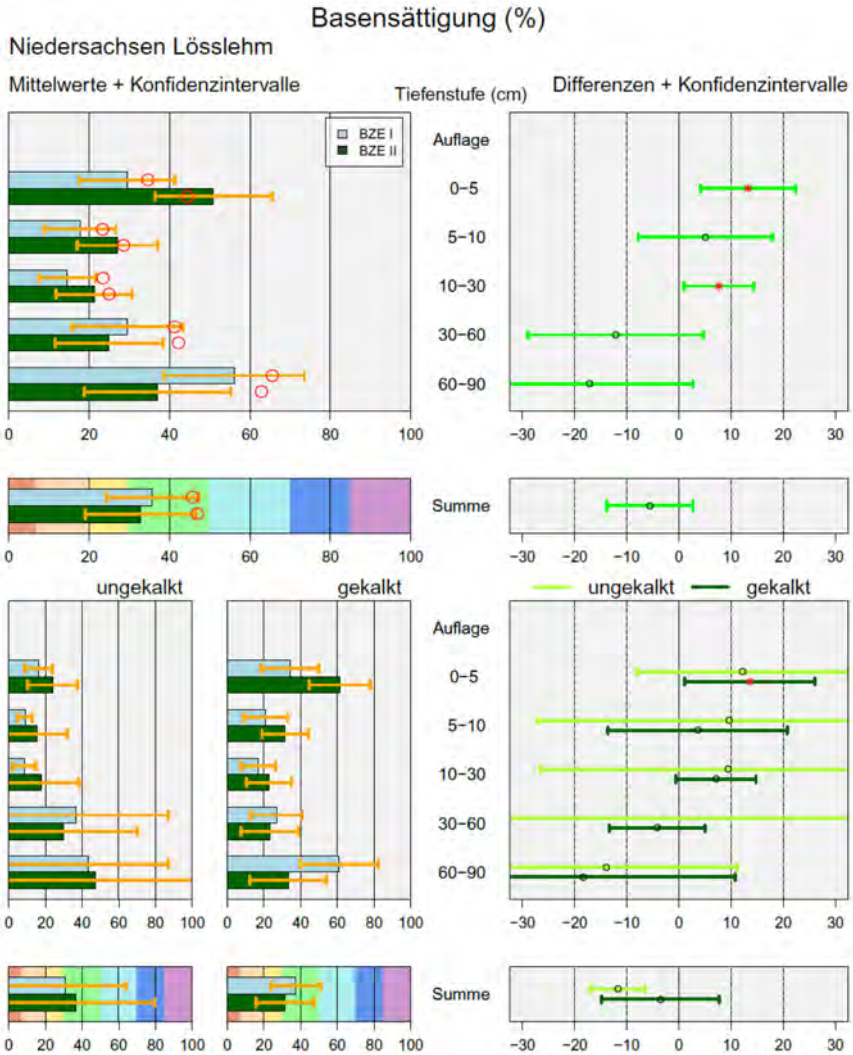


Abbildung 82: Basensättigung [%] der Substratgruppe Lösslehm in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 19$) und II ($n = 18$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 12$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.5 Kalkstein

Hohe bis sehr hohe Werte der Basensättigung über alle Tiefenstufen hinweg sind typisch für den Kalkstein (s. Abb. 83). Die deutlich geringere Basensättigung im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe im Vergleich zum Unterboden weist auf Versauerungsprozesse und eine fortgeschrittene Bodenentwicklung hin. Signifikante Änderungen ergaben sich in den oberen 5 cm des Mineralbodens mit einer Zunahme um 9 %-Punkte. Weitere signifikante Veränderungen gab es nicht, weder in den Tiefenstufen noch auf Profilebene.

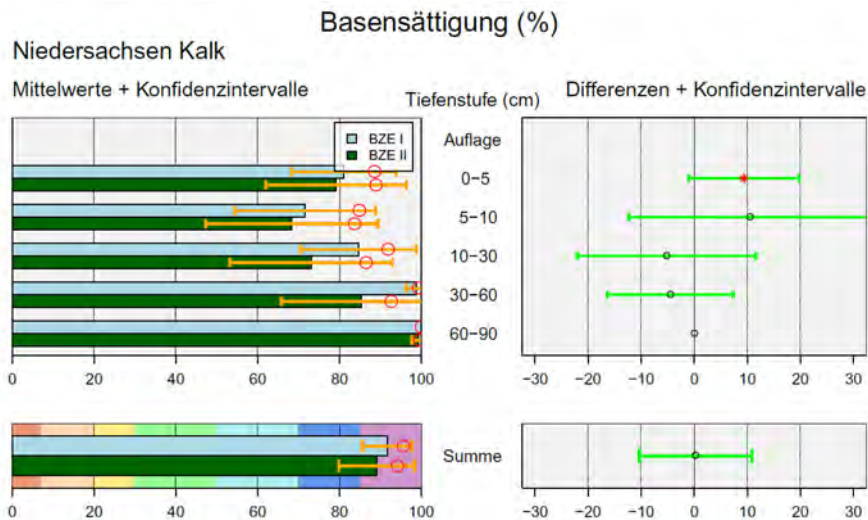


Abbildung 83: Basensättigung [%] der Substratgruppe Kalkstein in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 18$) und II ($n = 14$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 9$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.6 Organisch geprägte Standorte

Mit durchschnittlich 20 % Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe in der BZE II sind diese Standorte hinsichtlich der Basenversorgung gering bis gering-mittel zu bewerten. Die durchschnittlichen Werte liegen in 0-5 cm Bodentiefe mit 28 % etwas höher und fallen mit zunehmender Bodentiefe auf Werte um 20 % ab (s. Abb. 84). Auffallend sind die weiten Konfidenzintervalle, die sich aus der Zusammensetzung der Substratgruppe mit Niedermooren (eher hohe Basensättigung) und ehemaligen Hochmooren (eher sehr geringe Basensättigung) ergeben. Die minimale Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe beträgt nur 3 % (Sanddeckkultur über Moor), die maximale 100 % (Erdniedermoor mit Schwarzerle). Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung zum Zeitpunkt der BZE I mit einem Durchschnitt von 40 % basieren auf nur 4 BZE-Punkten bei sehr hoher Streuung und sind daher nicht mit der BZE II vergleichbar. Dies trifft auch auf die Veränderungen der Basensättigung zu. Signifikante Veränderungen zur BZE I gab es nicht.

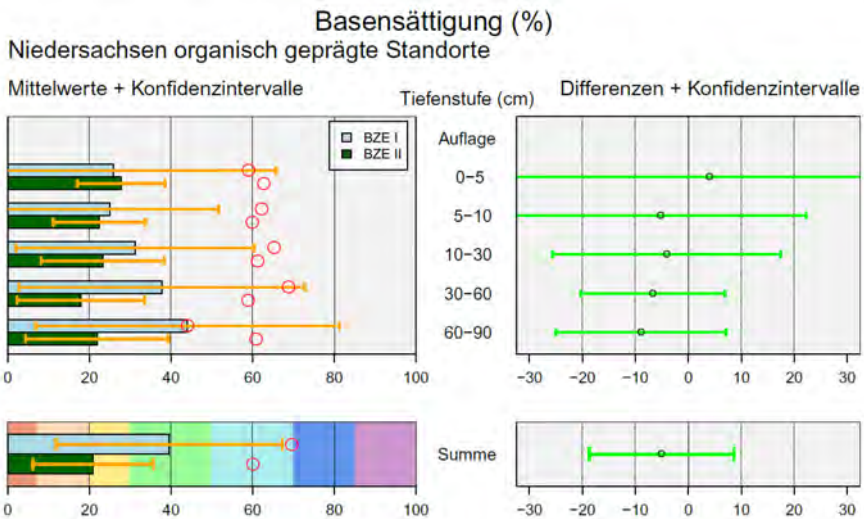


Abbildung 84: Basensättigung [%] der Substratgruppe organisch geprägte Standorte in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 4$) und II ($n = 13$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 9$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.7 Buntsandstein

Mit 19 % auf Profilebene liegen die Werte der durchschnittlichen Basensättigung in der Substratgruppe Buntsandstein bei der BZE II im geringen Bewertungsbereich. Mit 16 % Basensättigung im Durchschnitt waren die Werte der BZE I noch geringer (s. Abb. 85, Teilgrafik c). Die jeweils höchsten Werte bei der BZE I und II nach Tiefenstufen finden sich in 0-5 cm Bodentiefe. Hier ist der Einfluss organischer Substanz und der Waldkalkung am höchsten (s. Abb. 85, Teilgrafik a). Mit zunehmender Bodentiefe sinken die Werte der BZE II deutlich ab und liegen zwischen 10 und 24 %. Letztere werden in 60-90 cm Bodentiefe erreicht, womit diese Bodentiefe im gering-mittleren Bewertungsbereich liegt. Dies steht im Zusammenhang mit günstigeren bodenchemischen Verhältnissen in dieser Tiefe, wie beispielsweise höherer Austauschkapazität und höheren pH-Werten.

Signifikante Veränderungen zur BZE I wurden in keiner Tiefenstufe festgestellt. In der Tiefenstufe 0-5 cm stieg die Basensättigung von 22 % in der BZE I auf 34 % in der BZE II. Auswertungen zur Waldkalkung sind wegen des Fehlens ungekalkter Punkte in diesem BZE-Kollektiv nicht möglich. Auf Profilebene änderte sich die durchschnittliche Basensättigung nicht signifikant, in der Tendenz wurden bei der BZE II leicht höhere Werte im jeweiligen Gesamtmittel festgestellt (s. Abb. 85, Teilgrafik c), die mittleren Differenzen ergaben eine leichte Abnahme (s. Abb. 85, Teilgrafik d).

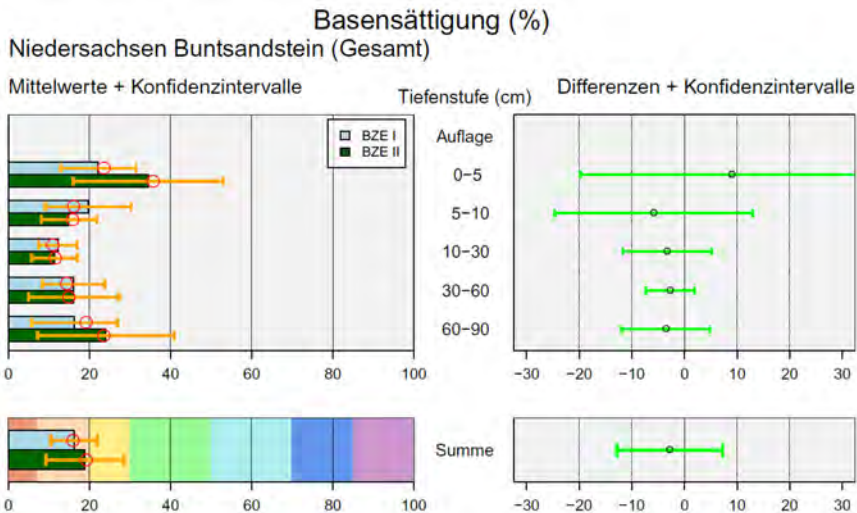


Abbildung 85: Basensättigung [%] der Substratgruppe Buntsandstein in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 20$) und II ($n = 10$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 9$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.8 Tonschiefer

Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung bei den BZE-Punkten der Substratgruppe Tonschiefer bei der BZE II bei 21 % und fällt damit noch in den gering-mittleren Bewertungsbereich. Der Tonschiefer ist dabei mit dem Buntsandstein vergleichbar. Im Mittel der BZE I lagen diese Standorte mit einer durchschnittlichen Basensättigung von 11 % noch im geringen Bewertungsbereich. Die Basensättigung hat sich somit durchschnittlich um 10 %-Punkte verbessert. Diese Zunahme lässt sich signifikant absichern (s. Abb. 86, Teilgrafik d).

Die BZE-Punkte der Substratgruppe Tonschiefer sind alle gekalkt worden. Die Waldkalkung kann als plausible Erklärung für die Zunahmen der Basensättigung von der BZE I zur BZE II in den oberen 30 cm des Mineralbodens angesehen werden (s. Abb. 86, Teilgrafik b). Die Zunahmen lagen zwischen 18 %- (in 0-5 cm) und 9 %-Punkten (5-10 cm) und sind für die Tiefenstufe 10-30 cm mit knapp 14 %-Punkten signifikant. In den tieferen Bodenschichten gab es keine signifikanten Änderungen. Auch hier stieg die Basensättigung zwischen der BZE I und II an.

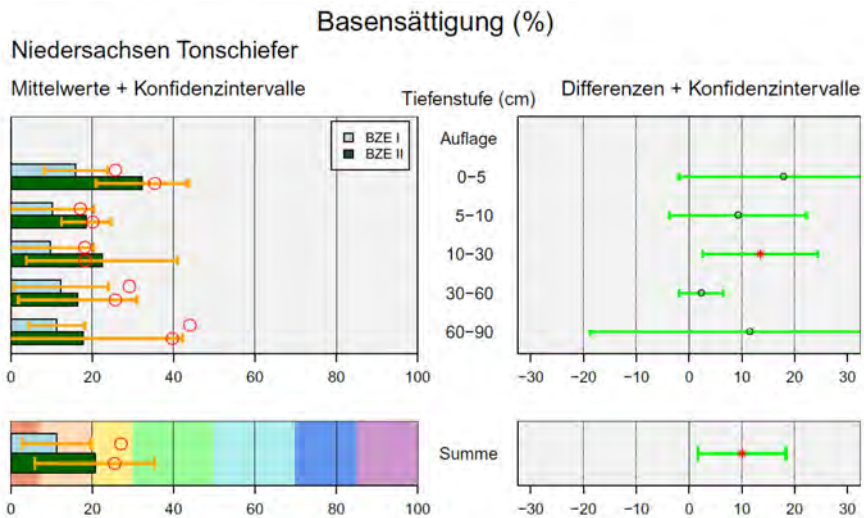


Abbildung 86: Basensättigung [%] der Substratgruppe Tonschiefer in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 7$) und II ($n = 7$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 6$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.9 Grauwacke

Die BZE-Punkte in der Substratgruppe Grauwacke liegen mit durchschnittlich 36 % Basensättigung im mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 87, Teilgrafik c). Alle Grauwacke-Standorte der BZE I in Niedersachsen sind gekalkt worden. Wie bereits beim Buntsandstein und dem Tonschiefer können die höheren Werte der Basensättigung in allen Tiefenstufen der Grauwacke mit der Waldkalkung plausibel erklärt werden. Signifikante Veränderungen zwischen beiden BZE-Erhebungen konnten jedoch nicht nachgewiesen werden, zumal nur zwei Standorte bei beiden Erhebungen beprobt wurden. In der Substratgruppe Grauwacke sind die Konfidenzintervalle hoch, was auch auf die sehr unterschiedliche Zusammensetzung dieses Gesteins zurückgeführt werden kann. Grundsätzlich zählt die Grauwacke zu den basenarmen Silikatgesteinen, sie kann aber in Ausnahmefällen auch basenreich sein.

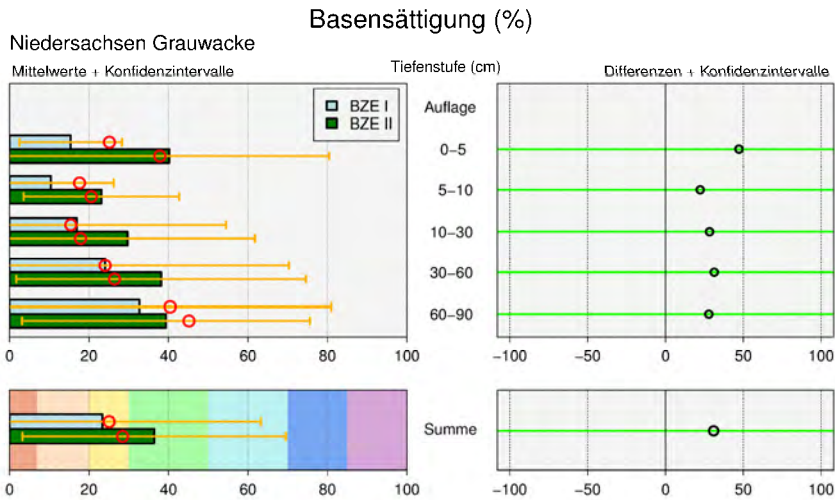


Abbildung 87: Basensättigung [%] der Substratgruppe Grauwacke in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 4$) und II ($n = 5$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 2$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.10 Lehm

Die sechs BZE II-Punkte der Substratgruppe Lehm liegen mit durchschnittlich 82 % Basensättigung im hohen Bewertungsbereich (s. Abb. 88, Teilgrafik c). Der entsprechende Wert der BZE I lag mit knapp 60 % im mittel-hohen Bewertungsbereich. Dieser Unterschied ergibt sich jedoch nicht aus den Differenzen der bei beiden Erhebungen beprobten BZE-Punkte. Hier ergeben sich keine relevanten Unterschiede (s. Abb. 88, Teilgrafik d). Aufgrund der Neuausrichtung des BZE-Rasters sind von den 13 BZE-Punkten in der Substratgruppe Lehm nur 5 auch in der BZE II beprobt worden, sodass die Kollektive nur bedingt vergleichbar sind.

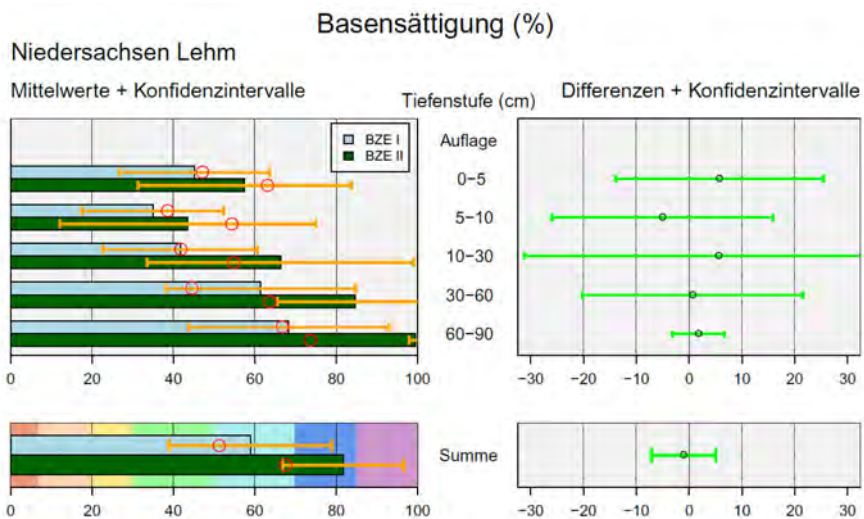


Abbildung 88: Basensättigung [%] der Substratgruppe Lehm in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 13$) und II ($n = 6$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 5$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.11 Ton(stein)

Mit knapp 60 % durchschnittlicher Basensättigung liegen die BZE II-Punkte der Substratgruppe Ton(stein) im mittel-hohen Bewertungsbereich der Basensättigung (s. Abb. 89) und damit doppelt so hoch wie der Mittelwert von Niedersachsen insgesamt. Der Ton(stein) zählt im Allgemeinen zu den Standorten mit den höchsten Werten für die Basensättigung. Es kommen aber auch stark tonige Substrate mit geringerer Basensättigung vor. Dies zeigt sich an weiten Konfidenzintervallen für alle Tiefenstufen und der Profilsomme. Signifikante Änderungen konnten nicht nachgewiesen werden.

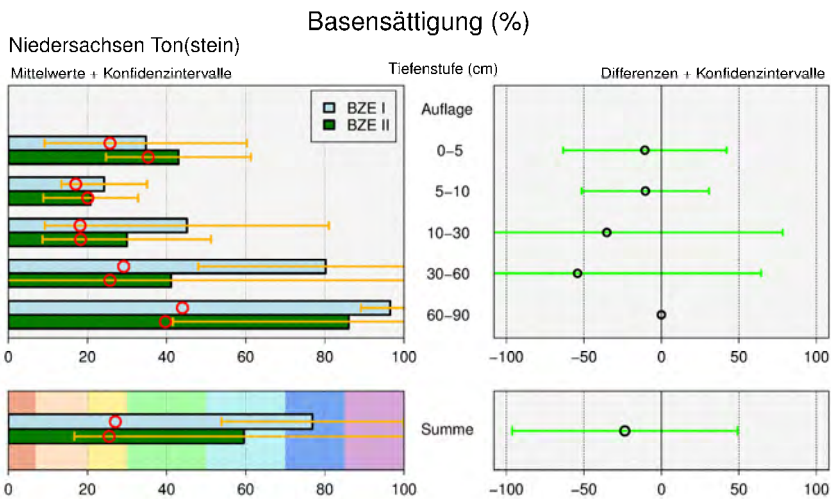


Abbildung 89: Basensättigung [%] der Substratgruppe Ton(stein) in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 6$) und II ($n = 4$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 3$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.2.1.12 Kreidesandstein und Granit

Der Kreidesandstein ist mit zwei BZE-Punkten vertreten. Die durchschnittliche Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe beträgt 24 % in der BZE II und betrug 30 % in der BZE I. Er fällt damit in beiden Erhebungen in den gering-mittleren Bewertungsbereich. Mit 40 % Basensättigung in der Tiefenstufe 0-5 cm weist der Kreidesandstein dort eine mittlere Versorgung auf, mit zunehmender Bodentiefe fallen die Werte unter 20 %.

Der Granit ist mit einem BZE-Punkt vertreten. Die durchschnittliche Basensättigung liegt mit 19 % in der BZE II und 16 % in der BZE I jeweils im geringen Bewertungsbereich.

6.5.3 *Vorräte austauschbarer Calcium-, Magnesium- und Kaliumkationen*

Neben den bodenchemischen Parametern Austauschkapazität und Basensättigung sind die Vorräte der austauschbaren Nährelemente wichtige Indikatoren für die Abschätzung der Nährstoffversorgung der Waldbäume. Die austauschbaren Vorräte dieser Hauptnährelemente sind für die Waldbäume leicht bis mittel verfügbar und bilden die zentrale Versorgungsgrundlage. Die ausreichende Verfügbarkeit dieser Nährelemente in größeren Mengen ist für das Pflanzenwachstum und die Biomassebildung erforderlich. Calcium ist ein wichtiger Baustein für die Zellwände und an zentralen Prozessen, wie z. B. Photosynthese, Atmung und Zellteilung beteiligt. Magnesium spielt als Baustein im Chlorophyll für die Photosynthese eine entscheidende Rolle. Kalium ist für die Osmoseregulation in den Zellen notwendig. Alle drei Elemente fördern die Aktivität von Enzymen und steuern die Eiweißsynthese, den Aufbau von Kohlehydraten und die Photosynthese. Die Nährelemente Calcium, Magnesium und vor allem Kalium werden im Zuge der Bodenversauerung durch Aluminium vom Austauscher verdrängt und mit dem Sickerwasser zumeist zusammen mit Sulfat und Nitrat aus dem Hauptwurzelraum ausgewaschen. Neben der Auswaschung und Entzügen mit der Holzernte sind Einträge aus der Luft, Waldkalkungen sowie die Mineralverwitterung bestimmende Größen des Nährstoffhaushalts. Analog zur Austauschkapazität und Basensättigung wurden diese drei Nährelemente für Niedersachsen übergreifend und nach den Substratgruppen gegliedert ausgewertet. Im vorliegenden Bericht werden nur die wichtigsten Ergebnisse exemplarisch dargestellt.

6.5.3.1 *Calcium*

Calcium hat im Allgemeinen die höchsten Anteile an den basischen Kationen am Austauscher. In Niedersachsens Waldböden variieren die summierten Vorräte im Wurzelraum bis 90 cm Bodentiefe zusammen mit dem Auflagehumus von 95 kg/ha bis über 31 t/ha. Diese große Spanne ist typisch für das weite Spektrum an Waldstandorten und deckt alle Bewertungsbereiche ab. Im ersten Fall handelt es sich um einen Braunerde-Regosol auf Flugsand mit Kiefer bei Meppen, im zweiten Fall um ein mächtiges Kolluvium einer Auenablagerung mit hohen pH-Werten bei Hess. Oldendorf.

Mit durchschnittlich rund 4.000 kg Calcium je ha (Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe) liegen die niedersächsischen Waldstandorte im mittelhohen bis hohen Bewertungsbereich. Zum Zeitpunkt der BZE I lagen die durchschnittlichen Vorräte bei rund 3.900 kg im ähnlicher Größenordnung (s. Abb. 90, Teilgrafik c). Der Unterschied darf jedoch nicht als zeitliche Veränderung interpretiert werden. Die mittlere Differenz auf Profilebene bis 90 cm Bodentiefe der 111 Punkte, die zu beiden BZE-Erhebungen beprobt wurden, ergab keinen signifikanten Unterschied (s. Abb. 90, Teilgrafik d).

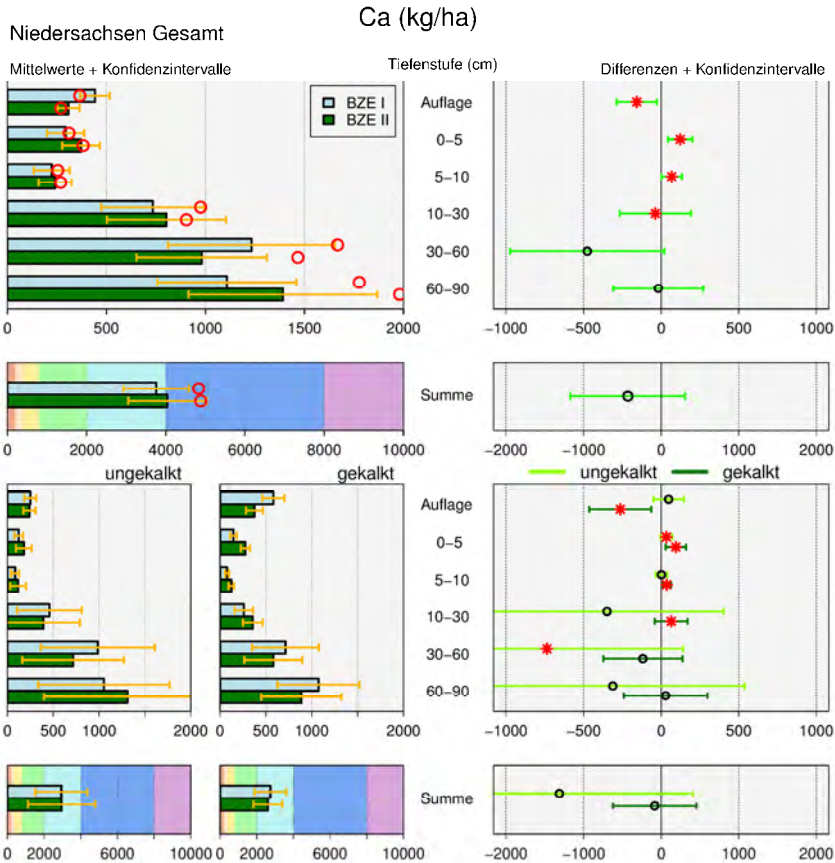


Abbildung 90: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 208$) und II ($n = 170$) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I ($n = 111$) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken,) und nach ungekalkt (BZE I $n = 62$, BZE II $n = 47$, Schnittmenge $n = 27$) und gekalkt (BZE I $n = 114$, BZE II $n = 94$, Schnittmenge $n = 69$) in den unteren 6 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Im Hinblick auf die Veränderungen in den Tiefenstufen zeigt sich eine signifikante Abnahme im Auflagehumus um rund 160 kg, was einer Abnahme um 35 %-Punkte bezogen auf die BZE I entspricht (s. Abb. 90, Teilgrafik b). Dies kann nicht allein auf einen Rückgang der Trockenmasse zurückgeführt werden, der gegenüber der BZE I lediglich 5 % betrug. Damit ist Calcium entweder über die Wurzeln aufgenommen oder in den Mineralboden verlagert worden.

Tatsächlich finden sich in den Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm des Mineralbodens signifikante Zunahmen um rund 120 kg und 70 kg Calcium je ha und eine leichte, auch signifikante Abnahme von rund 40 kg/ha in der Tiefenstufe 10-30 cm. In den anschließenden Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm sind die Calciumvorräte in der BZE II geringer, besonders in der Tiefenstufe 30-60 cm, die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. Insgesamt hat sich damit der Gesamtvorrat an austauschbarem Calcium auf Profilebene wenig verändert. Die Abnahme um 86 kg/ha zwischen beiden Erhebungen (mittlere Profilsomme BZE I und II) ist mit 2 % bezogen auf den Vorrat der BZE I gering (s. Abb. 90, Teilgrafiken b und d).

Die Waldkalkung beeinflusst die Calciumvorräte im Auflagehumus und Mineralboden. Dies wird in den Teilgrafiken e-j der Abbildung 90 ersichtlich. Insgesamt zeigt sich im gekalkten Kollektiv eine signifikante Abnahme im Auflagehumus von -263 kg/ha Calcium. Dies entspricht ungefähr der Hälfte bezogen auf den Vorrat der BZE I. Im Mineralboden nahm Calcium bis in 30 cm Bodentiefe signifikant zu. Mit rund 200 kg/ha Calcium erhöhte sich damit der Vorrat um 40 % bezogen auf die BZE I. Für das Gesamtprofil ergaben sich keine signifikanten Veränderungen. Die Abnahme um rund 80 kg/ha ist nicht signifikant und mit 3 % bezogen auf den Calciumvorrat der BZE I auch relativ gering.

Im ungekalkten Kollektiv kommt es mit rund 50 kg/ha zu einer leichten Zunahme im Auflagehumus. Dies entspricht +19 % bezogen auf den Calciumvorrat der BZE I. Die Calciumvorräte nehmen auch im ungekalkten Kollektiv in der Tiefenstufe 0-5 cm um 34 kg/ha leicht signifikant zu. Insgesamt ergeben sich aber bis 30 cm Bodentiefe rechnerisch Calciumverluste von insgesamt rund 300 kg/ha. Bezogen auf die BZE I haben sich damit die austauschbaren Calciumvorräte ungefähr halbiert. Noch höher sind die Calciumverluste in den Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm Bodentiefe, die für 30-60 cm auch signifikant sind. Die weiten Konfidenzintervalle sowie die hohe Vielfalt der vorkommenden Waldstandorte in Niedersachsen erschweren eine sinnvolle Interpretation für diese Bodentiefen. In der Substratgruppe Ton(stein) kam es z. B. zu sehr hohen Calciumverlusten in der BZE II, da tonige Schichten mit sehr hohen Vorräten in der BZE II nicht in derselben Tiefenstufe gefunden wurden.

Rechnerisch ergeben sich im ungekalkten Kollektiv auf Profilebene in der BZE II um rund 30 % geringere Vorräte als in der BZE I. Dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant.

Die Calciumvorräte im Auflagehumus und Mineralboden auf Profilebene sind stark von den Substratgruppen abhängig (s. Abb. 91):

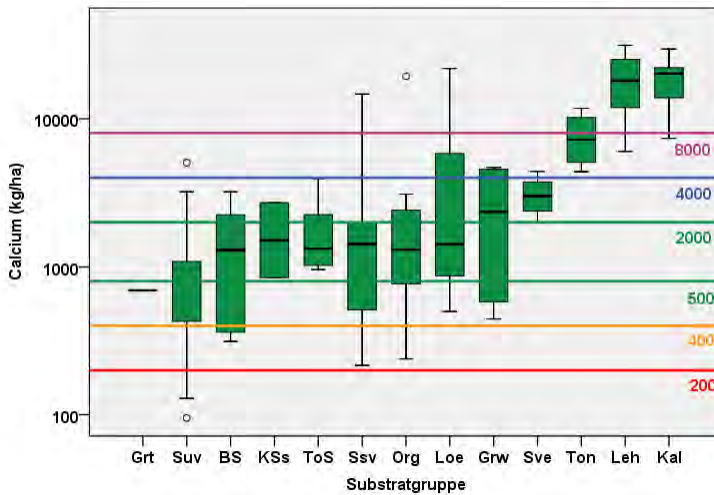


Abbildung 91: Verteilung der austauschbaren Calciumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in niedersächsischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (Ordinate logarithmisch skaliert) (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

Mit Ausnahme des Granits (nur ein BZE-Punkt), der im gering-mittleren Bewertungsbereich liegt, fallen die unverlehmten Sande, Buntsandstein, Kreidesandstein, Tonschiefer, schwach verlehmtte Sande, organisch geprägte Standorte und Lösslehm mit ihren Verteilungen der Calciumvorräte bis 90 cm Bodentiefe überwiegend in den mittleren Bewertungsbereich von 500 bis 2.000 kg/ha. Bei den unverlehmten und schwach verlehmten Sanden sowie organisch geprägten Standorten gibt es aber auch BZE-Punkte mit Calciumvorräten bis 90 cm Bodentiefe im geringen bis sehr geringen Bewertungsbereich. Die BZE-Punkte der Substratgruppen Grauwacke und verlehmtte Sande fallen mit ihren Medianen in den mittel-hohen Bewertungsbereich. Die höchsten Calciumvorräte mit rund 8.000 kg/ha und darüber weisen Ton(stein), Lehm und Kalkstein auf.

In Abbildung 92 sind die bis 90 cm Bodentiefe summierten Calciumvorräte nach Substratgruppen und Tiefenstufen dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-30 cm zu einer Tiefenstufe zusammengefasst.

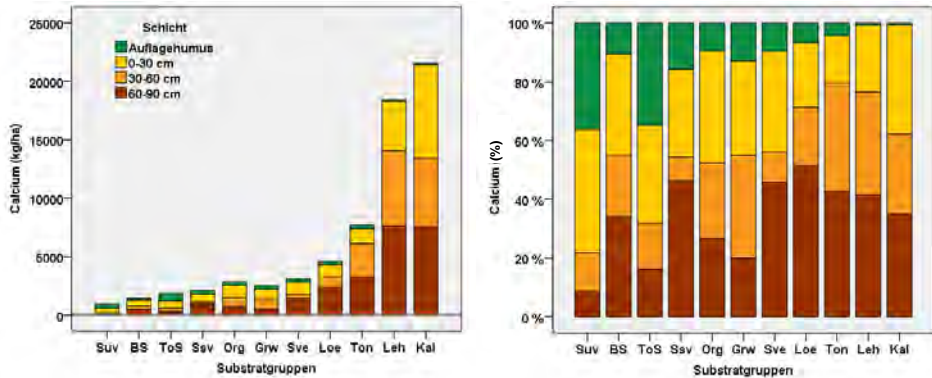


Abbildung 92: Austauschbare Calciumvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen (0-30, 30-60, 60-90 cm) bei der BZE II in Niedersachsen nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Die Verteilung der Calciumvorräte in den Tiefenstufen zeigt zwischen den Substratgruppen typische Muster. Bei den Substratgruppen mit eher geringen Vorräten (v. a. unverlehmtter Sand, Tonschiefer) sind die relativen Anteile an Calcium im Auflagehumus mit Werten um 35 % am höchsten. Bei mittleren Vorräten im Mineralboden liegen die im Auflagehumus gespeicherten Calciumvorräte unter 20 %, bei den Kalken, Lehmen, Ton(stein)en und Lösslehmen unter 10 %. Umgekehrt nehmen die Anteile der unteren Bodenschichten am Gesamtvorrat, vor allem in 60-90 cm Bodentiefe, mit zunehmendem Gesamtvorrat zu. Bei den unverlehmtten Sanden beträgt der Calciumvorrat in 60-90 cm Bodentiefe 9 %, beim Lösslehm dagegen rund 50 %. Bei den verlehmtten und schwach verlehmtten Sanden sind jeweils 46 % der Calciumvorräte in der Tiefenstufe 60-90 cm gespeichert. Beim Kalkstein führen hohe Skelettgehalte zu geringeren Vorräten in tieferen Bodenschichten.

Höhere Calciumvorräte bei der BZE II im Vergleich zur BZE I traten auf Gesamtprofilebene vor allem bei der Grauwacke (+80 %), verlehmtten Sanden (+61 %) und Tonschiefer (+50 %) auf, geringere Calciumvorräte wurden bei Ton(stein) (-50 %), Buntsandstein (-40 %) und Lösslehm (-23 %) festgestellt. Diese Unterschiede waren jedoch auf Gesamtprofilebene in keinem Fall signifikant und sind nicht dargestellt.

Signifikant höhere Calciumvorräte gab es jedoch in Schichten einzelner Substratgruppen: Im Lösslehm verdoppelten sich die Calciumvorräte in 0-30 cm Bodentiefe, beim Tonschiefer nahmen die Calciumvorräte in 0-60 cm Bodentiefe um 125 % zu und beim unverlehmtten Sand gab es Zunahmen um 44 % in 0-30 cm Bodentiefe, jeweils im Vergleich zur BZE I. Im Auflagehumus kam es bei den einzelnen Substratgruppen zu keiner signifikanten Änderung.

Die Zunahmen der Calciumvorräte gehen auf die Waldkalkung zurück, wie dies beispielhaft in Abbildung 93 für den unverlehmten Sand dargestellt ist.

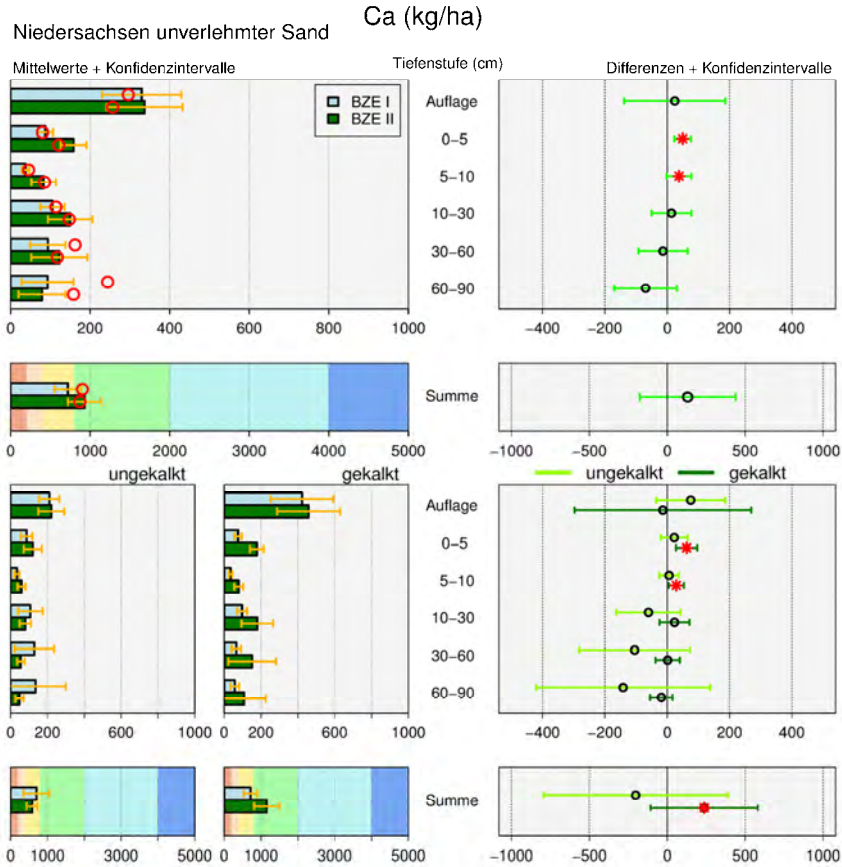


Abbildung 93: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand niedersächsischer Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 57$) und II ($n = 63$) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I ($n = 35$) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt (BZE I $n = 25$, BZE II $n = 29$, Schnittmenge $n = 15$) und gekalkt (BZE I $n = 32$, BZE II $n = 32$, Schnittmenge $n = 20$) in den unteren 6 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Bei den gekalkten BZE-Punkten der Substratgruppe unverlehmter Sand stiegen die Calciumvorräte auf Profilebene um rund 240 kg/ha an (+32 %). Dieser Anstieg ist signifikant. Dabei änderten sich die Calciumvorräte im Auflagehumus nicht nennenswert, es kam aber jeweils in den Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm Bodentiefe zu einer Verdoppelung, was in beiden Fällen signifikant war. In den weiteren Tiefenstufen waren die Änderungen nicht signifikant und geringer.

Im Gegensatz dazu verringerten sich die Calciumvorräte im Mittel der ungekalkten BZE-Punkte dieser Substratgruppe ab 10 cm Bodentiefe in jeder Tiefenstufe, allerdings in keinem Fall signifikant, auch nicht für das mittlere Gesamtprofil. Rechnerisch ergeben sich bezogen auf die Vorräte der BZE I Verluste von ungefähr 25 %.

6.5.3.2 *Magnesium*

Magnesium hat im Vergleich zu Calcium deutlich geringere Anteile an den basischen austauschbaren Kationen. In Niedersachsens Waldböden variieren die bis 90 cm Bodentiefe aufsummierten Vorräte von 30 kg bis über 12 t je ha. Diese Spanne deckt alle Bewertungsbereiche ab. Die geringsten Magnesiumvorräte finden sich in einem Braunerde-Podsol in der Substratgruppe unverlehmter Sand bei Hermannsburg in der Lüneburger Heide, die höchsten in einem Braunerde-Pelosol im tonigen Röt bei Göttingen. Dieser Standort hat auch die höchste Austauschkapazität aller BZE-Punkte in Niedersachsen.

In Abbildung 94 sind die durchschnittlichen austauschbaren Magnesiumvorräte für Niedersachsen dargestellt.

Mit rund 580 kg/ha Magnesium in der Humusaufgabe und dem Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe liegen die durchschnittlichen Vorräte in Niedersachsens Waldböden im mittel-hohen Bewertungsbereich und sind damit deutlich geringer als das Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Hessen (s. Abb. 94, Teilgrafik c). Vor allem in den Bodentiefen ab 30 cm ist der Mittelwert in Niedersachsen deutlich niedriger als der Drei-Länder-Mittelwert. Insgesamt gab es zwischen beiden BZE-Erhebungen auf Profilebene eine leichte Abnahme um rund 50 kg/ha, was bezogen auf den Vorrat der BZE I einer Verringerung um 7 % entspricht. Diese Differenz ist jedoch nicht signifikant. Im Auflagehumus sind zum Zeitpunkt der BZE II mit 66 kg/ha Magnesium rund 12 % des Gesamtvorrates bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Die Magnesiumvorräte im Auflagehumus haben zwischen den beiden BZE-Erhebungen im Mittel für Niedersachsen deutlich abgenommen (von 111 auf 66 kg/ha), dieser Unterschied ist signifikant. Dies ist analog zu Calcium nicht nur auf den Rückgang der Trockenmasse, sondern vor allem auf geringere Konzentrationen im Auflagehumus zurückzuführen. Teilweise wird dies durch signifikant höhere Vorräte in den Tiefenstufen 0-5 cm (+100 %) und 5-10 cm (+80 %) im Mineralboden ausgeglichen. In 10-30 cm gab es eine leichte, signifikante Abnahme (-9 %) und in 30-60 cm mit rund 50 kg/ha (-30 %) eine deutliche, aber nicht signifikante Abnahme. In 60-90 cm änderte sich der Magnesiumvorrat mit einer Zunahme um 5 % im Vergleich zur BZE I nur wenig.

Diese Änderungen stehen im engen Zusammenhang mit der Waldkalkung. In Abbildung 94, Teilgrafik g, zeigen sich im Auflagehumus und in allen Tiefenstufen signifikante Veränderungen im gekalkten Kollektiv mit einem deutlichen Rückgang

der Vorräte im Auflagehumus und Zunahmen im Mineralboden bis in 90 cm Bodentiefe. Im ungekalkten Kollektiv gibt es ausschließlich in 0-5 cm eine signifikante Zunahme, alle anderen Veränderungen sind nicht signifikant. Im gekalkten Kollektiv blieben die Magnesiumvorräte auf Profilebene konstant. Rechnerisch gleicht sich die mittlere Magnesiumabnahme im Auflagehumus mit der Zunahme im Mineralboden aus. Im ungekalkten Kollektiv dagegen nahmen die Magnesiumvorräte um 25 % bezogen auf die Vorräte der BZE I ab, allerdings nicht signifikant (s. Abb. 94, Teilgrafik j).

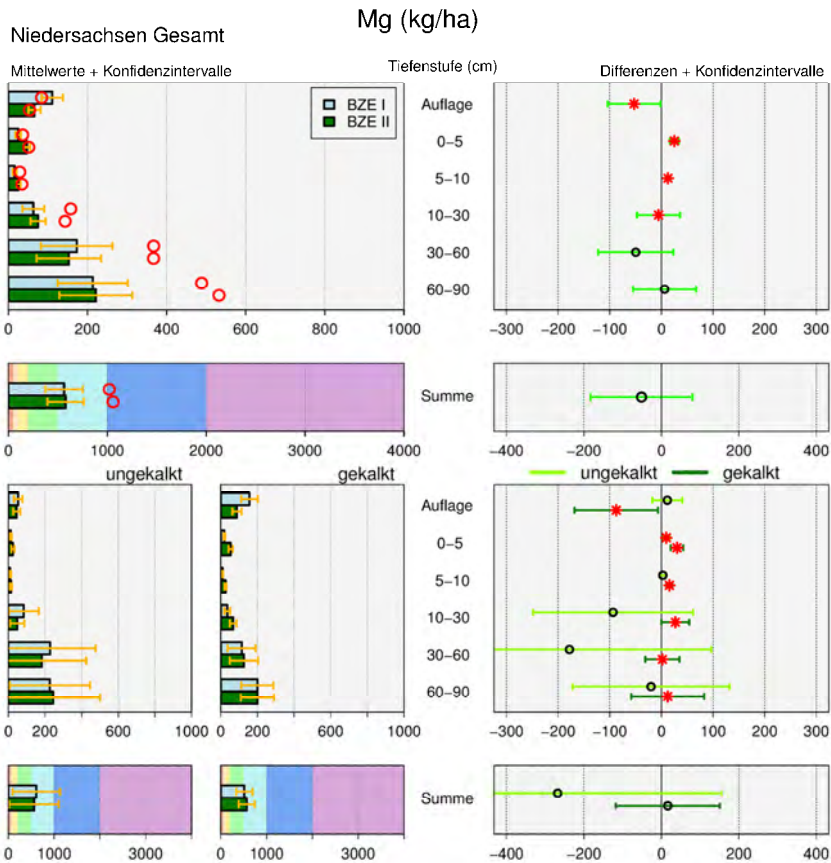


Abbildung 94: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] niedersächsischer Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 197$) und II ($n = 170$) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I ($n = 104$) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt (BZE I $n = 62$, BZE II $n = 47$, Schnittmenge $n = 27$) und gekalkt (BZE I $n = 114$, BZE II $n = 94$, Schnittmenge $n = 69$) in den unteren 6 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Die Magnesiumvorräte zeigen – ähnlich wie die Calciumvorräte – deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von den Substratgruppen:

Vergleichbar mit Calcium fallen die unverlehmten Sande mit mittleren 170 kg/ha Magnesiumvorrat im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm in den gering-mittleren Bewertungsbereich, wobei einige BZE-Punkte in diesem Kollektiv auch im geringen Bewertungsbereich unter 50 kg/ha liegen (s. Abb. 95). Etwas besser sind die organisch geprägten Standorte, der Granit, die schwach verlehmten Sande, der Kreidesandstein und der Buntsandstein sowie der Tonschiefer einzustufen, die mit ihren Magnesiumvorräten überwiegend im mittleren Bewertungsbereich zwischen 200 und 500 kg/ha Magnesium liegen. Den mittel-hohen Bewertungsbereich erreichen die besser versorgten BZE-Punkte der Substratgruppen verlehnte Sande und Lösslehm, wobei der jeweilige Median noch im mittleren Bewertungsbereich liegt. Die Grauwacken und Kalksteine befinden sich im mittel-hohen, die Lehme im hohen und die Tone im sehr hohen Bewertungsbereich über 2.000 kg/ha Magnesium mit einem durchschnittlichen Magnesiumvorrat von rund 6.000 kg/ha.

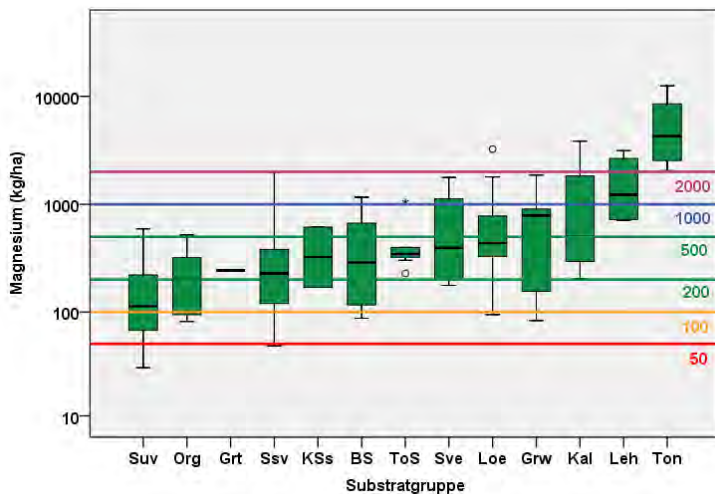


Abbildung 95: Verteilung der austauschbaren Magnesiumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in niedersächsischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (Ordinate logarithmisch skaliert) (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

Ähnlich der Verteilung der Calciumvorräte weisen auch die Magnesiumvorräte auf den eher ärmeren Standorten die höchsten Anteile von Magnesium im Auflagehumus auf (s. Abb. 96). Dies betrifft besonders die unverlehmten sowie schwach verlehmten Sande, die organisch geprägten Standorte und im besonderen Maße den

Tonschiefer. Bei diesen Standorten liegen zwischen 20 % und 50 % der Magnesiumvorräte im Auflagehumus. Bei den besser versorgten Standorten der Substratgruppen Buntsandstein, verlehmtter Sand, Lösslehm, Ton(stein), Kalkstein und Lehm wird das meiste Magnesium hingegen im Unterboden ab 30 cm gespeichert. Hier liegen die Anteile zwischen 60 und 90 %.

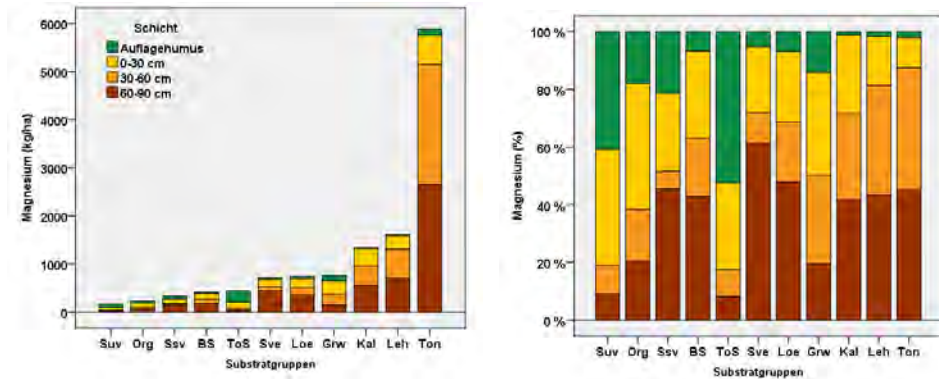


Abbildung 96: Austauschbare Magnesiumvorräte im Auflagehumus und in den Tiefenstufen (0-30, 30-60, 60-90 cm) bei der BZE II in Niedersachsen nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Hinsichtlich der zeitlichen Veränderungen der Magnesiumvorräte der einzelnen Substratgruppen auf Profilebene traten im Vergleich der BZE II zur BZE I teilweise deutlich höhere Vorräte auf, z. B. beim verlehmtten Sand oder der Grauwacke. Diese Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Auch Abnahmen kamen vor (z. B. beim Granit, Buntsandstein, Ton(stein)), doch auch hier konnten die Unterschiede nicht abgesichert werden. Nur beim unverlehmtten Sand zeigten sich auf Profilebene um 30 % signifikant höhere Magnesiumvorräte im Vergleich zur BZE I (s. Abb. 97).

Die signifikanten Zunahmen auf Profilebene (s. Abb. 97, Teilgrafik d) beruhen vor allem auf den ebenfalls signifikanten Zunahmen im Mineralboden aller Tiefenstufen bis 30 cm Bodentiefe (Teilgrafik b). Die leichte Abnahme in der Tiefenstufe 30-60 cm und die deutliche Abnahme in 60-90 cm (-74% bezogen auf den Vorrat der BZE I) werden damit mehr als kompensiert. Wie bereits beim Calcium zeigt sich hier die Wirkung der Waldkalkung: Die signifikanten Zunahmen bis 30 cm Bodentiefe treten nur im gekalkten Kollektiv auf. Im ungekalkten Kollektiv sind alle Veränderungen nicht signifikant. Auffällig sind die hohen Abnahmen in 30-60 und 60-90 cm Bodentiefe im ungekalkten Kollektiv (-80 % und -120 % bezogen auf die BZE I). Im gekalkten Kollektiv kam es hier zu Zunahmen (+50 % und +34 %). Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

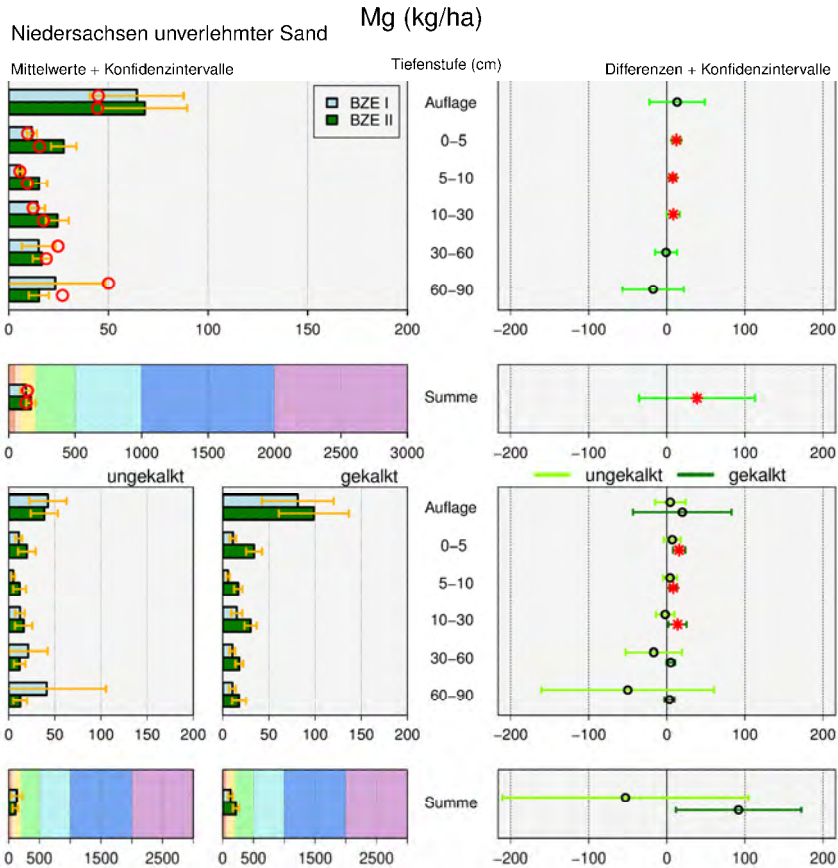


Abbildung 97: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] niedersächsischer Waldböden der Substratgruppe unverlehmter Sand als Mittelwert für die BZE I (n = 57) und II (n = 63) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I (n = 35) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt (BZE I n = 25, BZE II n = 29, Schnittmenge n = 15) und gekalkt (BZE I n = 32, BZE II n = 32, Schnittmenge n = 20) in den unteren 6 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

In den anderen Substratgruppen treten nur in einzelnen Tiefenstufen signifikante Veränderungen auf. Signifikante Zunahmen gab es im Buntsandstein in den Tiefenstufen 5-10 und 10-30 cm, im Lösslehm bis 30 cm Bodentiefe, im schwach verlehnten Sand bis 10 cm und im Tonschiefer in 10-30 cm Bodentiefe. Zu signifikanten Abnahmen kam es im Auflagehumus der Substratgruppe schwach verlehmter Sand und Kalkstein. Die Zunahmen im Mineralboden lassen sich mit der Waldkalkung begründen. Alle oben genannten Substratgruppen mit Ausnahme des Kalksteins sind in Niedersachsen weitgehend gekalkt worden. Absichern lässt sich dies beim

Buntsandstein in 5-10 und 10-30 cm, im Lösslehm in 0-5 cm und im schwach verlehnten Sand in den Tiefenstufen bis 30 cm sowie beim Tonschiefer in 10-30 cm.

6.5.3.3 *Kalium*

Bei Kalium decken die an den BZE-Punkten im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe vorkommenden Vorräte fast das ganze Spektrum der Bewertungsskala ab. Die Spanne reicht von 12 kg/ha Kalium in einer Kalkstein-Rendzina bei Alfeld bis knapp 1.600 kg/ha in einem Pelosol-Pseudogley aus Juraton im Lappwald. Kaliumvorräte im sehr hohen Bewertungsbereich kommen an den BZE II-Punkten Niedersachsens nicht vor.

Die mittleren Vorräte und Veränderungen für Niedersachsen sind nach Tiefenstufen in Abbildung 98 dargestellt.

Mit 420 kg/ha Kalium bei der BZE I und 340 kg/ha bei der BZE II sind die mittleren Vorräte an Kalium im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe vom gering-mittleren in den geringen Bewertungsbereich gesunken. Die Differenz in der Schnittmenge von knapp 100 kg ist signifikant und bedeutet rechnerisch eine Verminderung des austauschbaren Kaliumvorrates um -20 % bezogen auf die Werte der BZE I (s. Abb. 98, Teilgrafik d).

In der BZE II sind im Auflagehumus mit rund 50 kg/ha Kalium 14 % des Gesamtvorrates gespeichert. Bezogen auf gleiche Mächtigkeiten sind im Mineralboden die Vorräte relativ gleichmäßig über alle Bodentiefen verteilt (s. Abb. 98, Teilgrafik a). Signifikante Veränderungen zur BZE I gab es bei der BZE II in der Tiefenstufe 0-5 cm mit einer Zunahme von rund 3 kg/ha Kalium, d. h. einer Zunahme um 11 % bezogen auf den Kaliumvorrat der BZE I. Ab 10 cm Bodentiefe kam es zu signifikanten Abnahmen in jeder Tiefenstufe bis 90 cm, insgesamt mit rund 100 kg Kalium von insgesamt -30 % bezogen auf den Vorrat der BZE I.

Durch die Waldkalkung ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen den Kaliumvorräten der gekalkten und der ungekalkten Kollektive der BZE. In beiden Kollektiven sind die mittleren Kaliumvorräte in der BZE II auf Profilebene um 13-15 % geringer als in der BZE I. In den einzelnen Tiefenstufen sind die Tendenzen vergleichbar. Die Zunahmen in 0-5 cm um 8 kg/ha (+35 % bezogen auf die BZE I) und Abnahmen in 30-60 cm Bodentiefe um 34 kg/ha Kalium (-30 %) sind nur im gekalkten Kollektiv signifikant, in der Tendenz aber im ungekalkten Kollektiv ähnlich (s. Abb. 98, Teilgrafik g).

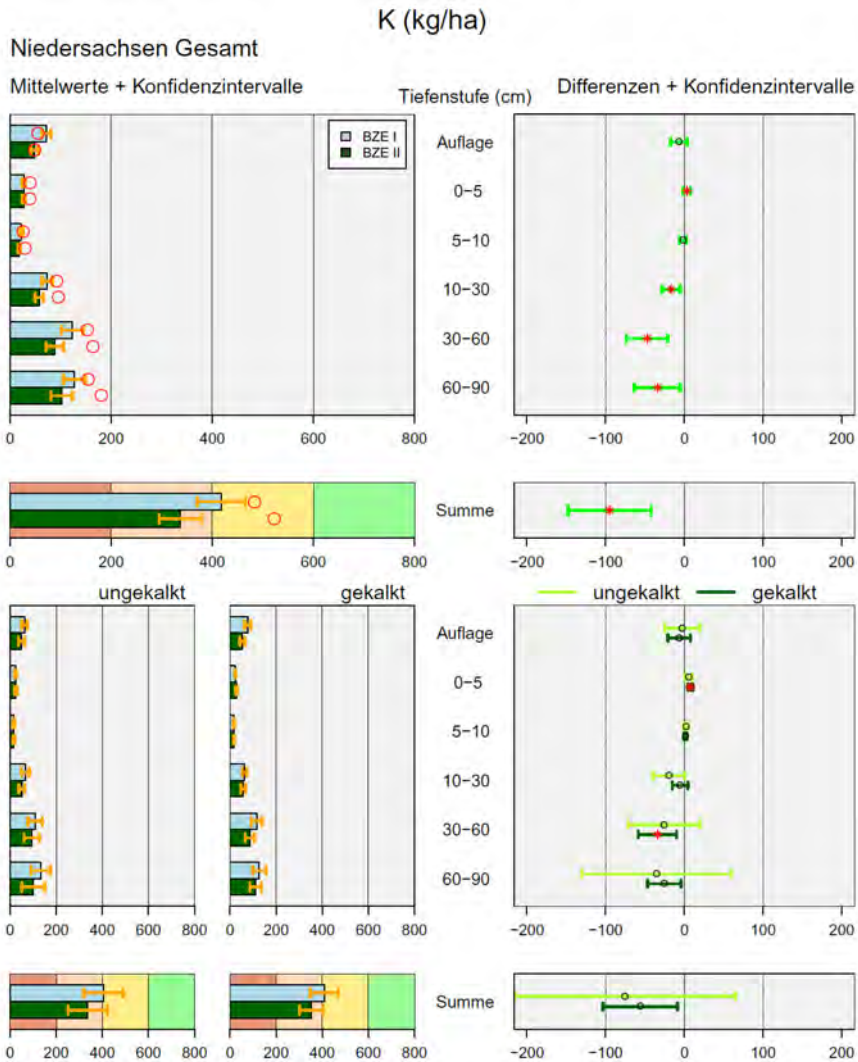


Abbildung 98: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 208) und II (n = 170) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I (n = 111) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken,) und nach ungekalkt (BZE I n = 62, BZE II n = 47, Schnittmenge n = 27) und gekalkt (BZE I n = 114, BZE II n = 94, Schnittmenge n = 69) in den unteren 6 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Im Unterschied zu den Calcium- und Magnesiumvorräten liegen die Kaliumvorräte in den Substratgruppen deutlich häufiger in den sehr geringen und geringen Bewertungsstufen (s. Abb. 99). Sehr geringe (unter 200 kg/ha) bis geringe Vorräte (unter

400 kg/ha) Kalium kommen überwiegend bei den unverlehmten Sanden, organisch geprägten Standorten, Granit, Kalkstein, Tonschiefer, Kreidesandstein, schwach verlehmten Sanden und Grauwacken sowie Lehmen vor. Buntsandstein, Lösslehme, verlehnte Sande und Ton(stein) liegen mit ihren Verteilungen in den gering-mittleren bis mittleren Bewertungsbereichen. Der Ton(stein) umfasst die weiteste Spanne. Er deckt vom geringen Bewertungsbereich mit 350 kg/ha bis hin zum hohen Bewertungsbereich mit knapp 1.600 kg/ha Kalium alle Bewertungsbereiche ab (s. Abb. 99).

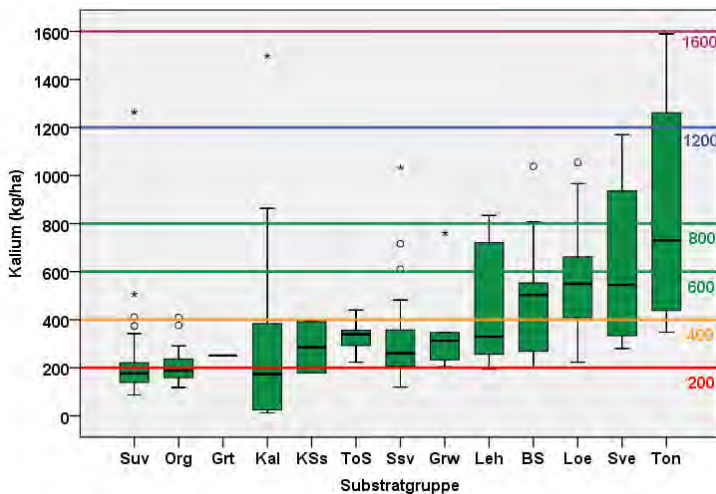


Abbildung 99: Verteilung der austauschbaren Kaliumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in niedersächsischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

Ähnlich wie Calcium und Magnesium liegt austauschbares Kalium auf ärmeren Standorten der schwach- und unverlehmten Sande, des Tonschiefers, der Grauwacke und den organisch geprägten Standorten mit einem relativ hohen Anteil zwischen 32 und 18 % im Auflagehumus vor (s. Abb. 100). Je höher der Lehmbeziehungswise der Tongehalt, desto höher liegen die Kaliumvorräte und deren Anteile in tieferen Bodenschichten. Auf den verlehmten Sanden, Lösslehmen, Buntsandstein und schwach verlehmten Sanden erreichen die relativen Anteile der Tiefenstufe 60-90 cm Werte über 30 %. Bei den Lehmen dagegen sind dies nur 8 % (s. Abb. 100).

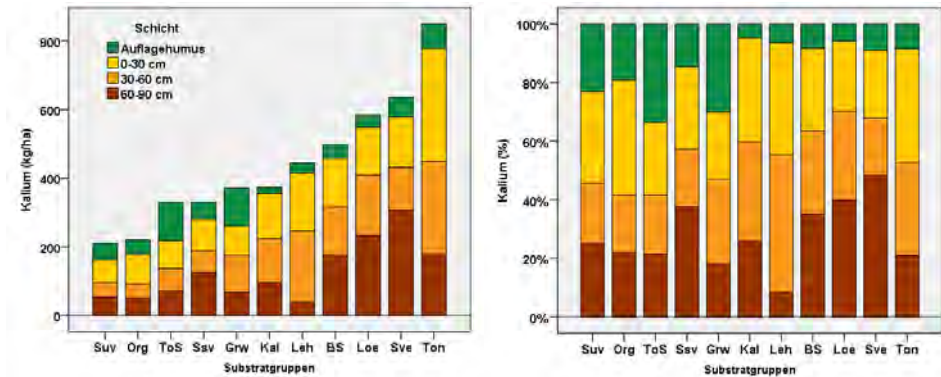


Abbildung 100: Austauschbare Kaliumvorräte im Auflagehumus und in den Tiefenstufen (0-30, 30-60, 60-90 cm) bei der BZE II in Niedersachsen nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Signifikante Veränderungen auf Profilebene ergaben sich für Kalium in den Substratgruppen Kalkstein (-70 %) und Lösslehm (-28 %), jeweils bezogen auf die BZE I). Die Kaliumvorräte beim Kalkstein verringerten sich von 740 auf 220 kg/ha vom mittleren in den geringen Bewertungsbereich. Diese Abnahme ist für den Auflagehumus und jede Tiefenstufe bis einschließlich 60 cm signifikant. Beim Lösslehm waren die Abnahmen von Kalium im Auflagehumus und in Bodentiefen ab 10 cm signifikant. Die Waldkalkung scheint dabei keine Rolle zu spielen, da die BZE-Punkte des Kalksteins nicht gekalkt wurden und sich die Verluste beim Lösslehm in der Tendenz auch im nicht gekalkten Kollektiv zeigten. Die deutlichen Zunahmen im Gesamtprofil zwischen 40 und 65 % bezogen auf die BZE I beim verlehmtten Sand und der Grauwacke waren nicht signifikant. Ebenso kam es vereinzelt in unterschiedlichen Tiefenstufen einiger Substratgruppen zu signifikanten Veränderungen, die aber keine besonderen Muster zeigten.

6.5.4 Vorräte austauschbarer Protonen, Eisen, Mangan und Aluminium

Die zeitliche Entwicklung der austauschbaren Ma-Kationen-Vorräte (s. Abb. 101 und Abb. 102) zeigt von der BZE I zur BZE II im Gesamtprofil eine deutliche und zumeist signifikante Zunahme der Protonen sowie von Eisen und Mangan. Die Aluminiumvorräte nehmen im Auflagehumus signifikant ab. Im Mineralboden kam es zu keinen signifikanten Änderungen.

Hinsichtlich der Belegung des Austauschers mit Ma-Kationen in Abhängigkeit von der Waldkalkung gibt es auf Vorratsebene keine eindeutigen Befunde.

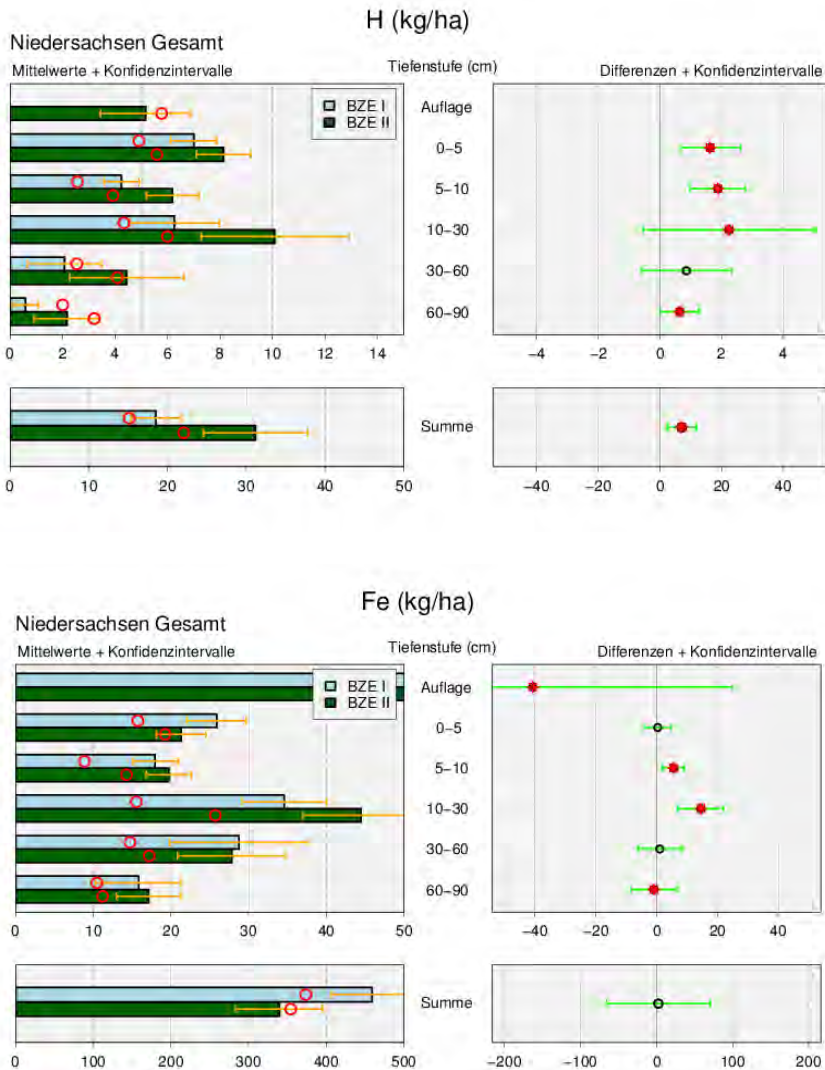


Abbildung 101: Vorräte [kg/ha] von Protonen (oben) und Eisen (unten) in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

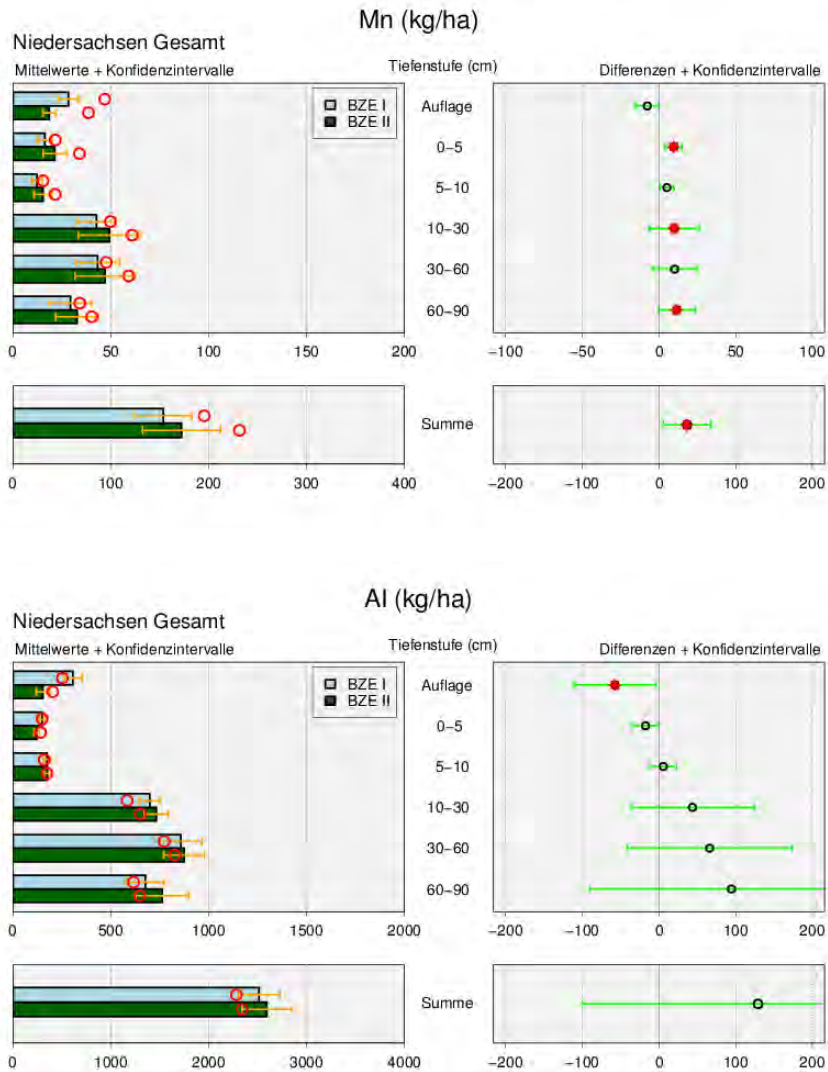


Abbildung 102: Vorräte [kg/ha] von Mangan (oben) und Aluminium (unten) in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

6.5.5 *pH-Werte und Pufferbereiche*

Der pH-Wert eines Bodens gilt als zentraler Indikator für seine chemischen Eigenschaften und kennzeichnet die Eignung des Bodens als Pflanzenstandort und Lebensraum für Bodenorganismen. Im Rahmen des chemischen Analyseprogramms der BZE wurden pH-Werte in wässriger Lösung ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$) und in salzhaltigen Suspensionen ($\text{pH}(\text{KCl})$ und (CaCl_2)) gemessen. Bei der BZE I wurde neben dem $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ nur der $\text{pH}(\text{KCl})$ bestimmt. Daher können im Zeitvergleich nur die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ und $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte dargestellt werden. Der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert gibt die aktuelle Protonenaktivität in der Lösungsphase des Auflagehumus beziehungsweise Mineralbodens an. Die pH-Werte (KCl) und (CaCl_2) erfassen dagegen auch die unterschiedlich stark am Austauscher und an der organischen Substanz gebundene, durch die Salzsuspension gelösten Protonen. Die pH-Werte in Salzlösung liegen daher umso tiefer, je mehr Kationensäuren in einem Medium gebunden sind und gelöst werden konnten (MEIWES et al. 1984).

Die pH-Werte kennzeichnen sogenannte Pufferbereiche (s. Tab. 16), die eine Gliederung des chemischen Bodenzustandes und Rückschlüsse auf die Stabilität der Waldökosysteme zulassen (ULRICH 1981, 1986): Natürliche Waldböden weisen in Abhängigkeit von Ausgangsgestein und Bodenentwicklung verschiedene Puffersysteme auf, die bei Säurebelastung den pH-Wert des Bodens entsprechend ihrer chemischen Kapazität zu puffern vermögen. Auf reicheren Standorten sind dies der Carbonat- und Silikat-Pufferbereich, auf mittleren Standorten der Austauscher- und auf ärmeren Standorten der Aluminium-, der Aluminium-/Eisen- sowie bei niedrigsten pH-Werten der Eisen-Pufferbereich. Pufferbereiche sind Indikatoren für resiliente Eigenschaften von Waldböden. Ein Puffersystem puffert bei Protonenzufuhr die Protonen ab und hält damit den pH-Wert der Bodenlösung in einem bestimmten Bereich relativ konstant. Überschreitet die Säurefracht oder die Produktion von Protonen die Pufferrate, sinken die pH-Werte, d. h. der Boden versauert. Das Boden-Bodenlösungssystem kann dann in den folgenden Pufferbereich übergehen. Solange genügend Pufferkapazität zur Verfügung steht, sind die Versauerungsvorgänge teilweise reversibel. Bei abnehmender Säurebelastung und Unterschreitung der Pufferrate erhöht sich der pH-Wert wieder. Wechselt die Säurebelastung im Zeitverlauf, können die Böden zwischen verschiedenen Pufferbereichen wechseln (ULRICH 1983). Die Silikatverwitterung und die damit verbundene Protonenkonsumption findet sowohl bei höheren als auch bei niedrigeren pH-Werten statt, im Silikat-Pufferbereich puffern jedoch nur die Silikate (ULRICH 1981).

In der Regel wird für die Einteilung von Böden in Pufferbereiche der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert herangezogen, beziehungsweise der pH-Wert in Gleichgewichtsbodenlösung. Diese Werte entsprechen im räumlichen Mittel den in der Bodenlösung aktuell vorhandenen pH-Werten (MEIWES et al. 1984).

Tabelle 16: Charakterisierung der Pufferbereiche (nach ULRICH 1981, verändert)

Kohlensäure/Calcium-Carbonat ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) > 6,2$)
<ul style="list-style-type: none"> - Vorherrschende Pufferreaktion: Kalkauflösung - Humusform: Mull, rasche Streuumsetzung - Bodenbildungsprozess: Entkalkung, stabiles Bodengefüge, evtl. ungünstiges Ca/K-Verhältnis, Auswaschung von Calcium - keine Behinderung des Wurzelwachstums oder der Zersetzeraktivität aufgrund bodenchemischer Bedingungen, gute Wachstumsbedingungen aus bodenchemischer Sicht
Kohlensäure-Silikat ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 6,2 und 5,0)
<ul style="list-style-type: none"> - Vorherrschende Pufferreaktion: Verwitterung der primären Silikate unter Freisetzung von Nährstoffkationen - Humusform: Mull und Mullartiger Moder - Bodenbildungsprozess: Verbraunung und Tonverlagerung - optimale Nährstoffverfügbarkeit und ökologisches Optimum aus bodenchemischer Sicht
Austauscher ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 5,0 und 4,2)
<ul style="list-style-type: none"> - Vorherrschende Pufferreaktion: weitere Verwitterung der Restgitter primärer Silikate und Freisetzung von Al-Ionen aus Tonmineralen, Entstehung polymerer Aluminium-Hydroxo-Kationen und Verdrängung von Calcium, Magnesium sowie Kalium vom Austauscher und Auswaschung mit der Bodenlösung - Humusform: Mullartiger Moder und Moder - Rückgang der Austauschkapazität und der biologischen Aktivität, Verbraunung des Bodens - Konkurrenzkraft anspruchsvoller Pflanzenarten geht zurück
Aluminium ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 4,2 und 3,8)
<ul style="list-style-type: none"> - Pufferung: Auflösung der Aluminium-Hydroxo Kationen und sekundärer Tonminerale, Tonzerstörung, Freisetzung von Aluminium-Ionen und Protonen in die Bodenlösung - Humusform: Moder und Rohhumus - Podsoligkeit, geringe Basensättigung - zunehmende Einschränkung der Wuchsleistung durch den bodenchemischen Zustand
Aluminium-Eisen (zwischen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 3,8 und 3,0)
<ul style="list-style-type: none"> - Pufferung: Auflösung von Eisenhydroxiden und Aluminium-Hydroxo Kationen, Mobilisierung von Eisen und Huminstoffen, höhere Anteile von Aluminium, Eisen und Protonen in der Bodenlösung, zunehmender Säurestress - Humusform: schlechte Moderhumusformen, Rohhumus - stärkere Podsoligkeit, Podsolierung - Wachstumsstörungen der Bäume
Eisen ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 3,0$)
<ul style="list-style-type: none"> - Pufferung: über Eisenhydroxidauflösung, hohe Kationensäurekonzentrationen in der Bodenlösung, sehr geringe Basensättigung am Austauscher - Humusform: Rohhumus, Hochmoortorf - starke Podsolierung - mögliche Wachstumsstörungen der Bäume

Bei der Bewertung des aktuellen Säurezustands des Bodens in Reaktion mit dem Bodenwasser erfolgt die Zuordnung nach Pufferbereichen in bestimmten Bodenschichten anhand des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wertes nach ULRICH (1983). Einschränkend ist allerdings, dass der pH -Wert zeitlich schwankt und damit die Interpretation eines einmaligen Messwertes unsicher ist (BLOCK et al. 2000). Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte sind z. B. abhängig von der Verwitterung und Zusammensetzung des Mineralbodens, von Prozessen der mikrobiellen Mineralisierung und Umsetzung organischer Substanz, der Wurzelatmung, vom Niederschlagregime und Säureeinträgen, von Durchlüftung und Temperatur des Bodens sowie der Jahreszeit. Sie schwanken kleinräumig, kurzfristig und saisonal. Da die pH -Werte in salzhaltiger Suspension auch im Boden gespeicherte Kationensäuren einbeziehen, bilden diese pH -Werte auch abgelaufene, historische Versauerungsschübe ab und geben Hinweise auf Säurebelastungen, denen der untersuchte Boden einmal ausgesetzt war. Damit werden bei den pH -Werten in Salzlösung zeitliche und örtliche Schwankungen abgemildert. Die Messung in salzhaltiger Suspension wird daher als Maß für die Amplitude des chemischen Bodenzustandes im Hinblick auf die Protonenbelastung interpretiert (ULRICH 1983). Im Folgenden werden die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - und $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte dargestellt. Der pH -Wert in CaCl_2 liegt nur für die BZE II vor. Er ist in seiner Bedeutung mit dem $\text{pH}(\text{KCl})$ vergleichbar, liegt aber etwas höher.

6.5.5.1 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$

In Abbildung 103 sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte des Auflagehumus und des Mineralbodens nach Tiefenstufen angegeben.

Die durchschnittlichen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der BZE I und BZE II im Mineralboden liegen über alle Tiefenstufen hinweg zwischen 4,2 und 5,1 und befinden sich damit in Niedersachsen im Mittel überwiegend im Austauscher-Pufferbereich (vgl. Tab. 16). Die pH -Wert Spanne reicht von 2,8 bis 8,3. Es kommen damit alle Pufferbereiche vor.

Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der Auflage sind von durchschnittlich 4,2 bei der BZE I auf 4,4 bei der BZE II um 0,2 pH gestiegen. Dies ist für Niedersachsen insgesamt signifikant. Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in der Tiefenstufe 0-5 und 5-10 cm liegen mit Werten zwischen 4,2 (BZE I) und 4,3 (BZE II) im gleichen Bereich. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Werte kontinuierlich bis über 5,0 in der Tiefenstufe 60-90 cm an. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 5-10 cm sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte bei der BZE II signifikant höher als bei der BZE I. Die wässrige Bodenlösung ist damit gegenüber der BZE I leicht weniger sauer.

Im Hinblick auf den Einfluss der Waldkalkung zeigt sich, dass nur im gekalkten Kollektiv die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte von der BZE I zur BZE II (mit Ausnahme der Tiefenstufe 5-10 cm) signifikant zunehmen. Damit lässt sich auf eine Abschwächung einer weiteren Versauerung im Auflagehumus und eine Verminderung der Bodenazidität im Mineralboden in wässriger Lösung durch die Waldkalkung schließen.

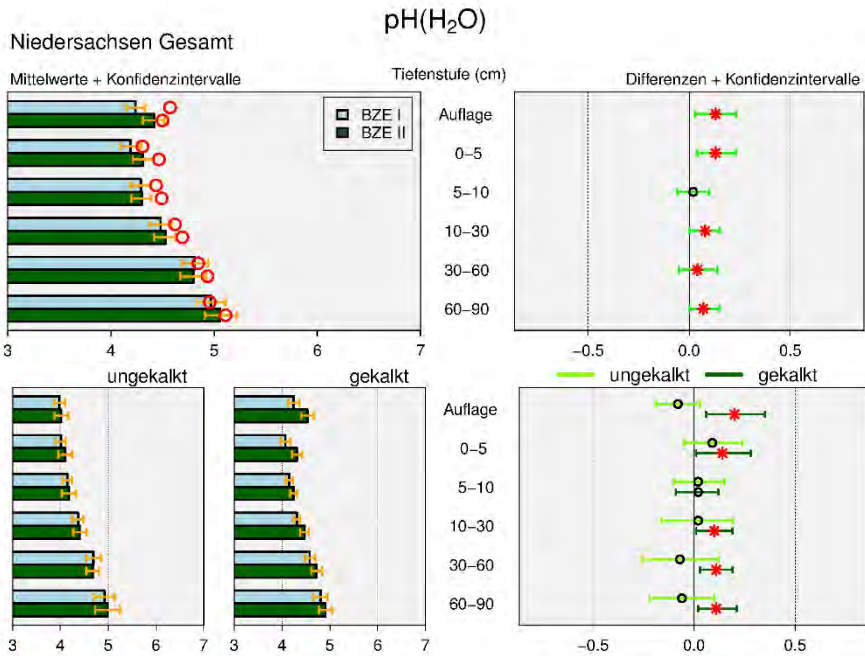


Abbildung 103: pH(H₂O)-Werte in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 210) und II (n = 170) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 111) (rechte Spalte) nach Auflagehumus und Tiefenstufen bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 2 Grafiken) und nach ungekalkt (BZE I n = 62, BZE II n = 47, Schnittmenge n = 27) und gekalkt (BZE I n = 114, BZE II n = 94, Schnittmenge n = 69) in den unteren 3 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Die pH(H₂O)-Werte der BZE II sind in Abbildung 104 nach Substratgruppen, Auflagehumus und Tiefenstufe dargestellt. Die pH-Werte sind nach Bodenschicht und Substrat sehr verschieden, auch innerhalb eines Bodenprofils. Dennoch zeigen sich typische Muster:

Die geringsten pH(H₂O)-Werte finden sich erwartungsgemäß in den Substratgruppen der basenarmen Substrate, wie den organisch geprägten Standorten und den schwach sowie unverlehmtten Sanden. Bei den organisch geprägten Standorten liegen die Mediane der pH(H₂O)-Werte im Auflagehumus und bis 30 cm Bodentiefe im Aluminium-Eisen-Pufferbereich, steigen dann bis 60 cm in den Aluminium-Pufferbereich und befinden sich in der Tiefenstufe 60-90 cm im Austauscher-Pufferbereich. Bei den unverlehmtten und schwach verlehmtten Sanden decken der Auflagehumus und Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe den Aluminium-Pufferbereich ab. Die tieferen Bodenschichten liegen mit höheren pH(H₂O)-Werten als bei den organisch geprägten Standorten ebenfalls im Austauscher-Pufferbereich. Die BZE-

Punkte der Substratgruppen Buntsandstein, Tonschiefer, verlehmtter Sand, Lösslehm und Grauwacke liegen in den verschiedenen Tiefenstufen mit ihren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten überwiegend im Austauscher-Pufferbereich, vereinzelt auch im Kohlensäure-Silikat- (Buntsandstein und Lösslehm jeweils im Auflagehumus) und im Aluminium-Pufferbereich (Buntsandstein 0-10 cm sowie Grauwacke 0-5 cm Bodentiefe). Bei den BZE-Punkten in den Substratgruppen Ton(stein) und Lehm verteilen sich die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Oberboden im unteren Austauscher-Pufferbereich, steigen dann aber in tieferen Bodenschichten bis in den Carbonat-Pufferbereich an, was hier noch nicht entkalkte Bodenschichten anzeigt. Beim Kalkstein liegt erwartungsgemäß der Mineralboden ab 10 cm Bodentiefe überwiegend im Carbonat-Pufferbereich, solange dort freies Carbonat verfügbar ist. In den bereits entkalkten, oberen Bodenschichten stellt sich der Kohlensäure-Silikat-, teilweise aber auch schon der Austauscher-Pufferbereich ein.

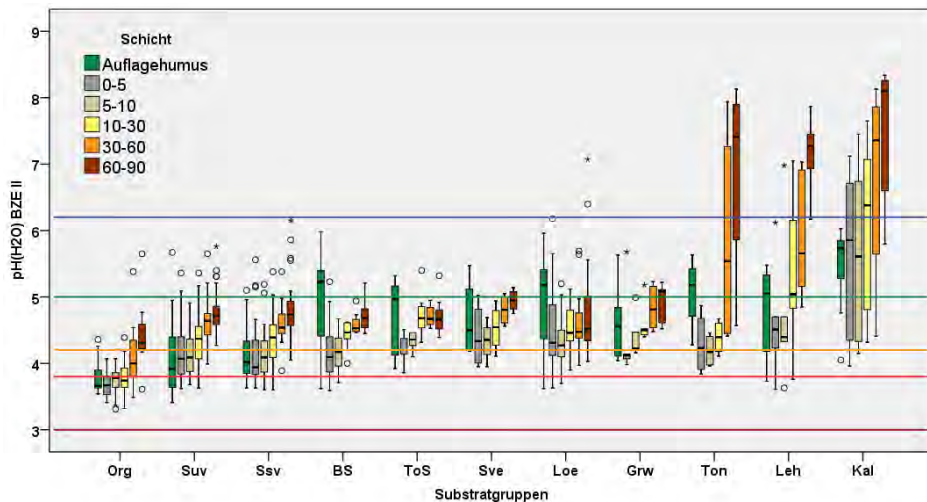


Abbildung 104: $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Niedersachsen nach Substratgruppen und Pufferbereichen (farbige Linien); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer); Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

Grundsätzlich steigen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte mit zunehmender Bodentiefe in den Tiefenstufen 10-30, 30-60 und 60-90 cm kontinuierlich an, ein deutlicher Hinweis auf zunehmende Säureneutralisierungskapazität in tieferen Bodenschichten. Dennoch ist auffällig, dass sich die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte über weite Spannen der forstlichen Standorte und Bodentiefen überwiegend in einem relativ engen Wertebereich zwischen 4,2 und 5,0 im Austauscher-Pufferbereich befinden. Neben natürlicher

Bodenversauerung unter humiden Klimabedingungen ist dies Ausdruck langanhaltender Säureeinträge, einer Erschöpfung der Puffersysteme und Nivellierung des bodenchemischen Zustandes.

Im Vergleich zur BZE I sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte bei der BZE II in den meisten Tiefenstufen der Substratgruppen leicht angestiegen (s. Abb. 105). Am deutlichsten und zumeist auch signifikant ist dies in der Substratgruppe unverlehmter Sand in den Tiefenstufen 5-10, 30-60 und 60-90 cm. Ansonsten sind die Anstiege nur vereinzelt abgesichert, so beim Auflagehumus im Buntsandstein, beim Kalkstein in 0-5 cm und beim Lösslehm in 10-30 cm Bodentiefe. Signifikant geringere $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte kamen nicht vor.

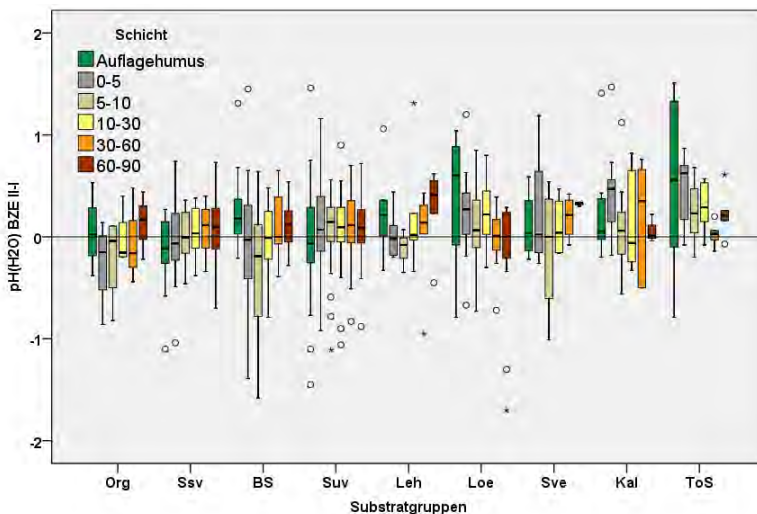


Abbildung 105: Differenzen (BZE II - BZE I) der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Niedersachsen nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten, die sowohl in der BZE I als auch in der BZE II beprobt wurden (BS: Buntsandstein, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer)

Wie in Abbildung 103 für Niedersachsen insgesamt dargestellt, beruhen die signifikanten Anstiege der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte auf der Waldkalkung. Würden nur die gekalkten Kollektive betrachtet, wären die Anstiege in den einzelnen Tiefenstufen etwas höher als in Abbildung 105 veranschaulicht. Die Anstiege im gekalkten Kollektiv sind nur im unverlehmten Sand (Auflagehumus, 0-5 und 10-30 cm) und im Auflagehumus des Buntsandsteins signifikant.

Der Einfluss von kleinräumig, saisonal und standörtlich unterschiedlich wirkenden Faktoren auf die Höhe des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wertes und die damit verbundenen Schwankungen erschweren den Nachweis von signifikanten Veränderungen.

Zusätzlich ist in einigen Substratgruppen die Anzahl der BZE-Punkte relativ gering. Dies zeigen die weiten Spannen der Verteilungen sowohl bei den $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten nach Substratgruppen als auch bei den Veränderungen zur BZE I.

Abbildung 106 zeigt die prozentuale Aufteilung der einzelnen Tiefenstufen im Mineralboden nach Pufferbereichen (nach ULRICH 1981) für die BZE I und BZE II sowie für die Kollektive gekalkt und ungekalkt:

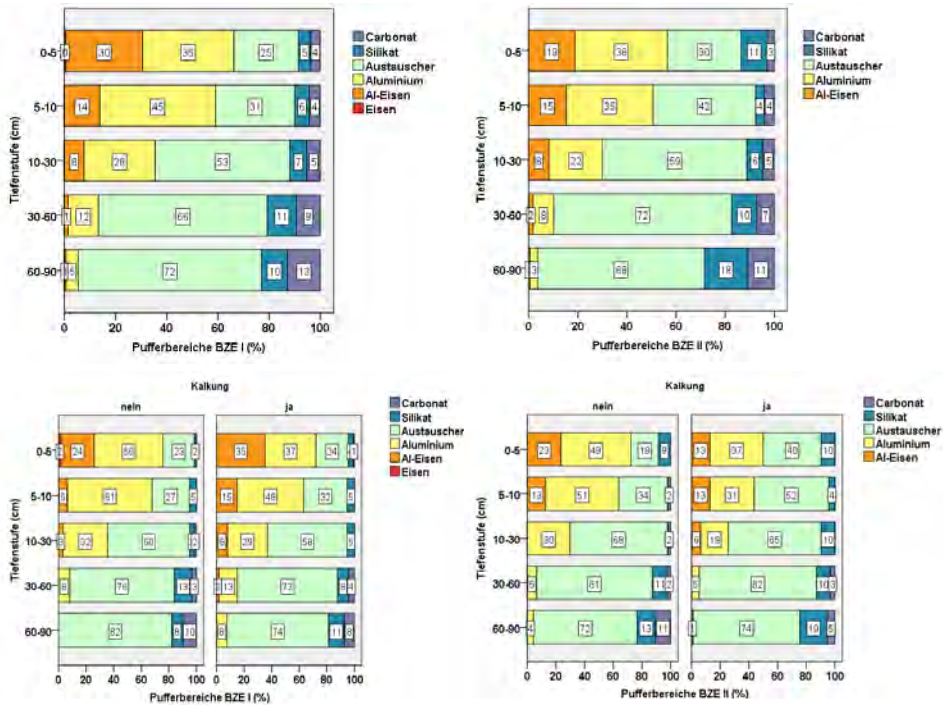


Abbildung 106: Mittlere Häufigkeiten der Pufferbereiche $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ in Prozent (nach ULRICH 1981) in niedersächsischen Waldböden für die BZE I (linke Spalte) und BZE II (rechte Spalte) nach Tiefenstufen [cm] und nach gekalkt/ungekalkt (untere 2 Grafiken)

Zum Zeitpunkt der BZE I befanden sich knapp 66 % der oberen 5 cm des Mineralbodens aller BZE-Punkte in Niedersachsen im Aluminium-Pufferbereich oder Aluminium-Eisen-Pufferbereich ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$). In der Bodentiefe 5-10 cm waren es knapp 60 % und in 10-30 cm noch 36 %. Bei der BZE II sind die Anteile dieser Pufferbereiche zurückgegangen. In den oberen 5 cm des Mineralbodens waren noch knapp 57 %, in der Tiefenstufe 5-10 cm noch 50 % und in 10-30 cm 30 % aller Waldböden diesen Pufferbereichen zuzuordnen. Die Anteile im Aluminium-Eisen-Pufferbereich gingen zwischen beiden Erhebungen in der Tiefenstufe 0-5 cm von 30 auf 19 % zurück. Entsprechend nahmen die Anteile im Silikat- und Austauscher-Pufferbereich bei der BZE II in diesen Tiefenstufen im Vergleich zur BZE I deutlich zu,

von 30 auf 41 % in 0-5 cm und von 37 auf 46 % in der Tiefenstufe 5-10 cm. In den anschließenden Tiefenstufen 10-30, 30-60 und 30-60 cm gab es von der BZE I zur BZE II nur relativ leichte Verschiebungen hin zu den günstigeren Pufferbereichen.

Im Hinblick auf die Verteilung der Pufferbereiche nach dem $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert zeichnet sich demnach für Niedersachsen eine Verbesserung des bodenchemischen Zustandes ab. Die Anteile der ökologisch ungünstig zu beurteilenden Aluminium-Eisen- und Aluminium-Pufferbereiche haben im oberen Mineralboden zugunsten der besseren Austauscher- und Silikat-Pufferbereiche abgenommen. Die Anteile im Carbonat-Pufferbereich haben sich kaum verändert.

Die Verteilung der Pufferbereiche in den Tiefenstufen wird durch die Waldkalkung wesentlich beeinflusst. Im gekalkten Kollektiv zeigt sich bei der BZE II eine deutlich günstigere Verteilung der Pufferbereiche. Bei der BZE II haben im gekalkten Kollektiv die Anteile des Austauscher-Pufferbereiches über $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 4,2 und besser auf Kosten des Aluminium-Pufferbereichs und schlechter in allen Tiefenstufen deutlich zugenommen (s. Abb. 106 und beispielhaft für die Tiefenstufe 0-5 cm Abb. 107). Auffällig sind die deutlich geringeren Anteile im Aluminium- und Aluminium-Eisen-Pufferbereich bis 10 cm Bodentiefe bei der BZE II im Vergleich zur BZE I im gekalkten Kollektiv. Im ungekalkten Kollektiv dagegen kam es kaum zu Veränderungen. Im Kollektiv „entfällt“ (hier ist keine Kalkung vorgesehen) verschlechterten sich die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte.

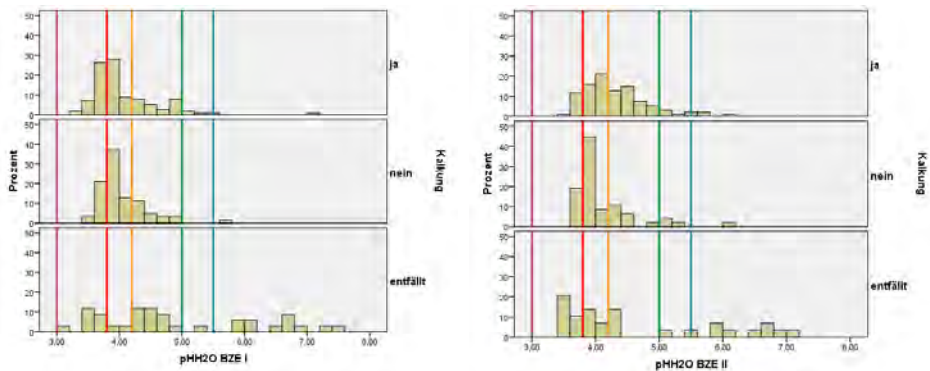


Abbildung 107: Prozentuale Verteilung der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der BZE I (links) und BZE II (rechts) in Niedersachsen in der Tiefenstufe 0-5 cm nach gekalkt, ungekalkt und entfällt (alle Punkte, die sich nicht in der Waldkalkungskulisse befinden); mit senkrechten Linien sind die Pufferbereiche (s. Tab. 15, S. 164) gekennzeichnet

6.5.5.2 $pH(KCl)$

Die $pH(KCl)$ -Werte sind grundsätzlich deutlich geringer als die $pH(H_2O)$ -Werte, da durch den Salzzusatz zusätzlich zu den Protonen in der Bodenlösung Protonen vom Austauscher gelöst werden. Im Mittel von Niedersachsen liegen die $pH(KCl)$ -Werte des Auflagehumus und der Mineralboden-Tiefenstufen zwischen 0,6 und 0,9 pH -Einheiten unter den entsprechenden $pH(H_2O)$ -Werten (s. Abb. 108).

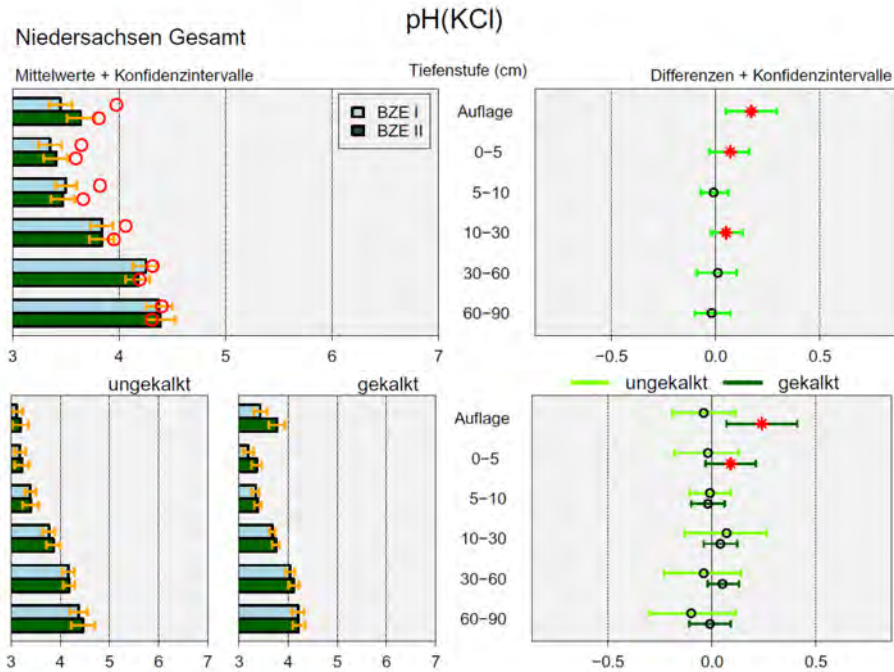


Abbildung 108: $pH(KCl)$ -Werte in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 210$) und II ($n = 170$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 111$) (rechte Spalte) nach Auflagehumus und Tiefenstufen bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 2 Grafiken) und nach ungekalkt (BZE I $n = 62$, BZE II $n = 47$, Schnittmenge $n = 27$) und gekalkt (BZE I $n = 114$, BZE II $n = 94$, Schnittmenge $n = 69$) in den unteren 3 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Die $pH(KCl)$ -Werte in der Auflage sind von durchschnittlich 3,45 bei der BZE I auf 3,64 bei der BZE II signifikant gestiegen. Die $pH(KCl)$ -Werte in der Tiefenstufe 0-5 cm haben sich von durchschnittlich 3,35 (BZE I) auf 3,41 (BZE II) nur unwesentlich erhöht, wobei der Unterschied signifikant ist. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die $pH(KCl)$ -Werte kontinuierlich an. In der Tiefenstufe 60-90 cm betragen sie bei der BZE II durchschnittlich 4,39. Eine leichte signifikante Zunahme trat nur noch in der Tiefenstufe 10-30 cm auf.

Im Hinblick auf die Auswertung der Waldkalkung kam es nur im Auflagehumus und der Tiefenstufe 0-5 cm im gekalkten Kollektiv zu signifikanten Erhöhungen des pH(KCl)-Wertes. Im Auflagehumus stieg der pH(KCl) von 3,43 in der BZE I auf 3,77 in der BZE II, in der Tiefenstufe 0-5 cm von 3,18 auf 3,36. Diese Zunahme der pH(KCl)-Werte kann als positiver Kalkungseinfluss auf die pH(KCl)-Werte interpretiert werden. In allen anderen Tiefenstufen und im Auflagehumus kam es weder im ungekalkten noch gekalkten Kollektiv zu signifikanten Veränderungen.

Die pH(KCl)-Werte nach Substratgruppen sind in Abbildung 109 für den Auflagehumus und die Tiefenstufen dargestellt. Auffällig sind die sehr ähnlichen Werte über eine weite standörtliche Amplitude: Von den organisch geprägten Standorten bis zum Lösslehm liegen die pH(KCl)-Werte im Mineralboden überwiegend unter 4,2. Höhere pH(KCl)-Werte finden sich in den Substratgruppen Ton(stein), Lehm und Kalkstein, teilweise auch hier erst ab 30 cm Bodentiefe. Vereinzelt liegen auch tiefere Schichten anderer Substratgruppen zwischen 4,2 und 5, wie bei den schwach- und unverlehmten Sanden. Die pH(KCl)-Werte im Auflagehumus sind im Median beim Buntsandstein, der Grauwacke, Tonschiefer, Lösslehm und Ton(stein) deutlich höher als im Mineralboden.

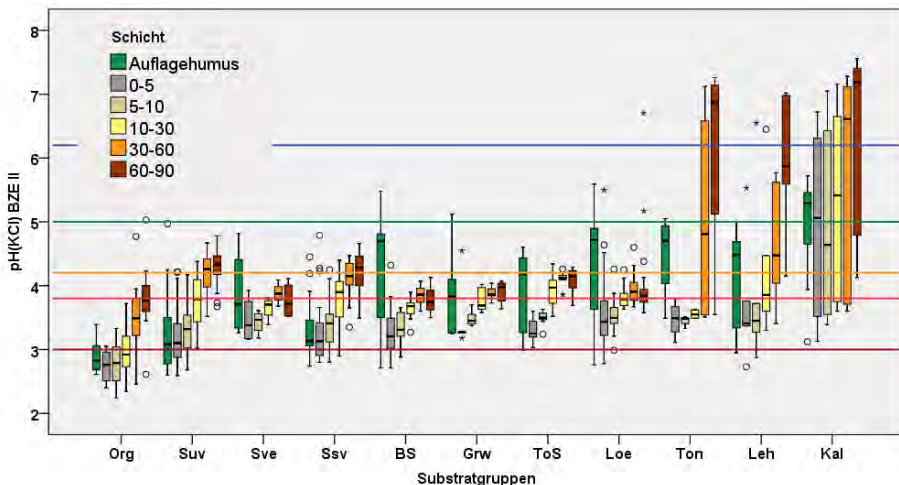


Abbildung 109: pH(KCl)-Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Niedersachsen nach Substratgruppen und Pufferbereichen (farbige Linien); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

Bei den pH(KCl)-Werten der BZE II zeigt sich wie beim pH(H₂O)-Wert eine Nivellierung des bodenchemischen Zustandes sowohl bezüglich der unterschiedlichen Standorte als auch der unterschiedlichen Tiefenstufen. Nur wenige, i. d. R. gut

versorgte Standorte mit hoher Austauschkapazität und Basensättigung, weisen pH(KCl)-Werte über 4,2 im oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe auf.

Die pH(KCl)-Werte der BZE II änderten sich im Vergleich zur BZE I in den Substratgruppen und Tiefenstufen relativ wenig (s. Abb. 110). Signifikant höhere Werte gab es in der Substratgruppe Kalkstein im Auflagehumus und im Mineralboden von 0-5 cm Bodentiefe, im Lösslehm im Auflagehumus und im unverlehmten Sand ab 5 cm bis 90 cm Bodentiefe. Diese Zunahmen beim unverlehmten Sand lassen sich auf die Waldkalkung zurückführen. Signifikante Abnahmen kamen nicht vor.

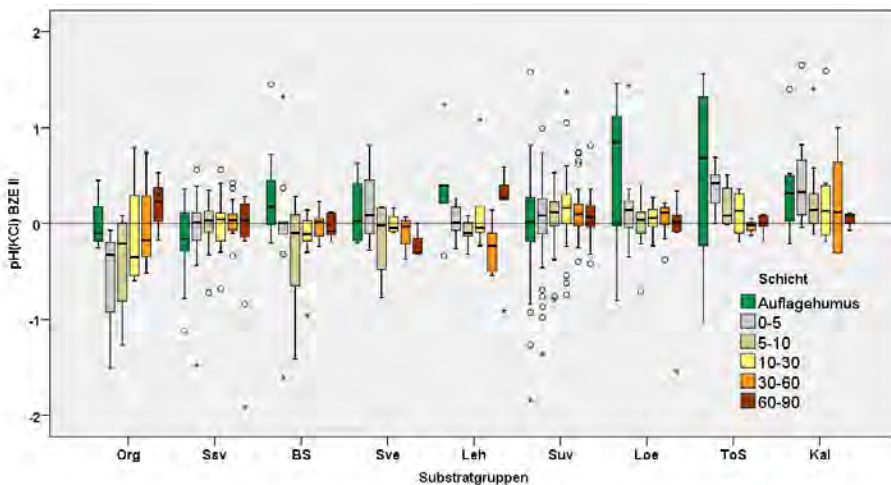


Abbildung 110: Differenzen (BZE II - BZE I) der pH(KCl)-Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Niedersachsen nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten, die sowohl in der BZE I als BZE II beprobt wurden (BS: Buntsandstein, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer)

6.5.6 Kohlenstoff

Kohlenstoff (C) ist im Waldboden sowohl im Auflagehumus als auch im Mineralboden enthalten. Hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung ist nur der in der abgestorbenen organischen Substanz gebundene Kohlenstoff von Interesse. Diese besteht aus abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffen sowie deren Umwandlungsprodukten. Lebende Organismen, also die Bodenflora und -fauna oder auch lebende Wurzeln von Waldbäumen, zählen nicht zur organischen Substanz des Bodens. Kohlenstoff kann auch in carbonatischer Form fest in Gesteinen gebunden sein, wie z. B. in Kalk-, Ton- oder Mergelgesteinen. Im Folgenden wird nur der organisch gebundene Kohlenstoff betrachtet.

Die Kohlenstoffvorräte hängen von der Gründigkeit und Dichte des Bodens, dem Steingehalt und vor allem dem Kohlenstoffgehalt ab. In den oberen Bereichen des Mineralbodens sind die Gehalte von Kohlenstoff i. d. R. hoch, der Boden ist dort aber auch relativ locker. In den unteren Bodenschichten ist es umgekehrt. Im Schnitt enthält das obere Drittel des Mineralbodens gut die Hälfte des Kohlenstoffvorrates des gesamten BZE-Profiles bis 90 cm Bodentiefe. Die höchsten Kohlenstoffvorräte enthalten Moorböden. Die im Auflagehumus gespeicherten Kohlenstoffvorräte sind ebenfalls sehr variabel und hängen stark von der jeweiligen Baumartenzusammensetzung und den Zersetzungsbedingungen ab. Der Auflagehumus in den Wäldern Niedersachsens nimmt durchschnittlich einen Anteil zwischen 10 und 20 % an den Gesamtkohlenstoffvorräten (Mineralboden bis 90 cm und Auflagehumus) ein.

Die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und in den Waldböden Niedersachsens zum Zeitpunkt der BZE II liegen mit durchschnittlich gut 180 t/ha im mittleren Bewertungsbereich. Dabei hat der Auflagehumus mit 26 t/ha einen Anteil von 14 %. In diesem Durchschnitt sind auch die organisch geprägten Standorte ($n = 13$) einbezogen, wie bewaldete Niedermoore, ehemalige Hochmoore oder anmoorige Standorte, die sehr hohe Kohlenstoffvorräte zwischen 230 und 640 t/ha bis 90 cm Bodentiefe speichern. Mit rund 8 % haben die organisch geprägten Standorte im BZE-Kollektiv in Niedersachsen einen im Vergleich zu den Bundesländern Hessen und Sachsen-Anhalt relativ hohen Anteil. In Hessen kommen diese Standorte nicht in der BZE vor, in Sachsen-Anhalt gibt es zwei im BZE-Kollektiv. Ohne diese Standorte speichern die Waldstandorte Niedersachsens im Mittel 156 t/ha Kohlenstoff, davon 25 t/ha im Auflagehumus (16 %) und liegen damit ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich.

Im BZE-Kollektiv sind die organisch geprägten Standorte hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung Sonderstandorte. Grundsätzlich „sacken“ weitgehend trocken-gefallene und/oder entwässerte, bewaldete Moore mit der Zeit in sich zusammen. Der Moor-Humuskörper wird mineralisiert, die Dichten nehmen zu, der Kohlenstoffvorrat verringert sich. Um hier korrekte Bilanzen erstellen zu können, muss der Kohlenstoffvorrat jeweils bis zum Mineralboden bestimmt werden. Werden dagegen feste Tiefenstufen im Zeitvergleich wie bei der BZE von oben beginnend verglichen, ergeben sich aufgrund der zunehmenden Dichten hohe Kohlenstoffzunahmen in den Tiefenstufen, obwohl insgesamt der Kohlenstoffvorrat (bis zur Mineralbodensohle) abgebaut wird. Bei den vier sowohl in der BZE I als auch BZE II beprobten organisch geprägten Standorten liegen die mittleren Kohlenstoffvorräte in der BZE II in den einzelnen Tiefenstufen deutlich über den Werten der BZE I, teilweise mit über dreifach erhöhten Vorräten (s. Abb. 111, links). Ebenso deutlich höhere Vorräte ergeben sich im Vergleich aller organisch geprägten Standorte der BZE I und BZE II (s. Abb. 111, rechts). Rein rechnerisch ergeben sich bei der BZE II im Vergleich zur BZE I rund doppelt so hohe Kohlenstoffvorräte in den organisch geprägten Standorten, was jedoch nicht als Kohlenstoffspeicherungsrate zwischen der BZE I und II angesehen werden darf.

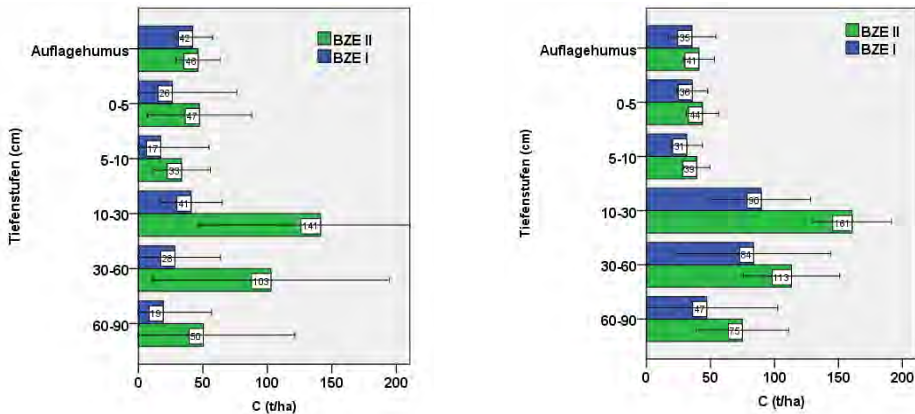


Abbildung 111: Kohlenstoffvorräte [t/ha] in der BZE II (grün) und BZE I (blau) im Auflagehumus und Mineralboden organisch geprägter Standorte in Niedersachsen nach Tiefenstufen [cm], links alle BZE-Punkte, die sowohl in der BZE I als auch BZE II enthalten sind (n = 4), rechts jeweils alle BZE-Punkte der jeweiligen Inventur (BZE I n = 11, BZE II n = 13)

Nicht alle organisch geprägten Standorte sind ehemalige Moore, sondern es kommen auch z. B. Sanddeckkulturen über Niedermooren, Treposole und Anmoor-Gleye hinzu. Diese Standorte zeichnen sich alle durch eine hohe kleinstandörtliche Variabilität hinsichtlich Kohlenstoff aus. Diese hohe Variabilität der einzelnen Standorte, verschieden intensive Entwässerungsprozesse, Bewirtschaftungen und Einschwemmungen bei Niedermooren erschweren die Bilanzen nach der BZE-Methode zusätzlich. Aus diesen Gründen sind bei den Auswertungen zu Veränderungen der Kohlenstoffvorräte zwischen der BZE I und II die organischen Standorte nicht mit einbezogen worden.

In Abbildung 112 sind die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte für alle Waldböden in Niedersachsen ohne organische Standorte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Gesamtprofil bis 90 cm Bodentiefe dargestellt.

Die Kohlenstoffvorräte in diesem Kollektiv reichen von 70 t/ha in einer Terra fusca-Parabraunerde bei Kalefeld bis 440 t/ha in einem Gley-Plaggenesch bei Quakenbrück mit einem 45 cm mächtigen, stark humosen Mineralbodenhorizont aus aufgetragenem Plaggen- und Kompostmaterial und betragen im Durchschnitt für Niedersachsens Waldböden 156 t/ha.

Bei der BZE II sind in den oberen 30 cm des Mineralbodens mit knapp 90 t/ha Kohlenstoffvorrat knapp 60 % des gesamten Kohlenstoffs bis 90 cm Bodentiefe (84 %) einschließlich Auflagehumus (16 %) gespeichert. In der Tiefenstufe 30-60 cm sind es mit 29 t/ha 18 % und in der Tiefenstufe 60-90 cm mit 14 t/ha 9 %. Dies liegt an den stark abfallenden Kohlenstoff- und den zunehmenden Skeletthalten mit zunehmender Bodentiefe. Bei der BZE I lagen die Anteile des Auflagehumus noch bei 22 %. In den oberen 30 cm des Mineralbodens waren gut 50 % und

in 30-60 cm 15 % des Kohlenstoffs gespeichert. An dieser Verteilung zeigt sich, dass sich von der BZE I zur BZE II die Kohlenstoffvorräte bei einer deutlichen Zunahme insgesamt vom Auflagehumus in den oberen Mineralboden verlagert haben.

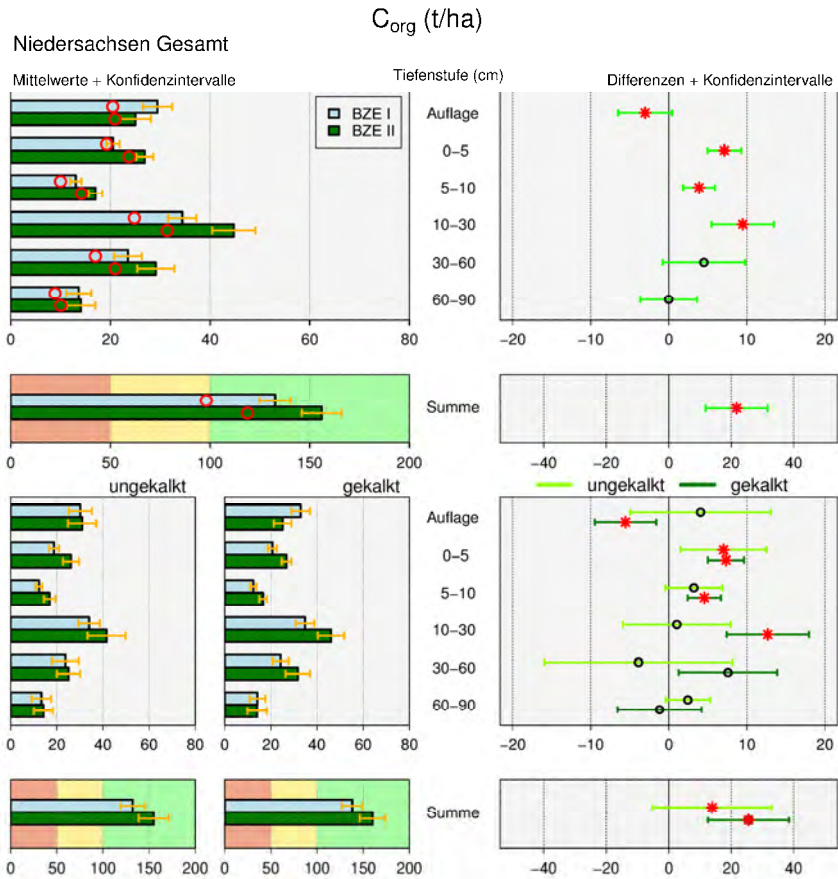


Abbildung 112: Kohlenstoffvorräte [t/ha] in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 198) und II (n = 157) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 107) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken,) und nach ungekalkt (BZE I n = 62, BZE II n = 47, Schnittmenge n = 27) und gekalkt (BZE I n = 114, BZE II n = 94, Schnittmenge n = 69) in den unteren 6 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167, ohne organisch geprägte Standorte

Im Vergleich zur BZE I erhöhten sich die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in den Waldböden Niedersachsens im Auflagehumus und im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe um 21,7 t/ha (+16 %), was einer jährlichen Speicherrate von rund

1.400 kg/ha entspricht. Diese Zunahme ist auf Profilebene signifikant (s. Abb. 112, Teilgrafik d). Dabei hat im Gegensatz zur Profilsomme der Kohlenstoffvorrat für Niedersachsen im Auflagehumus sogar um 3 t/ha (-10 %) signifikant abgenommen. Dies wird aber deutlich kompensiert durch die signifikanten Zunahmen in der Tiefenstufe 0-5 cm mit 7,1 t/ha (+35 %), 3,9 t/ha in 5-10 cm (+30 %) und 9,5 t/ha (+28 %) in 10-30 cm Bodentiefe im Mineralboden (s. Abb. 112, Teilgrafik b). In der Tiefenstufe 30-60 cm gab es ebenfalls eine Zunahme (+4,5 t/ha, +19 %), die aber nicht signifikant ist. Der Kohlenstoffvorrat in 60-90 cm Bodentiefe änderte sich nicht.

Die Kohlenstoffvorräte verringerten sich signifikant in der Auflage im gekalkten Kollektiv in Niedersachsen um 5,5 t/ha von der BZE I zur BZE II (-17 %). Die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus des ungekalkten Kollektivs dagegen blieben konstant. Während sich im oberen Mineralboden bis 30 cm die Kohlenstoffvorräte im ungekalkten Kollektiv in 0-5 cm signifikant erhöhten, in 5-10 cm leicht erhöhten und in 10-30 cm nahezu gleichblieben, sind für das gekalkte Kollektiv für alle drei Tiefenstufen signifikante Kohlenstoffanreicherungen festzustellen. Unterhalb von 30 cm gab es keine signifikanten Unterschiede bei dem gekalkten und ungekalkten Kollektiv gegenüber der BZE I (s. Abb. 112, Teilgrafik g). Bezogen auf das Gesamtprofil kam es damit im ungekalkten Kollektiv zu einer signifikanten Zunahme zwischen den Erhebungen von knapp 14 t/ha (+10 %) und im gekalkten Kollektiv von 25,5 t/ha (+19 %) Kohlenstoff (s. Abb. 112, Teilgrafik j).

Damit zeigt sich, dass eine Waldkalkung die Kohlenstoffspeicherung in Waldböden erhöht. Zwar wird offenbar durch die Waldkalkung der Humusabbau deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch diese Kohlenstoffverluste über Anreicherungen im oberen Mineralboden mehr als kompensiert. Auch im ungekalkten Kollektiv kommt es allerdings zu einer Kohlenstoffzunahme im Profil, die aber geringer ausfällt.

6.5.6.1 Kohlenstoffvorräte nach Substratgruppen

Wird die Verteilung der Kohlenstoffvorräte getrennt nach Substratgruppen betrachtet, ergibt sich folgendes Bild (s. Abb. 113):

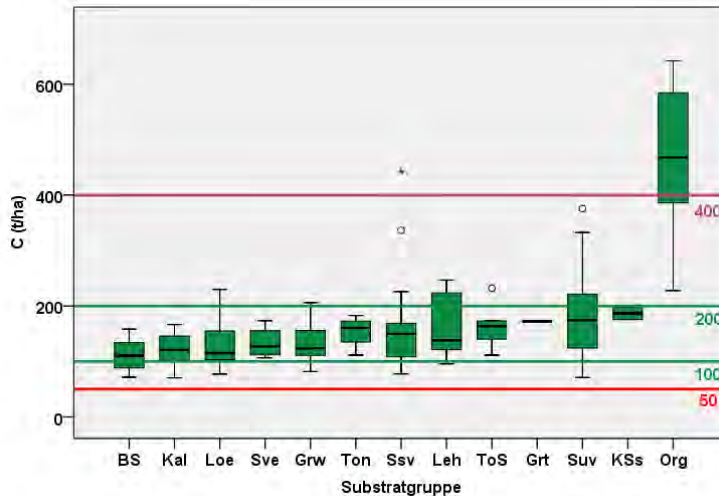


Abbildung 113: Verteilung der Kohlenstoffvorräte [t/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in niedersächsischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BS: Buntsandstein, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

Die Verteilung der Kohlenstoffvorräte liegt bei fast allen Substratgruppen im mittleren Bewertungsbereich zwischen 100 und 200 t C/ha. Die höchsten mittleren Kohlenstoffvorräte um 460 t C/ha weisen die organisch geprägten Standorte auf. Sie liegen mit ihren Kohlenstoffvorräten im sehr hohen Bewertungsbereich und heben sich damit deutlich von den anderen Substratgruppen ab. Die geringsten mittleren Kohlenstoffvorräte finden sich nach einer Clusteranalyse beim Buntsandstein, Kalkstein und Lösslehm sowie verlehmtten Sand und Grauwacke mit Werten um gut 120 t/ha. Die Substratgruppen Ton(stein), Tonschiefer, Granit, Kreidesandstein, Lehm und der schwach- sowie unverlehmtte Sand liegen mit Werten um 170 t/ha deutlich höher. Von einzelnen Profilen abgesehen ist die Streuung der Kohlenstoffvorräte auf Profilebene bei Weitem geringer als bei den Hauptnährstoffen Calcium, Magnesium und Kalium. Da die Kohlenstoffvorräte neben der Gründigkeit des Profils von der Kohlenstoffkonzentration, der Trockenrohichte des Feinbodens und dem Skelettgehalt in den jeweiligen Schichten abhängen, sind die Unterschiede in den Substratgruppen von der Ausprägung dieser Größen bestimmt. So haben Kalksteinstandorte zwar häufig hohe Kohlenstoffkonzentrationen im Mineral-

boden, jedoch relativ hohe Skelettgehalte und damit verhältnismäßig geringe Kohlenstoffvorräte. Bei den unverlehmten Sanden sind die Kohlenstoffkonzentrationen im Vergleich zum Kalkstein deutlich geringer, aber die Skelettgehalte ebenfalls und die Trockenrohdichten höher als bei den Kalken und damit die Kohlenstoffvorräte trotz geringer Kohlenstoffkonzentration insgesamt höher.

Im Auflagehumus weisen die BZE-Punkte in der Substratgruppe Kalkstein mit rund 8 t/ha Kohlenstoff die geringsten Vorräte auf, gefolgt von den BZE-Punkten im Lehm, Buntsandstein, Ton(stein) und Lösslehm sowie unverlehmten Sand mit Kohlenstoffvorräten im Auflagehumus zwischen 13 und 18 t/ha (s. Abb. 114). Mit Vorräten zwischen 25 und 34 t/ha folgen die Substratgruppen Grauwacke, Tonschiefer, schwach- und unverlehmter Sand. Mit 41 t/ha Kohlenstoffvorrat im Auflagehumus weisen die organischen Standorte die höchsten Werte in Niedersachsen auf. Die jeweiligen Streuungen innerhalb der Substratgruppen sind beträchtlich, dennoch folgen die Kohlenstoffvorräte einem Muster: je reicher die Standorte, desto besser die Humusform und desto geringer die Kohlenstoffvorräte. Die relative Verteilung der Kohlenstoffvorräte in den einzelnen Tiefenstufen ist in den verschiedenen Substratgruppen recht ähnlich: im unteren Mineralboden (30-90 cm) sind nur noch zwischen 20 und 30 % des gesamten Kohlenstoffs im Profil gespeichert, d. h. der Auflagehumus und der obere Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe speichern den weit überwiegenden Teil zwischen 70 und 80 %. Nur beim Lehm und den organisch geprägten Standorten entfallen auf den unteren Mineralboden um 40 % des Kohlenstoffvorrates im Profil (s. Abb. 114).

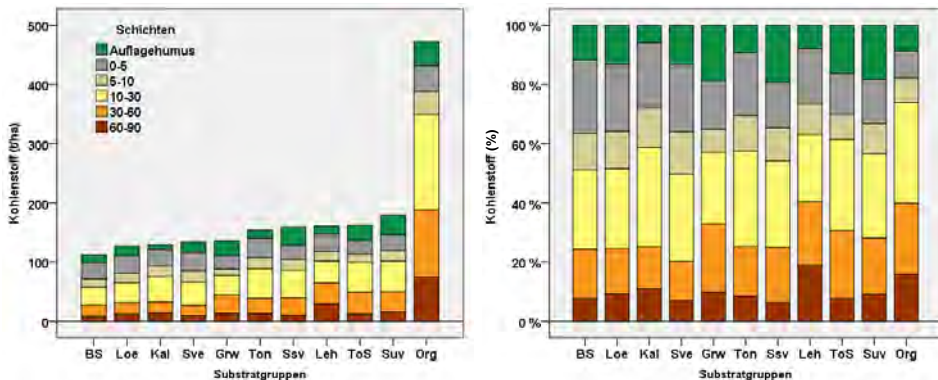


Abbildung 114: Kohlenstoffvorräte bei der BZE II im Auflagehumus und in den Tiefenstufen (0-5, 5-10, 10-30, 30-60, 60-90 cm) nach Substratgruppen in t/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Der aufstockende Bestand beeinflusst die Kohlenstoffvorräte ebenfalls. Je höher der Nadelholzanteil, desto höher sind die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus. Dies wird in der Abbildung 115 ersichtlich. Die geringsten Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus fanden sich bei den Laubholzbeständen Buche (7,4 t/ha), sonstigem Laubholz (11,2 t/ha) und Eiche (13,6 t/ha), die höchsten Vorräte unter Kiefer (36,1 t/ha) und Nadel-Mischwald (38,4 t/ha). Dies steht auch im Zusammenhang mit den Substratgruppen: Je ärmer der Standort, desto höher sind die Anteile des Nadelholzes und damit die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus.

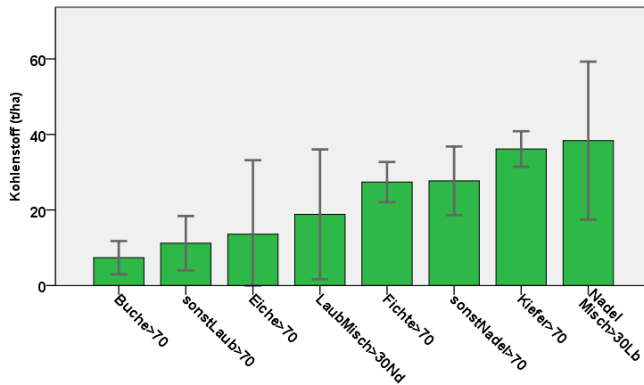


Abbildung 115: Kohlenstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus in Abhängigkeit von der Bestandeszusammensetzung (> 70 = Bestandesanteil größer als 70 %; Nd = Nadelholz, Lb = Laubholz)

Die Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden nach Substratgruppen ergeben folgendes Bild: In den meisten Substratgruppen ist ein Rückgang der Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und eine Zunahme im oberen Mineralboden bis 30 cm erkennbar (s. Abb. 116). Die Kohlenstoffvorratsänderungen in den Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm sind nur geringfügig und in keinem Fall signifikant. In den Substratgruppen mit relativ vielen BZE-Punkten (z. B. unverlehmter Sand, Buntsandstein, Lösslehm) gibt es auch signifikante Unterschiede in den Mineralbodentiefenstufen bis 30 cm Bodentiefe. Für den unverlehmten Sand und den Buntsandstein sind auch auf Profilebene die Kohlenstoffzunahmen signifikant. Hinsichtlich der Speicherraten für Kohlenstoff erwies sich die Waldkalkung in der Substratgruppe unverlehmter Sand als bedeutender Faktor. Im gekalkten Kollektiv des unverlehmten Sandes z. B. stiegen die Kohlenstoffvorräte um knapp 20 % an (+31 t/ha), im ungekalkten Kollektiv gab es nur einen nicht signifikanten Anstieg um knapp 5 % (+7 t/ha).

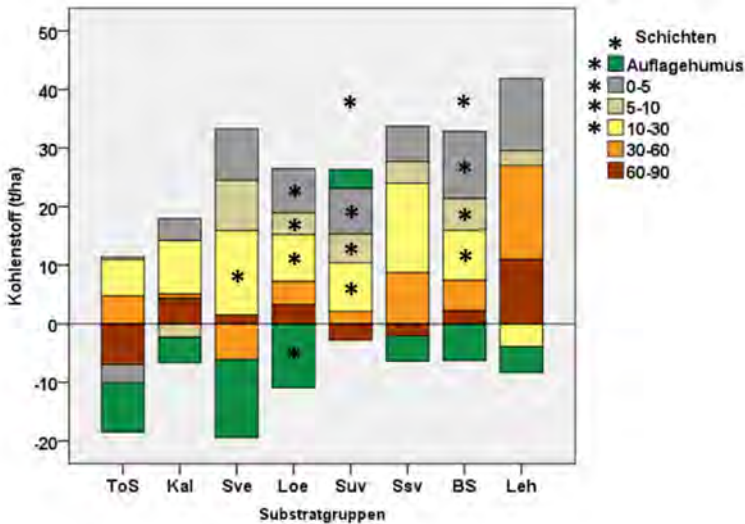


Abbildung 116: Veränderungen der Kohlenstoffvorräte [t/ha] zwischen der BZE I und BZE II nach Substratgruppen und Tiefenstufen [cm] (* signifikant auf dem 0.05 % Niveau, Wilcoxon; für die jeweiligen Tiefenstufen (in den Balken), für das jeweilige Kollektiv (oberhalb der Balken), über die Kollektive hinweg in der jeweiligen Tiefenstufe (links der Legende) und über alle Profile hinweg (oberhalb der Legende)), Darstellung nur für Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Kal: Kalkstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

6.5.7 Stickstoff

Stickstoff (N) als ein wichtiger Makronährstoff ist von Natur aus in Waldökosystemen mit wenigen Ausnahmen nur in geringen Mengen vorhanden und damit zumeist wachstumslimitierend. Stickstoff kommt kaum in Gesteinen vor, reichert sich aber im Laufe der Zeit über Naturereignisse wie Gewitter beziehungsweise biologische Stickstoffbindung aus der Luft mit organischer Substanz im Boden an. In der Pflanzensubstanz ist Stickstoff Hauptnährelement und wird im Waldboden über die Blatt- und Wurzelstreu, das Wurzelwachstum und die bodenbiologische Aktivität angereichert. Durch intensive Streu-, Plaggen- und Holznutzung in der vorindustriellen Zeit sind vielerorts die Stickstoffvorräte in den Wäldern deutlich zurückgegangen. Entsprechende Einschränkungen des Baumwachstums und der Flächenproduktivität waren die Folge. Die unterschiedlich ausgeprägten frühen Stickstoffnutzungen tragen zu einer großen räumlichen Variabilität der Stickstoffvorräte in Waldökosystemen bei. Im Zuge der relativ hohen atmosphärischen Stickstoffeinträge der letzten Jahrzehnte haben sich die Stickstoffvorräte in den Wäldern gegenüber der vorindustriellen Zeit wieder erholt bzw. erhöht. Dies ging teilweise mit einem merklich erhöhten Zuwachs der Waldbäume einher. Liegen die Stickstoffeinträge über

dem Bedarf der Wälder, kann es je nach Standort und Region zu Austrägen mit dem Sickerwasser in das Grundwasser oder zu gasförmigen Verlusten kommen. Der Eintrag von Ammonium-Stickstoff hat eine versauernde Wirkung und der Nitrataustrag führt über einen Verlust an basischen Kationen zu einer Verarmung der Böden und belastet zudem das Grundwasser. Überhöhte Stickstoffeinträge haben weiterhin zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung in der Waldbodenvegetation geführt.

In Abbildung 117 sind die durchschnittlichen Stickstoffvorräte für alle Waldböden in Niedersachsen nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Gesamtprofil bis 90 cm Bodentiefe dargestellt.

Die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und in den Waldböden Niedersachsens bis 90 cm Bodentiefe liegen bei der BZE II mit durchschnittlich rund 8,5 t/ha Stickstoff im mittleren Bewertungsbereich nach der Forstlichen Standortsaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003; s. Tab. 15, S. 164). Der Auflagehumus hat mit 1,05 t/ha Stickstoff dabei einen Anteil von 12 %. Im Vergleich zu den Bundesländern Hessen und Sachsen-Anhalt liegen die Stickstoffvorräte in Niedersachsen etwas höher. Dies kann analog zum Kohlenstoff vor allem auf die höheren Auflage- und Feinbodenvorräte in Niedersachsen zurückgeführt werden. Die summierten Stickstoffvorräte der BZE II in Niedersachsen von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe streuen von 3,3 t/ha bis zu über 33 t/ha Stickstoff. Die geringsten Stickstoffvorräte im BZE-Kollektiv in Niedersachsen finden sich in einer mit Kiefer bestockten ehemaligen Sanddünen-Landschaft bei Meppen, die höchsten in einem mit Moorbirke und Erle bestocktem Erdniedermoor bei Neustadt am Rübenberge.

Ähnlich wie beim Kohlenstoffvorrat sind in den oberen 30 cm Mineralboden mit rund 4,5 t/ha Stickstoff insgesamt 54 % der Stickstoffvorräte bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Stickstoff ist vor allem in organischer Substanz gebunden, die vor allem im oberen Mineralboden mit höheren Anteilen vertreten ist. Dennoch sind die Anteile der Tiefenstufe 30-60 cm am Stickstoffvorrat mit 22 % und der Tiefenstufe 60-90 cm mit 13 % nicht unbedeutend. Die prozentuale Tiefenverteilung der Stickstoffvorräte war bei der BZE I nahezu identisch.

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 30-60 cm konnten in allen Tiefenstufen signifikante Veränderungen im Vergleich zur BZE I nachgewiesen werden. Der Stickstoffvorrat im Auflagehumus verringerte sich um durchschnittlich 200 kg/ha. Bezogen auf den Vorrat der BZE I sind dies 16 % weniger. Im oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe kam es dagegen analog zum Kohlenstoff zu signifikanten Zunahmen. Summiert ergab sich ein höherer Stickstoffvorrat von 850 kg/ha und damit ein prozentualer Zuwachs um 17 % bezogen auf den Vorrat der BZE I bis 30 cm Bodentiefe. In der Summe lagen die Stickstoffvorräte bei der BZE II im Auflagehumus und Mineralboden bis 30 cm bei rund 5,6 t/ha, bei der BZE I bei 4,9 t/ha. Damit zeigt sich, wie bereits bei den Kohlenstoffvorräten, die Verlagerung von

Stickstoff aus dem bodenbiologisch aktiven Auflagehumus in den oberen Mineralbodenbereich (0-30 cm). In der Tiefenstufe 30-60 cm blieben die Stickstoffvorräte zwischen den beiden BZE-Erhebungen weitgehend konstant, die Zunahme von 70 kg/ha (+4 %) ist nicht signifikant. Im Unterboden zwischen 60 und 90 cm Bodentiefe ergaben sich dagegen signifikante Stickstoffverluste, bei der BZE II lag der Stickstoffvorrat mit rund 1,1 t/ha um 310 kg niedriger (-29 %) als bei der BZE I.

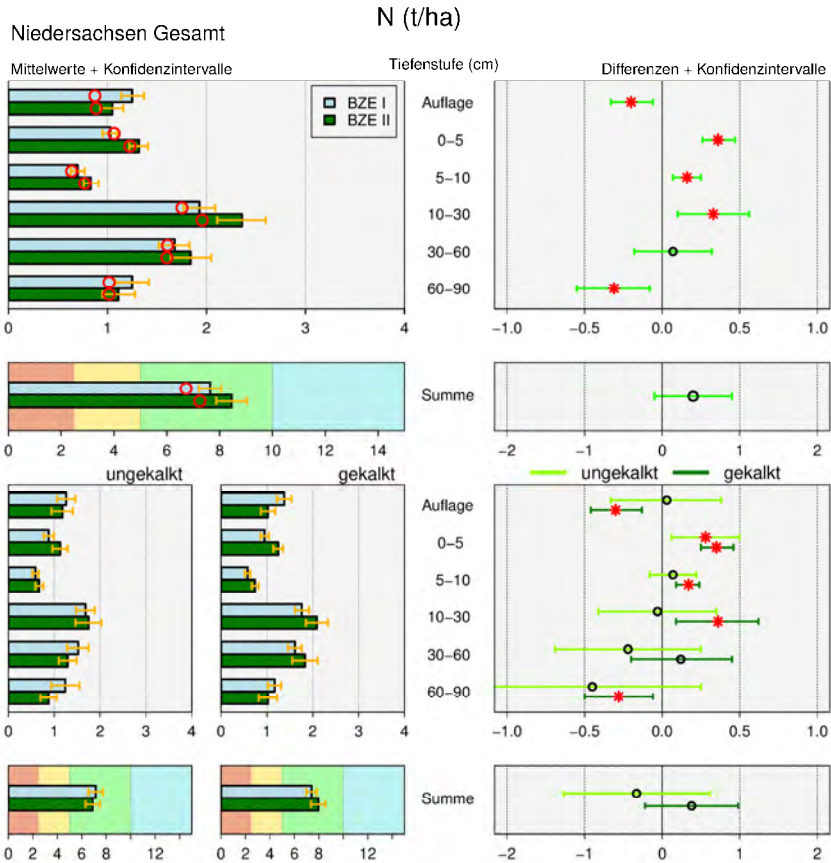


Abbildung 117: Stickstoffvorräte [t/ha] in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 210$) und II ($n = 170$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 111$) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken,) und nach ungekalkt (BZE I $n = 62$, BZE II $n = 47$, Schnittmenge $n = 27$) und gekalkt (BZE I $n = 114$, BZE II $n = 94$, Schnittmenge $n = 69$) in den unteren 6 Grafiken; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Im Gegensatz zu Kohlenstoff findet auf Profilebene keine absicherbare Anreicherung von Stickstoff statt. Vielmehr gleicht sich der Stickstoffverlust im Auflagehumus mit den Zunahmen im Mineralboden bis 30 cm und den Abnahmen in 60-90 cm Bodentiefe auf Gesamtprofilebene rechnerisch aus. Die Zunahme von 400 kg/ha (+5 %) ist nicht signifikant.

Bei der Betrachtung des Einflusses der Waldkalkung auf die Veränderung der Stickstoffvorräte zeigt sich nur im gekalkten Kollektiv ein signifikanter Stickstoffverlust im Auflagehumus (-300 kg/ha (-22 %) bezogen auf den Stickstoffvorrat der BZE I) gegenüber dem ungekalkten Kollektiv, in dem sich kaum ein Unterschied zur BZE I zeigte (+30 kg/ha (2 %), s. Abb. 117, Teilgrafik g). Dies deckt sich mit den Ergebnissen bezüglich der Vorratsänderung bei Kohlenstoff. Mit zunehmender Bodentiefe zeigen sich im gekalkten Kollektiv bis 30 cm Bodentiefe weitere deutliche und signifikante Zunahmen von Stickstoff. In der BZE II erhöhten sich die Stickstoffvorräte in den Tiefenstufen 0-5 cm um 350 kg/ha (+37 %), 5-10 cm um 170 kg/ha (+29 %) und in 10-30 cm um 360 kg/ha (+20 %) gegenüber den Werten der BZE I. In 30-60 cm Bodentiefe lagen die Stickstoffvorräte mit 120 kg/ha etwas höher (+7 %, nicht signifikant), in der Tiefenstufe 60-90 cm kam es zu signifikanten Abnahmen von 280 kg/ha (-24 %). Insgesamt ergibt sich dabei für das gekalkte Kollektiv auf Gesamtprofilebene eine Zunahme der Stickstoffvorräte von insgesamt 380 kg/ha (+5%). Dieser Unterschied ist nicht signifikant.

Die Zunahmen der Stickstoffvorräte im Mineralboden bis 30 cm gleichen die Verluste im Auflagehumus und unteren Mineralboden komplett aus. Im Unterschied zum gekalkten Kollektiv traten im ungekalkten Kollektiv nur in der Tiefenstufe 0-5 cm signifikante Differenzen mit einer Zunahme von 280 kg/ha (+32%) zur BZE I auf. Ansonsten blieben die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen 5-10 und 10-30 cm weitgehend konstant. Im unteren Mineralboden in 30-60 cm traten mit -220 kg (-14 %) und in 60-90 cm mit -450 kg/ha (-36 %) deutliche Verluste auf, die sich aber nicht absichern ließen. Insgesamt ergeben sich damit rechnerisch für das Gesamtprofil im ungekalkten Kollektiv Verluste beim Stickstoffvorrat von durchschnittlich 330 kg/ha (-5 %), diese Differenz ist jedoch nicht signifikant.

In Abbildung 118 sind die Differenzen aller BZE-Punkte in den drei Kollektiven gekalkt, ungekalkt und außerhalb der Kalkungskulisse („entfällt“, z. B. Kalkstein, Mergel, Kalklöss) dargestellt. In der Darstellung sind extreme Ausreißer und organische Standorte nicht enthalten. Im ungekalkten Kollektiv traten in diesem bereinigten Datensatz keine signifikanten Differenzen zwischen der BZE I und BZE II mehr auf, im gekalkten Kollektiv bestätigten sich die o. g. Ergebnisse. Im Kollektiv außerhalb der Kalkungskulisse („entfällt“) kam es wie im gekalkten Kollektiv zu einer signifikanten Abnahme der Stickstoffvorräte im Auflagehumus. Die relativ hohen Zunahmen der Stickstoffvorräte im Mineralboden in der Tiefenstufe 0-30 cm im Kollektiv „entfällt“ sind im Vergleich zum gekalkten Kollektiv nicht signifikant. Dies steht vor allem im Zusammenhang mit der geringen Stichprobenzahl und stark

streuenden Wertebereichen sowohl bei den Zunahmen als auch bei den Abnahmen der Stickstoffvorräte.

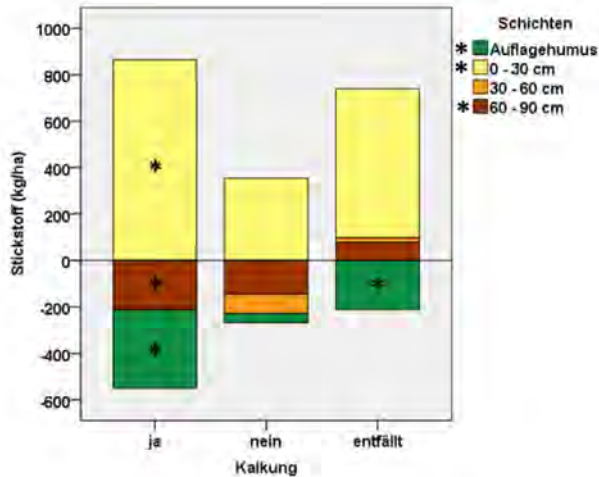


Abbildung 118: Veränderungen der Stickstoffvorräte [kg/ha] (BZE II - BZE I) im Auflagehumus und Mineralboden für gekalkte („ja“, n = 64) und ungekalkte („nein“, n = 25) BZE-Punkte sowie nicht zur Kalkungskalisse gehörende BZE-Punkte („entfällt“, n = 9) (* signifikant auf dem 0,05 % Niveau, Wilcoxon; für die jeweiligen Tiefenstufen (in den Balken), für das jeweilige Kollektiv (oberhalb der Balken), über die Kollektive hinweg in der jeweiligen Tiefenstufe (links der Legende)), ohne Ausreißer und organische Standorte

6.5.7.1 Stickstoffvorräte nach Substratgruppen

Die Verteilung der Stickstoffvorräte nach Substratgruppen ist in Abbildung 119 dargestellt.

Die mittleren Stickstoffvorräte zwischen 5 und 10 t/ha der jeweiligen Gesamtprofile nach Substratgruppen fallen analog zur Verteilung beim Kohlenstoff überwiegend in den mittleren Bewertungsbereich. Im Unterschied zum Kohlenstoff weisen die schwach- und unverlehmten Sande mit Werten zwischen 6 und 7 t/ha die geringsten Stickstoffvorräte auf. Die Substratgruppen Buntsandstein, Kreidesandstein, verlehmtter Sand und Lösslehm folgen mit etwas höheren Vorräten zwischen 7 und 8 t/ha. Noch höhere Stickstoffvorräte finden sich in den Substratgruppen Granit, Grauwacke, Kalkstein, Tonschiefer, Ton(stein) und Lehm mit mittleren Vorräten zwischen 9 und 12 t/ha. Mit rund 16 t/ha speichern die organisch geprägten Standorte den meisten Stickstoff. Damit ähnelt die Spanne der mittleren Stickstoffvorräte bezogen auf die Substratgruppen der Spanne bei den Kohlenstoffvorräten und ist damit wesentlich enger als bei den Nährelementen Calcium, Magnesium und Kalium.

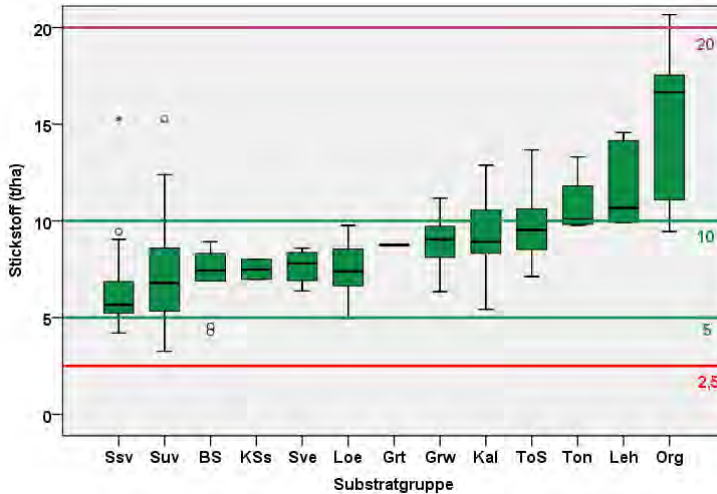


Abbildung 119: Verteilungen der Stickstoffvorräte [t/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in niedersächsischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalkstein, KSs: Kreidesandstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 15, S. 164)

Die Verteilung der Stickstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden nach Substratgruppen wird aus Abbildung 120 ersichtlich und ist in den Substratgruppen relativ ähnlich.

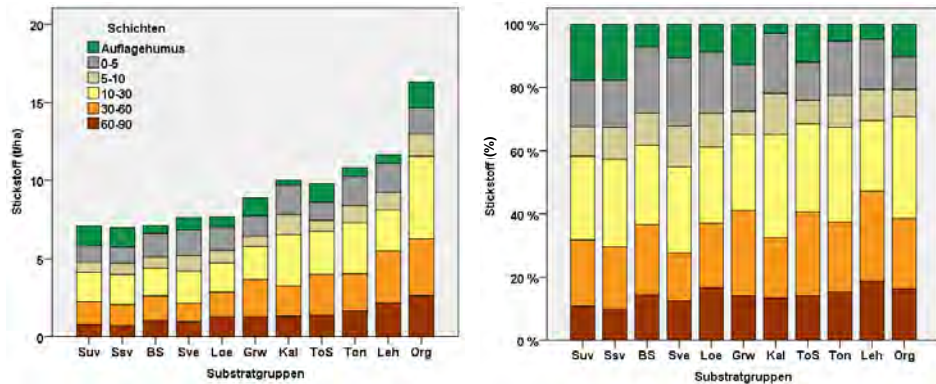


Abbildung 120: Stickstoffvorräte im Auflagehumus und in den Tiefenstufen (0-5, 5-10, 10-30, 30-60, 60-90 cm Bodentiefe) nach Substratgruppen bei der BZE II in Niedersachsen in t/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Im Mittel sind rund 12 % des Stickstoffs im Auflagehumus, 16 % in der Tiefenstufe 0-5, 10 % in 5-10 und 28 % in 10-30 cm gespeichert. Damit befinden sich im Oberboden bis 30 cm mit Auflagehumus 65 % des gesamten Stickstoffvorrates. Auf den unteren Mineralboden von 30-60 cm entfallen 22 % und von 60-90 cm noch 13 %. Diese Verteilung entspricht ungefähr der von Kohlenstoff. Auffällig sind die geringen Stickstoffvorräte im Auflagehumus der Substratgruppen mit den besseren Humusformen Kalkstein, Ton(stein) und Lehm mit prozentualen Anteilen von unter 5 % am Gesamtprofil. Umgekehrt speichern die Standorte mit eher schlechteren Humusformen relativ mehr Stickstoff im Auflagehumus, wie die schwach- und unverlehmten Sande, Grauwacke und Tonschiefer-Standorte mit Werten zwischen 12 und 18 %.

Der Stickstoffvorrat wird wie der Kohlenstoffvorrat durch den aufstockenden Bestand beeinflusst. Je höher der Nadelholzanteil im aufstockenden Bestand ist, desto höher sind auch die Stickstoffvorräte im Auflagehumus (s. Abb. 121).

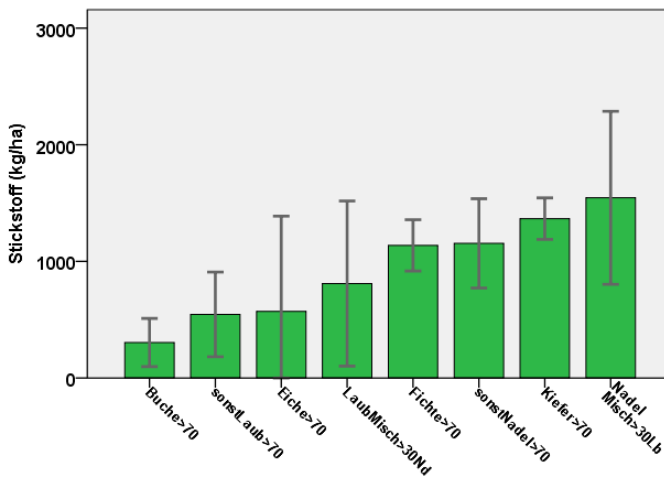


Abbildung 121: Stickstoffvorräte [kg/ha] im Auflagehumus in Abhängigkeit von der Bestandeszusammensetzung (> 70 = Bestandesanteil größer als 70 %; Nd = Nadelholz; Lb = Laubbolz)

Die im BZE-Gesamtkollektiv festgestellten Abnahmen der Stickstoffvorräte im Auflagehumus und der Tiefenstufe 60-90 cm sowie die Zunahmen aller Tiefenstufen bis 30 cm Bodentiefe waren in den Substratgruppen nur vereinzelt signifikant. Für keine Substratgruppe konnte auf Gesamtprofilebene ein signifikant veränderter Stickstoffvorrat belegt werden (s. Abb. 122). Häufig glichen sich die Zunahmen im Mineralboden mit den Abnahmen im Auflagehumus weitgehend aus, wie z. B. beim Buntsandstein oder Lösslehm. Oder es kam zu Abnahmen in unteren Schichten, die aber durch Zunahmen im Oberboden kompensiert wurden (z. B. unverlehmter Sand). Für einzelne Tiefenstufen konnten im schwach- und unverlehmten Sand, Kalkstein, Lösslehm und Buntsandstein Unterschiede belegt werden. In den anderen

Substratgruppen kam es zwar rechnerisch teilweise ebenfalls zu relativ hohen Unterschieden, die sich jedoch nicht absichern ließen.

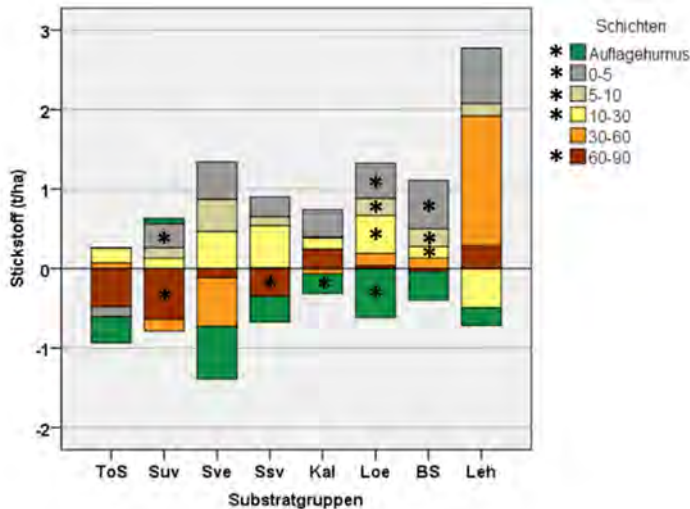


Abbildung 122: Veränderungen der Stickstoffvorräte [t/ha] zwischen BZE I und BZE II nach Substratgruppen und Tiefenstufen [cm] (* signifikant auf dem 0.05 %-Niveau, Wilcoxon; für die jeweiligen Tiefenstufen (in den Balken), für das jeweilige Kollektiv (oberhalb der Balken), über die Kollektive hinweg in der jeweiligen Tiefenstufe (links der Legende) und über alle Profile hinweg (oberhalb der Legende)), Darstellung nur für Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BS: Buntsandstein, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Die deutlichsten Zunahmen des Stickstoffvorrats auf Gesamtprofilebene wurden bei den Substratgruppen Lehm (+21 %), Buntsandstein (+12 %) und Lösslehm (+10 %) festgestellt, die deutlichsten Abnahmen mit -6 % beim Tonschiefer. Signifikant waren diese Änderungen in keinem Fall. Die prozentualen Änderungsraten der Stickstoffvorräte für das Gesamtprofil in den anderen Substratgruppen lagen zwischen -2 und 3 % auf geringem Niveau.

6.5.8 C/N-Verhältnisse

Die C/N-Verhältnisse berechnen sich als Quotient aus Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat (bzw. Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt). Sie sind ein Indikator für die Umsetzungsbedingungen der organischen Substanz. Je enger die Verhältnisse sind, desto höher sind die Humusmineralisations- und -umsetzungsraten und damit die Stickstoffversorgung der Waldbestände. Ein weites C/N-Verhältnis kennzeichnet eine geringe Sättigung mit Stickstoff im Auflagehumus oder Mineralboden und zeigt eine

eher geringe biologische Aktivität an. In der Regel wird der Oh-Horizont im Auflagehumus bewertet, bei Mull-Standorten der Ah-Horizont (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). In Abbildung 123 sind die C/N-Verhältnisse für den Auflagehumus und alle Tiefenstufen sowie für das Gesamtprofil angegeben. Im Vergleich zum Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt sind die C/N-Verhältnisse in Niedersachsen weiter. Dies kann auf die hohen Anteile sandiger Standorte und Nadelholzbestockung zurückgeführt werden, die grundsätzlich wesentlich schlechtere C/N-Verhältnisse aufweisen.

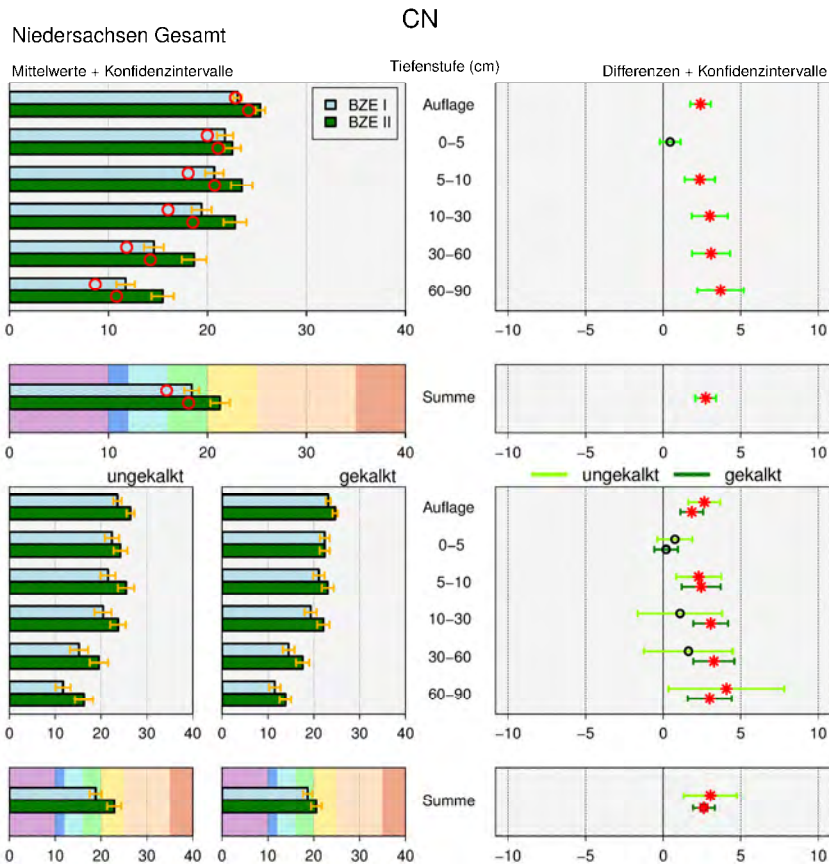


Abbildung 123: C/N-Verhältnisse in niedersächsischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 209$) und II ($n = 170$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 111$) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt (BZE I $n = 62$, BZE II $n = 47$, Schnittmenge $n = 27$) und gekalkt (BZE I $n = 114$, BZE II $n = 94$, Schnittmenge $n = 69$) (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 61, S. 167

Die durchschnittlichen C/N-Verhältnisse im Auflagehumus der BZE II liegen mit 25 auf der Grenze zwischen dem weiten bis mäßig weiten Bewertungsbereich nach der AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) (s. auch Tab. 15, S. 164) und sind typisch für Waldstreu. Sie haben sich im Vergleich zur BZE I (23) signifikant geweitet und damit verschlechtert. Mit zunehmender Bodentiefe verengen sich die C/N-Verhältnisse bis auf C/N 12 (BZE I) im Unterboden, da die Kohlenstoffvorräte mit zunehmender Bodentiefe relativ stärker abnehmen als die Stickstoffvorräte. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 0-5 cm erhöhten sich die C/N-Verhältnisse von der BZE I zur BZE II in jeder Tiefenstufe des Mineralbodens signifikant um Werte zwischen 2 und 4. Dies geht einerseits auf die deutlich gestiegenen Kohlenstoffvorräte bis 30 cm Bodentiefe und andererseits auf die zurückgegangenen Stickstoffvorräte besonders in der Tiefenstufe 60-90 cm der BZE II gegenüber der BZE I zurück. Die Veränderung ist auch auf Profilebene signifikant (s. Abb. 123, Teilgrafik d).

Im Mineralboden zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den C/N-Verhältnissen im gekalkten bzw. ungekalkten Kollektiv (s. Abb. 123, Teilgrafiken e-j). Im gekalkten Kollektiv wirkt sich gegenüber dem ungekalkten Kollektiv die relativ stärkere Kohlenstoffzunahme gegenüber Stickstoff mit signifikant weiteren C/N-Verhältnissen in den Tiefenstufen 10-30 und 30-60 cm aus. Ansonsten gibt es kaum Unterschiede zwischen beiden Kollektiven. Auf Profilebene weiteten sich in beiden Kollektiven die C/N-Verhältnisse.

6.5.8.1 C/N-Verhältnisse nach Substratgruppen

Für die einzelnen Substratgruppen sind in Abbildung 124 nur die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus und im oberen Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe angegeben. Die C/N-Verhältnisse der tieferen Bodenschichten unter 10 cm Bodentiefe verringern sich mit zunehmender Bodentiefe auch in den Substratgruppen ähnlich dem Gesamtkollektiv deutlich, lassen sich aber nicht weiter nach den Substratgruppen differenzieren. Sie sind daher nicht grafisch dargestellt.

Die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus liegen in allen Substratgruppen überwiegend im mäßig-weiten Bewertungsbereich (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) zwischen 20 und 25. In einigen Substratgruppen kommen in der BZE II im Auflagehumus auch weite C/N-Verhältnisse vor, so z. B. im Kalkstein, Lösslehm und Buntsandstein sowie beim unverlehnten Sand. Damit differieren die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus nur wenig hinsichtlich der Substratgruppen. Die Veränderungen der C/N-Verhältnisse im Auflagehumus zwischen den BZE-Erhebungen sind zumeist geringfügig. Signifikante Unterschiede gab es jedoch für die Substratgruppen Kalkstein, Buntsandstein, Lösslehm und bei dem schwach- sowie unverlehnten Sand. In allen diesen Fällen weiteten sich die C/N-Verhältnisse bei der BZE II und führten mit Ausnahme des schwach verlehnten Sandes in eine ungünstigere ökologische Bewertungsstufe.

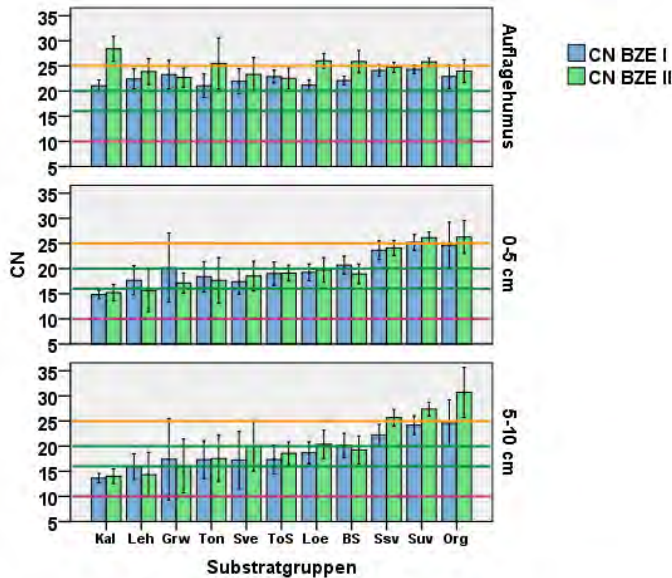


Abbildung 124: C/N-Verhältnisse bei der BZE I und II nach Substratgruppen für den Auflagehumus und die Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm in Niedersachsen (BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Kal: Kalkstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; die grünen Linien kennzeichnen den mittleren Bewertungsbereich, Werte oberhalb der orangenen Linie kennzeichnen den weiten und unterhalb der magentafarbenen Linie den engen Bewertungsbereich; s. Tab. 15, S. 164)

In der Tiefenstufe 0-5 cm sind die Unterschiede hinsichtlich der Substratgruppen deutlicher (BZE II): die eher nährstoffreichen Standorte in den Substratgruppen Kalkstein, Lehm, Ton(stein), Lösslehm, Tonschiefer, Buntsandstein und verlehmtter Sand liegen im mäßig-engen bis mittleren Bereich und die Substratgruppen mit eher nährstoffarmer Ausstattung mehr im weiten C/N-Bereich (schwach- und unverlehmtter Sand sowie organisch geprägte Standorte). Ein ähnliches Bild zeigt sich in der Tiefenstufe 5-10 cm. Signifikante Unterschiede zwischen der BZE I und II traten in den Tiefenstufen 0-5 und 5-10 cm Bodentiefe nicht auf.

Die Veränderungen der C/N-Verhältnisse in den einzelnen Substratgruppen folgen dem allgemeinen Muster mit weiteren C/N-Verhältnissen bei der BZE II, welches vor allem auf höhere Kohlenstoffvorräte zurückgeführt werden kann. Ein deutlicher Kalkungseffekt auf die C/N-Verhältnisse zeigt sich in den Substratgruppen i. d. R. nicht, nur in der Substratgruppe unverlehmtter Sand weiteten sich die C/N-Verhältnisse im gekalkten Kollektiv signifikant von der BZE I zur BZE II. Dies kann vor allem durch die höheren Kohlenstoffvorräte im Oberboden erklärt werden.

6.5.8.2 C/N-Verhältnisse im Auflagehumus nach Bestandestypen

Bei durchschnittlichen C/N-Verhältnissen zwischen 19 und 26 bei der BZE I und 22 und 27 bei der BZE II im Auflagehumus differieren diese recht wenig bei unterschiedlichen Bestandestypen und decken überwiegend den mäßig-weiten Bewertungsbereich ab. Die C/N-Verhältnisse sind im Auflagehumus von reinen Kiefern- und Buchenbeständen mit Werten um 27 am höchsten (BZE II, s. Abb. 125). Signifikante Veränderungen der C/N-Verhältnisse im Auflagehumus zwischen BZE I und BZE II traten in den Buchen- und Kiefernreinbeständen, Nadelmischbeständen mit über 30 % Laubholz und dem sonstigen Nadelholz mit weiteren C/N-Verhältnissen bei der BZE II auf. Bei Buche und Kiefer fallen diese dann in den weiten Bewertungsbereich.

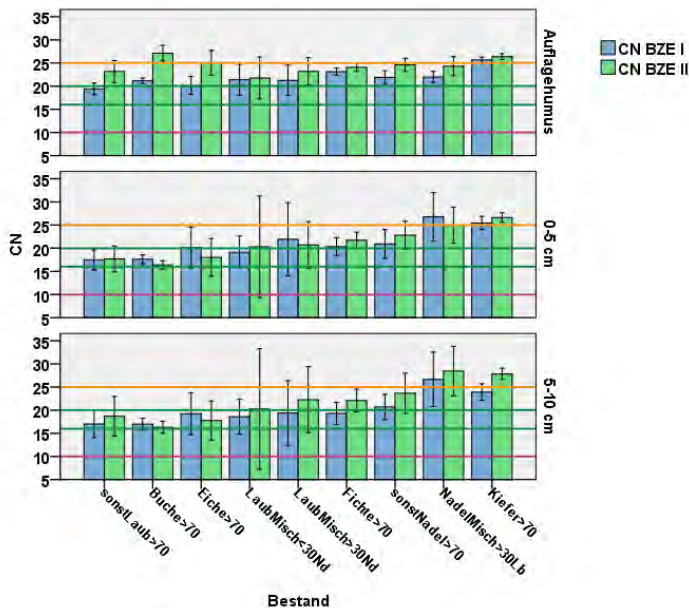


Abbildung 125: C/N-Verhältnisse bei der BZE I und II nach Bestandestypen für den Auflagehumus und die Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm in Niedersachsen (> 70 = Bestandesanteil größer als 70 %; Nd = Nadelholz; Lb = Laubholz; die grünen Linien kennzeichnen den mittleren Bewertungsbereich, Werte oberhalb der orangen Linie kennzeichnen den weiten und unterhalb der magentafarbenen Linie den engen Bewertungsbereich; s. Tab. 15, S. 164)

Etwas größere Unterschiede zeigen sich im Mineralboden. Hier liegen die durchschnittlichen C/N-Verhältnisse im Oberboden von 0 bis 10 cm Bodentiefe zwischen 16 (Buche) und 28 (Kiefer). Grundsätzlich unterscheiden sich die beiden Tiefenstufen hinsichtlich der mittleren C/N-Verhältnisse nur geringfügig. Die Kiefernreinbestände und Nadelmischbestände mit über 30 % Laubholz weisen weitere C/N-Verhältnisse auf als die übrigen Bestände. Signifikante Unterschiede

zur BZE I ergaben sich nur für Kiefer und sonstiges Nadelholz (über 70 %) in der Tiefenstufe 5-10 cm mit weiteren C/N-Verhältnissen in der BZE II. Ansonsten gab es keine abgesicherten Unterschiede.

7 Stickstoffstatus in der Bodenlösung und Stickstoffbilanz

Jan Evers, Bernd Abrends, Wendelin Weis

Nach dem Umweltbericht für Niedersachsen 2017 hat eine Bewertung des chemischen Zustands der Grundwasserkörper gemäß der Europäischen Wasser-Rahmenrichtlinie (EG-WRRL) ergeben, dass 41 % der 123 Grundwasserkörper in Niedersachsen das Ziel eines guten chemischen Zustands hinsichtlich Nitrat nicht erreichen (NMUEBK 2018b). Der Haupteintrag von Nitrat ins Grundwasser erfolgt aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. Unter Wald liegt der Austrag von Nitrat i. d. R. deutlich unter dem von landwirtschaftlichen Flächen (VON DER HEIDE et al. 2008, FÖRSTER 1975). Entsprechend kann nitratarmes Wasser aus Waldeinzugsgebieten z. B. mit nitratbelastetem Wasser aus landwirtschaftlich genutzten Gebieten verschnitten werden, um die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung für Nitrat einhalten zu können (AHRENDTS et al. 2011). Da Wälder seit mehreren Jahrzehnten hohen atmosphärischen Stickstoffbelastungen ausgesetzt sind (HORVÁTH et al. 2010, MEESENBURG et al. 2016) und sie den überschüssigen Stickstoff im Boden speichern (MEESENBURG et al. 2016, DE VRIES et al. 2006), ist es entsprechend geboten, den Stickstoffstatus unserer Wälder kontinuierlich zu überwachen und neu zu bewerten. Wichtige Informationen liefern hierbei die Nitratkonzentration im Sickerwasser unterhalb des Wurzelraumes und die Stickstoffbilanz. Ein Waldökosystem verliert dann Nitrat mit dem Sickerwasser, wenn mehr Nitrat in der Bodenlösung enthalten ist, als es dem Bedarf von Pflanzen und Mikroorganismen entspricht. Es wird dann als gesättigt bezeichnet (ABER et al. 1989). Die Stickstoffsättigung eines Waldökosystems lässt sich daher über die Bestimmung von Nitrat im Sickerwasser unterhalb des Wurzelraumes charakterisieren (BLOCK et al. 2000, DE VRIES et al. 2015).

Die Gewinnung von Bodenlösung unterhalb des Wurzelraumes z. B. durch Lysimeter über längere Zeiträume (kontinuierlich oder periodisch), mit Wiederholungen in der Fläche und die anschließende analytische Bestimmung von Nitrat im Labor, ist ein etabliertes Verfahren (NIEMINEN et al. 2016). Dies wird auf den Intensivmonitoringflächen im Wald praktiziert, lässt sich aber aus Kostengründen nicht an BZE-Punkten realisieren.

Daher wurde als vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung der Nitratkonzentration in der Bodenlösung an den BZE-Punkten der 1:2-Extrakt gewählt, bei dem sich im Rahmen einer Vorstudie relativ enge Korrelationen und hoch signifikante Beziehungen zu den Nitrat-Konzentrationen in der Bodenlösung des Mineralbodens um die jeweiligen Lysimeterkerzen ergaben (EVERS et al. 2001). In dieser Studie wurden an 34 Messpunkten auf Intensivmonitoringflächen bundesweit verschiedene Verfahren für die Bestimmung von Nitrat in der Bodenlösung verglichen. Die auftretende Konzentrationsspanne von Nitrat in den Bodenlösungen der verschiedenen

Monitoringflächen war hoch. Die gemessenen Nitrat-Konzentrationen im 1:2-Extrakt wurden in dieser Studie auf den Wassergehalt des Mineralbodens bei Probennahme standardisiert. Diese Werte lagen bei den Messpunkten der Vorstudie grundsätzlich über den Nitrat-Werten der korrespondierenden Bodenlösung der Lysimeterkerzen. Danach überschätzt der 1:2-Extrakt einen potenziellen Nitrataustrag oder eine bestimmte Nitrat-Konzentration in der Bodenlösung. Bei einem unauffälligen Befund, also geringen Nitrat-Konzentrationen im 1:2-Extrakt, würde in der Bodenlösung mit (noch) geringeren Konzentrationen zu rechnen sein.

Somit ist der 1:2-Extrakt als grober Schätzer für Nitrat in der Bodenlösung grundsätzlich geeignet. Da die Nitratkonzentration im Sickerwasser starken jahreszeitlichen und räumlichen Schwankungen unterliegt, kann die Abschätzung der Nitratkonzentration über den 1:2-Extrakt im Rahmen der BZE II nur eine Größenordnung für niedersächsische Wälder abbilden. Keinesfalls kann der 1:2-Extrakt eine kontinuierliche Messung der Bodenlösung ersetzen.

Der 1:2-Extrakt wurde bei der BZE I und BZE II an Bodenproben der jeweils tiefsten Tiefenstufe (i. d. R. 60-90 cm Bodentiefe) durchgeführt. Da beim 1:2-Extrakt 100 g trockenem Boden 200 ml Wasser zugeführt werden, ist die Messlösung gegenüber einer feldfrischen Probe verdünnt. Um aus den Nitratkonzentrationen im 1:2-Extrakt die Nitratkonzentration der jeweiligen Bodenlösung abzuschätzen, die im jeweiligen Boden zum Zeitpunkt der Probennahme gewesen sein könnte, sind hier zwei Verfahren zur Anwendung gekommen. Dies sollte einerseits die Übertragung der 1:2-Ergebnisse auf eine Bodenlösung absichern, wenn sich ähnliche Größenordnungen aus unterschiedlichen Ansätzen ergeben und andererseits auch Grenzen dieser Abschätzbarkeit darlegen.

Zum einen wurde die im Labor gemessene Nitratkonzentration im 1:2-Extrakt auf das Boden-Wasser-Verhältnis der jeweiligen Probe bei Feldkapazität nach der AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005 normiert. Dies soll die Verdünnung im 1:2-Extrakt ausgleichen und die unterschiedliche Wasserspeicherkapazität der Bodenarten einbeziehen. Bei einem Boden, der bis zur Feldkapazität gesättigt ist, kann theoretisch von einem Nitratfluss mit dem Sickerwasser ausgegangen werden und am ehesten ein Zusammenhang mit der Nitratkonzentration einer Lysimeterlösung aus diesem Mineralboden erwartet werden.

Zum anderen erfolgte die Umrechnung der in den 1:2-Extrakten gemessenen Nitratkonzentrationen in der BZE II auf eine Nitratkonzentration im Sickerwasser nach einem Modell, welches neuere Studien und Untersuchungen in Bayern und Baden-Württemberg mit einbezog (FLECK et al. 2019). Im Ergebnis ergab sich die beste Annäherung mit den zusätzlichen Variablen Sand-, Schluff- und Tonanteil jeweils als Masseprozent im Feinboden des 1:2-Extraktes.

In Tabelle 17 und Abb. 126 sind die Nitrat-N Konzentrationen für die BZE I und BZE II aus dem 1:2-Extrakt sowohl normiert auf Feldkapazität als auch aus den Modellergebnissen für alle die Punkte angegeben, die sowohl in der BZE I als auch in der BZE II erhoben wurden.

Tabelle 17: Nitrat-N-Konzentrationen [mg/l] im wässrigen 1:2-Extrakt der Punkte, die sowohl bei der BZE I als auch bei der BZE II für Niedersachsen beprobt wurden ($n = 61$, 8 extreme Werte entfernt), aus der jeweils tiefsten Tiefenstufe (i. d. R. 60-90 cm)

Nitrat-N Konzentration	N	Mittel [mg/l]	SD* [mg/l]	Median [mg/l]	Min [mg/l]	Max [mg/l]
BZE I Feldkapazität	61	3,32	2,83	2,49	0,41	13,53
BZE II Feldkapazität	61	3,78	3,18	2,65	0,60	14,09
BZE I Modell	61	1,97	1,95	1,06	0,12	8,18
BZE II Modell	61	2,05	2,33	0,81	0,15	9,12

* SD = Standardabweichung

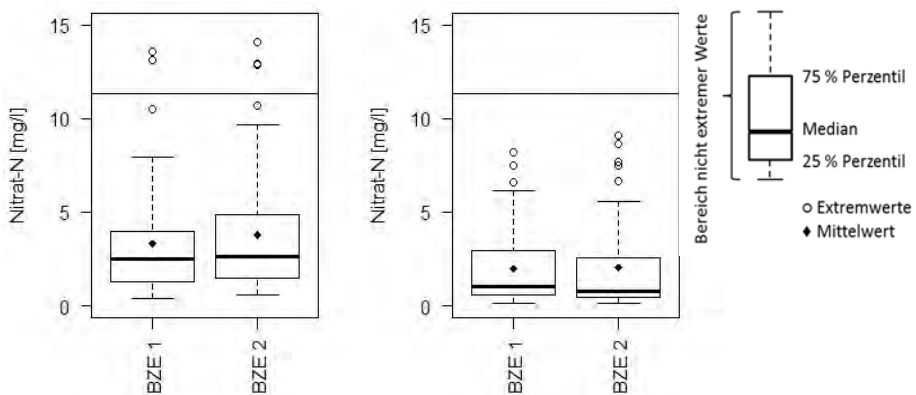


Abbildung 126: Nitrat-N-Konzentrationen [mg/l] im wässrigen 1:2-Extrakt der Punkte, die sowohl bei der BZE I als auch bei der BZE II für Niedersachsen beprobt wurden ($n = 61$, 8 extreme Werte entfernt), aus der jeweils tiefsten Tiefenstufe (i. d. R. 60-90 cm); links: normiert auf den Wassergehalt bei Feldkapazität; rechts: als modellierte Sickerwasserkonzentration; als horizontale Linie ist der Trinkwassergrenzwert von 11,3 mg/l Nitrat-N (entspricht 50 mg/l Nitrat) angegeben

Die mittleren Nitrat-N-Konzentrationen im 1:2-Extrakt aus dem unteren Wurzelraum liegen sowohl bei der BZE I als auch der BZE II in Niedersachsen mit 3,3 bzw. 2,0 mg/l (BZE I, Feldkapazität bzw. Modell) und 3,8 bzw. 2,1 mg/l (BZE II) weit unterhalb des Trinkwassergrenzwertes für Nitrat-N von 11,3 mg/l (entspricht 50 mg/l Nitrat) (s. Tab. 17). Nur vereinzelt wurde dieser Grenzwert in den beiden Inventuren mit dem 1:2-Extrakt überschritten. Daher können die Waldbestände der BZE derzeit als relativ unkritisch hinsichtlich der Stickstoffkonzentrationen im Sickerwasser im unteren Wurzelraum eingestuft werden.

Zwischen den 1:2-Extrakten der BZE I und II ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

Beide Ansätze zur Abschätzung von 1:2-Extrakt Nitrat-N-Konzentrationen auf eine Nitrat-N-Konzentration in der Bodenlösung der jeweiligen Böden liefern vergleichbare Größenordnungen, wobei die Nitrat-N-Konzentrationen im Modell deutlich geringer sind als die 1:2-Extrakt Ergebnisse normiert auf Feldkapazität (s. Tab. 17). Da für das Modell direkte Vergleichswerte zwischen Lysimeterlösungen und 1:2-Extrakten aus verschiedenen Versuchsflächen vorlagen, sind die modellierten Nitrat-N-Konzentrationen für die weiteren Auswertungen verwendet worden.

In der folgenden Abbildung 127 sind die BZE II-Punkte mit ihrer aus dem 1:2-Extrakt modellierten Nitrat-N-Konzentration in der Bodenlösung den verschiedenen Konzentrationsbereichen der Stickstoffdeposition für Niedersachsen nach SCHAAP et al. 2015 gegenübergestellt:

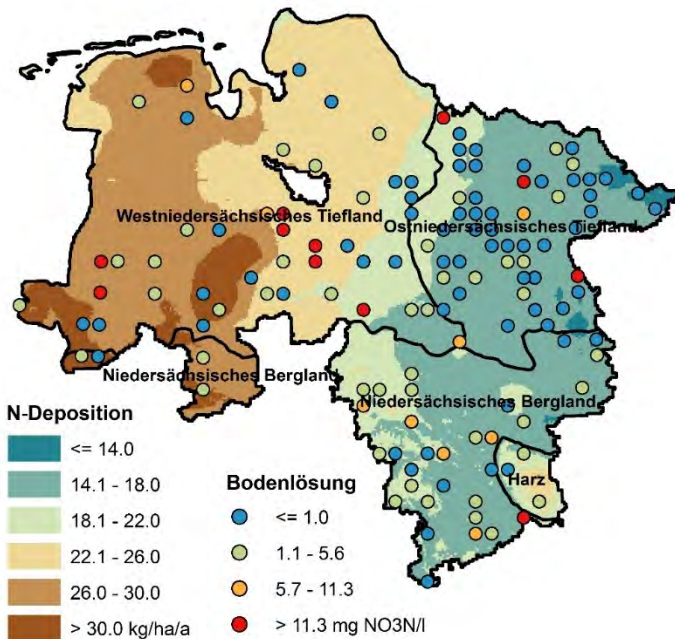


Abbildung 127: Nitrat-N Konzentrationen [mg/l] der Bodenlösung modelliert aus dem 1:2-Extrakt der BZE II ($n = 133$) für Niedersachsen aus der jeweils tiefsten Tiefenstufe (i. d. R. 60-90 cm) und modellierte Stickstoffdeposition nach SCHAAP et al. 2015

Die Untergrenze von 1 mg Nitrat-N/l fußt auf Untersuchungen von DE VRIES et al. (2015), die als Grenze zwischen ungestörten und stickstoffgesättigten Waldökosystemen diesen Wert vorschlagen. Für Trinkwasser gilt eine Nitrat-N-Konzentration von weniger als 5,6 mg Nitrat-N/l als unbedenklich. Entsprechend liegt auch der Zielwert der Europäischen Gemeinschaft (DE VRIES et al. 2015) bei 5,6 mg Nitrat-N/l. Der Bereich zwischen 5,6 und 11,3 mg Nitrat-N/l ist als vorsorglicher „Frühwarnwert“ gekennzeichnet (BLAG KLINA 2014). Als oberster Schwellenwert

(11,3 mg Nitrat-N/l) fungiert die Grundwasserqualitätsnorm gemäß der Richtlinie 2006/118/EG. Bei Nitrat-N Konzentrationen über diesem Schwellenwert befindet sich das Grundwasser nach der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft 2000/60/EG (EG-WRRL) „in einem schlechten chemischen Zustand“.

An 8 % aller BZE II-Punkte in Niedersachsen wird der Trinkwassergrenzwert von 11,3 mg/l von der modellierten Nitrat-N-Konzentration in der Bodenlösung überschritten (s. Abb. 127, rote Punkte). Im Westniedersächsischen Tiefland ist dieser Anteil mit 16 % am höchsten. Hier erreicht auch die Stickstoffdeposition ihre maximalen Werte. Im Ostniedersächsischen Tiefland überschreitet die Bodenlösung an 6 % der BZE-Punkte, im Niedersächsischen Bergland und dem Harz nur an einem BZE-Punkt den Trinkwassergrenzwert. In beiden Regionen sind die Stickstoffdepositionen deutlich geringer.

An 50 % aller niedersächsischen BZE II-Punkte liegt die modellierte Nitrat-N-Konzentration in der Bodenlösung im unteren Wurzelraum mit Werten von weniger als 1 mg/l im unkritischen Bereich (blaue Punkte). An diesen Punkten ist das Risiko einer Belastung des Grundwassers mit Nitrat gering. Das Ostniedersächsische Tiefland hat mit rund 75 % der zugehörigen BZE-Punkte den höchsten Anteil solcher unkritischen Standorte. Das Westniedersächsische Tiefland weist mit knapp 40 % einen wesentlich geringeren Anteil und das Bergland mit 30 % den geringsten Anteil auf.

35 % aller BZE II-Punkte in Niedersachsen befinden sich in einem Bereich mit höherem Austragsrisiko (grüne Punkte). Dieser Anteil ist im Bergland mit gut 50 % relativ hoch, unter anderem aufgrund einer höheren Stickstoffdeposition von über 18 kg/ha und Jahr. Mit 14 % ist auch im Bergland der Anteil der BZE II-Punkte mit erhöhtem Austragsrisiko für Nitrat am höchsten (orange Punkte), der Anteil liegt für Niedersachsen sonst im Mittel bei 7 %. 7 % ist auch der Anteil dieser BZE II-Punkte in der Region mit der höchsten Stickstoffdeposition, dem Westniedersächsischen Tiefland.

Mit steigender Stickstoffdeposition treten im Allgemeinen höhere Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung und damit ein steigendes Nitrat-Austragsrisiko auf (vgl. HORVÁTH et al. 2010). Für das BZE II-Kollektiv zeigte sich aber, dass selbst in Regionen mit sehr hoher Stickstoffdeposition die modellierten Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung unkritische Werte einnehmen können oder die Nitratkonzentrationen trotz geringer Deposition hoch sein können. Aufgrund einer Vielzahl von Einflussfaktoren (Deposition: DISE u. WRIGHT 1995; C/N-Verhältnisse: GUNDERSEN et al. 1998b; Waldgeschichte: VITOUSEK et al. 1997; Baumarten: ROTHE et al. 2002; Bestandesstruktur: HORVÁTH et al. 2010; Geologie: HOLLOWAY et al. 1998; Wasserhaushalt: LAMMERSDORF et al. 1998) sind die dargestellten Nitratkonzentrationen durch eine sehr ausgeprägte räumliche Variabilität gekennzeichnet. Hinzu kommt, dass die hohe kleinräumliche Variabilität von Nitratkonzentrationen die flächenrepräsentative Ermittlung von mittleren Nitratkonzentrationen äußerst schwierig macht (AHRENDTS et al. 2017, KOHLPAIN'TNER et al. 2012). Trotz dieser

hohen Variabilitäten zeigen sich räumliche Muster, die sich auch inhaltlich begründen und belegen lassen. Näheres zur Interpretation wird in der folgenden Auswertung zu den Stickstoffausträgen beschrieben.

Die Nitrat-N Konzentrationen im unteren Wurzelraum treffen noch keine Aussage zu Stickstoffverlusten mit dem Sickerwasser aus dem Wurzelraum. Dafür werden neben den Konzentrationen Abschätzungen zu Wasserflüssen über Wasserhaushaltmodelle notwendig, um mit der Konzentration multipliziert Nitratfrachten ermitteln zu können. Eine entsprechende Berechnung für die BZE-Punkte (vgl. VON WILPERT et al. 2016) erfolgte mit dem forsthydrologischen Modell LWF-Brook90 (HAMMEL u. KENNEL 2001), welches die Verdunstung, die Bodenwasserflüsse einschließlich Sickerwasserspense sowie die Bodenwasserverfügbarkeit von Wäldern in täglicher Auflösung berechnet. Die Berechnung der Nitratausträge erfolgte dann durch Multiplikation der modellierten Nitrat-N Konzentrationen des 1:2-Extraktes mit den für den Zeitraum der BZE II-Erhebung berechneten Sickerwasserflüssen.

Hierfür sind in der Abbildung 128 die für die BZE II-Punkte berechneten Austräge an Nitrat-N dargestellt.

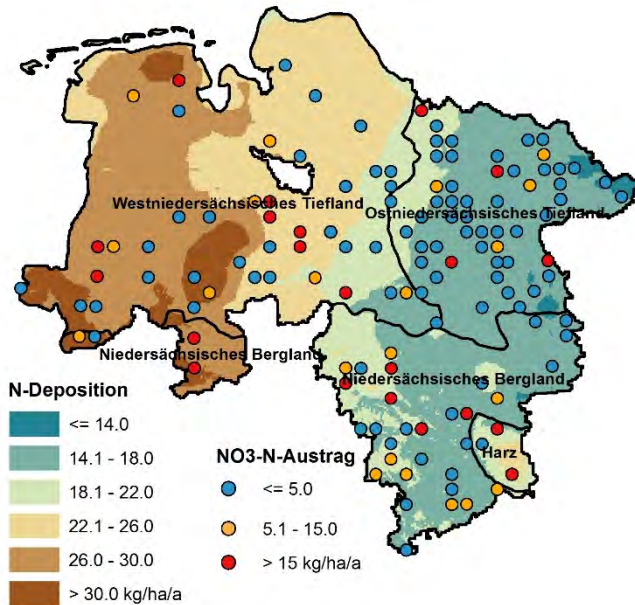


Abbildung 128: Nitrat-N-Austräge [kg/ha und Jahr] mit dem Sickerwasser aus dem 1:2-Extrakt der BZE II ($n = 133$) für Niedersachsen aus der jeweils tiefsten Tiefenstufe (i. d. R. 60-90 cm) und modellierte Stickstoffdeposition nach SCHAAP et al. 2015

Die Grenzfestlegung für die Stickstoffaustragsklassen orientiert sich an den Kennwerten des Stickstoffstatus aus der Ökosystembilanz nach BLOCK et al. (2000),

wonach Austräge von unter 5 kg je ha und Jahr als nicht mit Stickstoff gesättigte Systeme eingestuft werden. Zwischen 5 und 15 kg je ha und Jahr liegt eine Sättigung auf niedrigem Niveau, eine Sättigung auf hohem Niveau bei Austrägen von über 15 kg je ha und Jahr vor. Übersteigt der Austrag die Deposition, gilt das System als gestört. Solche Störungen können beispielsweise nach Kahlhieb, Windwurf, Verlichtung durch Insektenfraß oder Bodenbearbeitung auftreten (AHRENDTS 2012).

An 16 % aller BZE II-Punkte in Niedersachsen liegen die Nitratausträge mit dem Sickerwasser bei über 15 kg je ha und Jahr (rote Punkte). Dementsprechend können diese Waldökosysteme als gesättigt auf hohem Niveau eingestuft werden. Ihr Anteil ist mit 25 % im Bergland am höchsten. Im Ostniedersächsischen Tiefland überschreiten die Austräge an 8 %, im Westniedersächsischen Tiefland an 18 % der Punkte diese Grenze. Eine identische Verteilung in den Wuchsregionen ergibt sich für die als gesättigt auf niedrigem Niveau bezeichneten Systeme mit Austrägen von Nitrat-N von 5-15 kg je ha und Jahr (orange Punkte). Nicht mit Stickstoff gesättigt sind im Ostniedersächsischen Tiefland 85 %, im Westniedersächsischen Tiefland 64 % und im Bergland 50 % der jeweiligen BZE-Punkte (blaue Punkte).

Extrem hohe Stickstoffausträge von über 25 kg je ha und Jahr traten an insgesamt 13 von 133 BZE-Punkten in Niedersachsen auf (BZE I und II), davon 60 % im Westniedersächsischen Tiefland, 30 % im Ostniedersächsischen Tiefland und 10 % im Bergland. Die hohen Nitratausträge im Bergland konnten überwiegend über Störungen erklärt werden. An drei von den vier betroffenen BZE-Punkten waren stärkere Windwurfschäden durch den Sturm Kyrill 2007 aufgetreten.

Bei der Analyse der Sickerwasserausträge auf Zusammenhänge zu weiteren Umweltfaktoren über ein generalisiertes additives Regressionsmodell (GAM) (HASTIE u. TIEBSHIRANI 1990) ergaben sich signifikante ($p = 0.009$) positive Effekte der Deposition und signifikante ($p = 0.028$) negative Effekte des C/N-Verhältnisses in der Humusaufgabe. Entsprechende Zusammenhänge sind auch aus anderen Studien bekannt (GUNDERSEN et al. 1998b, DISE et al. 1998). Neben diesen Faktoren erwies sich die Substratgruppe als sehr einflussreich. Im Vergleich zu den Substratgruppen (vgl. auch EVERS et al. 2013b) Tonschiefer, Grauwacke, Bunt- und Kreidesandstein sowie Lösslehm zeigt sich für Kalke ein signifikant ($p = 0.034$) höheres Risiko und für die Substratgruppen organisch geprägte Standorte ($p = 0.002$), Sande ($p = 0.000$), Tone ($p = 0.001$) und Tonlehme ($p = 0.020$) ein signifikant geringeres Austragsrisiko an Nitrat. Hervorzuheben ist das sehr geringe Austragsrisiko der Tone. Böden mit hohen Tongehalten sind aufgrund ihrer geringeren Durchlässigkeit i. d. R. weniger anfällig für die Nitratauswaschung als sandigeres Substrat (GAINES u. GAINES 1994). Zudem haben sie ein wesentlich höheres Denitrifikationspotenzial (MURRAY et al. 2017, PARK u. SHIM 2001) und somit höhere gasförmige Stickstoffverluste, die entsprechend nicht mehr für den Austrag mit dem Sickerwasser zur Verfügung stehen. Durch ein sehr hohes Denitrifikationspotenzial sind auch die organischen Böden gekennzeichnet (RIHM u. ACHERMANN 2016). Nach MELLERT et al. (2005) verfügen reichere Böden über eine bessere Stickstoffversorgung und

entsprechend über ein geringeres Retentionspotenzial. Darüber hinaus sind insbesondere die armen Sandböden häufig mit Kiefern bestockt. Humusaufgaben und Oberböden sind bei dieser Baumart durch besonders weite C/N-Verhältnisse gekennzeichnet (COOLS et al. 2014). Das hohe Nitrataustragsrisiko bei der Substratgruppe der Kalke wird von MELLERT et al. (2005) auf die ausgeprägte Flachgründigkeit, die hohe Wasserdurchlässigkeit, das hohe Nitrifikationspotenzial und die hohen Stickstoff-Umsatzraten zurückgeführt. Die beschriebenen Risikofaktoren (Deposition, C/N-Verhältnis, Substrat) sind somit sehr plausibel und entsprechen gut den Ergebnissen anderer Untersuchungen (BORKEN u. MATZNER 2004, MELLERT et al. 2005).

Die mittlere jährliche Stickstoff-Deposition, Denitrifikation und Stickstoff-Aufnahme mit dem Bestand, jeweils für den Zeitraum zwischen der BZE I und II berechnet, sowie der durchschnittliche Nitrataustrag mit dem Sickerwasser (aus dem 1:2-Extrakt modelliert zum Zeitpunkt der BZE II) für Niedersachsen lässt die Berechnung einer Stickstoffbilanz zu. Die Stickstoffbilanz ist eine weitere Methode, um Vorratsänderungen in Böden, z. B. der Festphase zwischen BZE I und II, zu quantifizieren (PALVIAINEN et al. 2017, KORHONEN et al. 2013). Da es sich um zwei vollständig unabhängige Ansätze handelt, stützt ein Vergleich bei ähnlichen Größenordnungen die Plausibilität der Veränderungsdaten.

Die Ergebnisse des Methodenvergleichs für Niedersachsen sind in der folgenden Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Nitrat-N Bilanzgrößen [kg/ha und Jahr] für Niedersachsen, berechnet für die BZE I und II, jeweils auf Punkteebene, dargestellt sind die Mittelwerte und Mediane, ohne organisch geprägte Standorte und Extreme (Abweichungen von mehr als +/- 5 t N zur BZE I)

Nitrat-N	Deposition	Denitrifikation	Bestandes- aufnahme	Austrag	Bilanz	Vorrats- differenz
		kg je ha und Jahr				
Mittelwert	22,4	2,7	6,8	6,4	6,3	8,1
Median	20,4	1,7	6,2	2,2	7,4	6,8
Anzahl	96	96	95	75	75	100

Im Mittel für Niedersachsen ergibt sich bei einem mittleren Stickstoffeintrag von 22 kg je ha und Jahr abzüglich der Denitrifikation, der Bestandesaufnahme und des Nitrataustrags mit dem Sickerwasser im Mittel eine positive Bilanz von 6,3 kg Stickstoff je ha und Jahr. Dieser Wert stimmt in seiner Größenordnung gut mit der mittleren Vorratsdifferenz zwischen der BZE I und BZE II an Stickstoff im Auflagehumus und Boden überein. Bei Berücksichtigung von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe ergab sich aus den Stickstoff-Gesamtvorräten im Boden eine Differenz zwischen BZE I und BZE II von rund 8 kg Stickstoff je ha und Jahr. Beide Werte bewegen sich in einer vergleichbaren Größenordnung zu dem von DE

VRIES et al. (2006) für 121 europäische Intensivmonitoringflächen ermittelten Wert von 4,7 kg je ha und Jahr. Bei allen Unsicherheiten bei der Ermittlung von Stoffbilanzen (AHRENDTS et al. 2017) und der Wiederholungsinventuren (KRAVCHENKO u. ROBERTSON 2011, SCHRUMPF et al. 2011) sprechen die vergleichbaren Größenordnungen für beide Ansätze. Demnach sind die Wälder Niedersachsens mit einem mittleren Stickstoffaustrag von 8 kg je ha und Jahr zwar stickstoffgesättigt auf niedrigem Niveau nach BLOCK et al. (2000), doch sowohl die Bilanz als auch die mittlere Vorratsdifferenz sind positiv, die Wälder speichern also im Mittel einen Teil des eingetragenen Stickstoffs im Waldboden.

8 Waldernährung

Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Ulrike Talkner, Jan Evers, Uwe Paar

8.1 Einleitung

Waldbäume verfügen über Anpassungsmechanismen, die es ihnen ermöglichen, innerhalb von genetisch bestimmten Grenzen auf Umweltveränderungen zu reagieren, um über Jahrzehnte bis Jahrhunderte an einem Standort existieren zu können. Hierzu gehören auch bauminterne Regulationsstrategien, wie z. B. die Aufrechterhaltung der Photosyntheseleistung durch die bevorzugte Versorgung der Nadeln und Blätter mit Nährelementen. In den Waldböden werden durch Verwitterung und Mineralisierung ständig Nährstoffe freigesetzt. Außerdem werden Stoffe über die Luft in die Waldökosysteme eingetragen. Von den Waldbäumen werden die Nährelemente in Abhängigkeit von der Nährstoffverfügbarkeit aufgenommen, wobei die Bäume die Elementaufnahme selektiv steuern, indem einige Elemente bevorzugt aufgenommen und andere diskriminiert werden (MARSCHNER 1995). Daher kann sich die Elementkonzentration in der Pflanze von der Konzentration in der Bodenlösung unterscheiden. Die Nährstoffgehalte in Nadeln und Blättern sind das Ergebnis dynamischer Wechselwirkungen zwischen der Verfügbarkeit der Nährstoffe und deren Aufnahme, Transport und Allokation im Baum (KAHLE 2012, MARSCHNER 1995, HEINZE u. FIEDLER 1992).

Aufgrund des Bestrebens der Bäume, die Nadeln und Blätter möglichst optimal mit Nährstoffen zu versorgen, sind die Elementgehalte und -verhältnisse sensible Indikatoren für die Versorgung der Pflanzen. Ausreichend hohe Nährstoffgehalte und deren harmonische Zusammensetzung sind die Basis für gesundes Wachstum und die Widerstandsfähigkeit der Waldbäume gegen biotische und abiotische Risiken (FLÜCKIGER u. BRAUN 2003).

Pflanzen benötigen die sogenannten Makronährelemente, zu denen Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S) gehören, in relativ großen Mengen. Die sogenannten Mikronährelemente Eisen (Fe), Mangan (Mn), Zink (Zn) u. a. sind nur in sehr viel geringeren Mengen in der Pflanze enthalten (HEINZE u. FIEDLER 1992). Die Nährelemente sind wichtig, um die Pflanzenstruktur und die Funktionen von Enzymen, Nukleinsäuren sowie Membranen aufrechtzuerhalten und u. a. Photosynthese, Ionenbilanz, Osmose und Wachstum der Bäume gewährleisten zu können. Übersichten zur Aufnahme- und Bindungsform sowie zu der Bedeutung und den Funktionen von einzelnen Nährstoffen in der Pflanze zeigen u. a. HEINZE u. FIEDLER (1992), SCHULZE et al. (2002) und MARSCHNER (1995). Zu den im Phloem beweglichen Stoffen gehören Kalium, Magnesium, Phosphor und Schwefel, wenig beweglich sind Eisen, Mangan und Zink. Zu den unbeweglichen Stoffen wird Calcium gerechnet (HEINZE u. FIEDLER 1992).

Calcium kann von den Orten, zu denen es über das Xylem transportiert wurde, nicht wieder mobilisiert werden und reichert sich an.

Umfangreiche Blatt- und Nadelanalysen für Waldbäume stammen aus Düngungsversuchen in den 1960er-Jahren (HUNGER u. FIEDLER 1965, HEINSDORF 1966/67, HEINSDORF 1968). Damals konzentrierte sich die Forschung darauf, über Düngungsversuche die Möglichkeiten der Wachstumssteigerung auf verschiedenen Standorten zu erfassen (HEINSDORF u. BRANSE 2002). Heute gehören waldernährungskundliche Daten zu den Bewertungselementen für umweltpolitische Fragestellungen wie die Erfolgskontrolle von Luftreinhaltmaßnahmen, die Beobachtung der Bodenversauerung und Eutrophierung sowie der Nährstoffverfügbarkeit unter dem Einfluss des Klimawandels. Außerdem können sie wichtige Entscheidungsgrundlagen für die Kalkungs- und Vollbaumnutzungsplanung liefern.

Die flächenrepräsentativen Ergebnisse der BZE zur Blatt- und Nadelanalyse geben einen Überblick über die Nährstoffversorgung der Baumarten Kiefer, Fichte, Buche und Eiche in Niedersachsen (inkl. Bremen). Für die einzelnen Baumarten werden die Elementgehalte und Elementquotienten insgesamt sowie gegliedert nach den jeweils am häufigsten vertretenen Substratgruppen, für Waldregionen und im Kalkungsvergleich dargestellt. Zeitliche Trends wurden aus dem Intensiven Monitoring (Erhebungen im ein- bzw. zweijährigen Turnus) abgeleitet, um die Ergebnisse der Einzelerhebungen (BZE) einordnen zu können. Für die Fichte ergänzen Daten aus der Immissionsökologischen Waldzustandserhebung (IWE) mit Beprobungen in den Wintern 1983/1984 und 1984/1985 die Ergebnisse der BZE.

8.2 Material und Methoden

Für die Hauptbaumarten Kiefer, Fichte, Buche und Eiche sind an den BZE-Punkten in Niedersachsen bisher drei landesweite waldernährungskundliche Inventuren durchgeführt worden (s. Tab. 19). Für die Fichte sind es mit der Immissionsökologischen Waldzustandserhebung (IWE) vier landesweite Erhebungen. Die Außenaufnahmen der BZE I fanden 1990/1991 im Raster 8 x 12 und 8 x 4 km statt. Es wurden insgesamt 139 BZE I-Punkte mit Kiefer, Fichte, Buche und Eiche (im Alter über 40 Jahre) waldernährungskundlich untersucht. Für die Inventur 1996 wurden die Stichprobenbäume der BZE I erneut beprobt. Ergänzt um unter 40-jährige Bestände der vier Hauptbaumarten, umfasste die Beprobung 186 BZE-Punkte. Bei der BZE II wurden zusätzlich zum 8 x 8 km-Raster auch die Stichprobenbäume der BZE I und der Inventur 1996 einbezogen, soweit die Probebäume noch vorhanden waren und den Auswahlkriterien der Arbeitsanleitung zur Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (WELLBROCK et al. 2006) entsprachen (227 Punkte).

Tabelle 19: Landesweite Inventuren zur Blatt- und Nadelanalyse in Niedersachsen. Anzahl der Erhebungspunkte insgesamt sowie je Baumart (nur Hauptbaumarten Kiefer, Fichte, Buche, Eiche).

Inventur	Probenahmejahr	Anzahl der Erhebungspunkte	Anzahl der Erhebungspunkte je Baumart			
			Kiefer	Fichte	Buche	Eiche
IWE*	1983/84, 1984/85	46	-	46	-	-
BZE I	1990/ 1991	139	53	29	46	18
Inventur 1996	1996	186	80	43	51	22
BZE II 8 x 8 km-Raster	2007	162+65	82+25	52+11	44+25	28+10
+ BZE I-Punkte, die nicht zum BZE II-Raster gehören		227	107	63	69	38

* Immissionsökologische Waldzustandserhebung

Die grundsätzliche methodische Vorgehensweise ist im Kapitel 5.3.2 (Blatt- und Nadelernährung) beschrieben, die Behandlung der Proben und die Analysemethoden sind in Kapitel 11 (Qualitätssicherung) dargelegt. An 162 BZE II-Punkten sowie 65 BZE I-Punkten in Niedersachsen (inkl. Bremen) wurden im Jahr 2007 Nadeln und Blätter von je drei Probestämmen je Baumart als Mischprobe chemisch analysiert. Da an vielen Erhebungspunkten mehrere Baumarten vorkommen, sind insgesamt 277 Beprobungen von je drei Probestämmen erfolgt. Die Angaben zu den Elementgehalten (mg/g) beziehen sich auf die getrocknete Blatt- bzw. Nadelmasse (Trockensubstanz = TS).

Für die Bewertung der Elementgehalte wurden die Grenzwerte (Median) nach GÖTTLEIN (2015) genutzt (s. Tab. 20). GÖTTLEIN (2015) führte die gängigen ernährungskundlichen Bewertungssysteme zusammen und ermittelte hieraus für die Hauptbaumarten zu den einzelnen Nährelementen das 25 %-Perzentil, den Median und das 75 %-Perzentil jeweils für die Symptomgrenze sowie die untere und obere Grenze der normalen Ernährung. Der errechnete Median teilt die in der Literatur angegebenen Werte in zwei Hälften. Er gibt damit den „wahrscheinlichsten“ Grenzwert für die einzelnen Bewertungsbereiche aus den verwendeten Bewertungssystemen an. Die Symptomgrenze markiert den Grenzwert, unterhalb dessen sichtbare Mangelsymptome auftreten. Der Bereich zwischen der Symptomgrenze und der Untergrenze des Normalbereichs repräsentiert den Bereich latenten Mangels. Elementgehalte über dem Normalbereich weisen auf eine Überversorgung hin.

Tabelle 20: Grenzwerte (Median) für die Bewertung von Elementgehalten [mg/g] in Blättern und Nadeln (1. Nadeljahrgang) von Buche, Fichte, Kiefer und Eiche (GÖTTLEIN 2015)

Baumart/ Bewertungsbereich	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn
Buche									
OG Normalbereich	25,00	1,70	9,35	8,55	1,50	2,25	0,250	2,000	0,050
UG Normalbereich	19,00	1,20	6,00	5,00	1,00	1,50	0,060	0,060	0,020
Symptomgrenze	16,65	0,95	4,75	4,00	0,70	1,35	0,035	0,050	-
Fichte									
OG Normalbereich	17,00	2,00	7,65	5,30	1,40	1,60	0,190	2,000	0,060
UG Normalbereich	13,10	1,30	4,50	2,00	0,80	1,00	0,042	0,050	0,020
Symptomgrenze	11,70	1,05	3,50	1,00	0,60	0,80	0,021	0,020	0,012
Kiefer									
OG Normalbereich	17,00	2,00	7,50	4,00	1,40	1,60	0,200	0,800	0,070
UG Normalbereich	14,05	1,30	4,40	2,00	0,80	1,00	0,040	0,040	0,020
Symptomgrenze	12,60	1,00	3,50	1,00	0,60	0,95	0,030	0,010	0,010
Eiche									
OG Normalbereich	26,00	2,00	10,00	8,00	2,60	2,30	0,200	1,270	0,050
UG Normalbereich	20,00	1,35	6,10	5,00	1,20	1,20	0,070	0,066	0,015
Symptomgrenze	16,70	0,90	3,60	3,00	0,90	1,00	0,050	-	-

OG = Obergrenze, UG = Untergrenze

Es wurden primär die Elementgehalte des jüngsten Nadeljahrganges (1. Nadeljahrgang) betrachtet, weil dieser die aktuelle Versorgungslage am besten repräsentiert. Bei Buche und Eiche wurden die voll ausgereiften Blätter (ohne Regenerationstriebe) verwendet.

Als zusätzliches Bewertungskriterium wurden für die Fichte die Magnesiumgehalte des 3. Nadeljahrganges im Verhältnis zum jüngsten Nadeljahrgang einbezogen. Bei der gemeinsamen Betrachtung der Gehalte in verschiedenen Nadeljahrgängen wird ein starker Abfall von Gehalten in den älteren Nadeln gegenüber den jüngsten Nadeln als Hinweis auf einen Versorgungsengpass gewertet (REEMTSMa 1986).

Die Bewertung der Elementverhältnisse wurde für alle vier Baumarten nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012) und für Buche und Fichte zusätzlich nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) vorgenommen (s. Tab. 21). Bei Unterschieden zwischen den Referenzwerten wurde der strengere Wert für die Beurteilung der Stickstoffquotienten verwendet.

Tabelle 21: Grenzwerte harmonischer Elementverhältnisse für Buche, Fichte, Kiefer und Eiche nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Baumart	Elementverhältnis	FLÜCKIGER u. BRAUN (2003)	MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)
Buche	N/P	10,0-17,1	10,0-18,9
	N/K	2,1-3,8	1,9-3,8
	N/Ca	-	1,3-3,5
	N/Mg	10,4-21,5	8,2-21,7
Fichte	N/P	7,0-12,0	6,3-11,7
	N/K	1,9-3,6	1,7-3,3
	N/Ca	-	2,1-5,0
	N/Mg	10,3-20,0	10,7-21,0
Kiefer	N/P	-	7,4-14,1
	N/K	-	2,0-4,0
	N/Ca	-	3,6-9,1
	N/Mg	-	10,8-22,9
Eiche	N/P	-	9,3-19,6
	N/K	-	1,7-3,7
	N/Ca	-	1,9-5,0
	N/Mg	-	8,1-21,8

Um die Ernährungssituation möglichst differenziert nach Bodeneigenschaften ableiten zu können, wurden die BZE II-Stichprobenpunkte in Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt nach 16 Substratgruppen klassifiziert (s. Kap. 6.2.1), von denen 14 in der walderährungskundlichen Stichprobe in Niedersachsen vorkommen (s. Tab. 22). Die Eingruppierung der BZE-Punkte erfolgte nach Ausgangssubstrat, Lagerung, Bodenart, Bodenmorphologie sowie bodenchemischen und – physikalischen Parametern (EVERS et al. 2013b). Entsprechend ihrer ökologischen Ansprüche und den waldbaulichen Entscheidungen der Landesbetriebe bzw. der Waldeigentümer sind die Baumarten in den Substratgruppen unterschiedlich stark vertreten. Die Darstellung der Ernährungssituation erfolgte nach Baumarten getrennt für die ausgeschiedenen Substratgruppen, soweit mindestens drei BZE-Punkte in der jeweiligen Substratgruppe vorkamen.

Zur Darstellung der regionalen ernährungskundlichen Ergebnisse wurden die BZE-Punkte den drei Waldregionen „Westniedersächsisches Tiefland“, „Ostniedersächsisches Tiefland“ und „Niedersächsisches Bergland“ zugordnet (nach ML 2014).

Tabelle 22: Übersicht über die Verteilung der BZE-Punkte mit Blatt- und Nadelanalysen 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) auf Baumarten und Substratgruppen, getrennt in gekalkte (j) und ungekalkte (n) BZE-Punkte sowie unklar (u) und entfällt (e, nicht zur Kalkung vorgesehen)

Substratgruppe	Abk.	Kiefer (n = 107)				Fichte (n = 63)			
		j	n	u	e	j	n	u	e
Basalt/Diabas	BaD	-	-	-	-	-	-	-	-
Buntsandstein	BS	-	-	-	-	6	-	-	-
Granit	Grt	-	-	-	-	1	-	-	-
Grauwacke	Grw	-	-	-	-	6	-	-	-
Kalkstein	Kal	-	-	-	-	-	-	-	4
Kreidesandstein	KSSs	-	-	-	-	2	-	-	-
Lehm	Leh	3	-	-	-	1	2	-	-
Lösslehm	Loe	2	-	-	-	5	1	-	-
organisch gepr. Standorte	Org	-	-	-	10	-	-	-	7
Ton(stein)	Ton	-	-	-	-	-	1	-	-
Tonschiefer	ToS	-	-	-	-	5	1	-	-
unverlehmte Sande	Suv	32	33	-	-	7	5	-	-
schwach verlehmte Sande	Ssv	15	11	-	-	4	4	-	-
verlehmte Sande	Sve	-	1	-	-	1	-	-	-
gesamt		52	45	-	10	38	14	-	11

Substratgruppe	Abk.	Buche (n = 69)				Eiche (n = 38)			
		j	n	u	e	j	n	u	e
Basalt/Diabas	BaD	-	-	-	1	-	-	-	-
Buntsandstein	BS	10	1	-	-	-	-	-	-
Granit	Grt	-	-	-	-	-	-	-	-
Grauwacke	Grw	3	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	Kal	-	-	-	16	-	-	-	2
Kreidesandstein	KSSs	-	-	-	-	-	-	-	-
Lehm	Leh	2	2	-	-	3	4	-	-
Lösslehm	Loe	13	2	-	-	5	3	-	-
organisch gepr. Standorte	Org	-	-	-	-	-	-	-	2
Ton(stein)	Ton	3	3	-	-	3	1	-	-
Tonschiefer	ToS	1	-	-	-	-	-	-	-
unverlehmte Sande	Suv	3	-	1	-	3	5	2	-
schwach verlehmte Sande	Ssv	3	3	-	-	3	2	-	-
verlehmte Sande	Sve	1	1	-	-	-	-	-	-
gesamt		39	12	1	17	17	15	2	4

Beim Vergleich von gekalkten und ungekalkten BZE-Stichprobenpunkten (Kalkungsvergleich) werden ausschließlich die für eine Kalkung vorgesehenen Substratgruppen betrachtet (Kalkungskulisse). In Niedersachsen sind die Substratgruppen Basalt/Diabas, Kalkstein und organisch geprägte Standorte von der Kalkung ausgeschlossen (NW-FVA 2010). Zur Kalkungskulisse in Niedersachsen (inkl. Bremen) gehören 189 der 227 Stichprobenpunkte der walddernährungskundlichen Erhebung 2007. Davon sind an 117 Punkten eine oder mehrere Kalkungen dokumentiert, 70 Punkte waren zum Zeitpunkt der Beprobung ungekalkt, an 2 Punkten konnte nicht geklärt werden, ob Kalkungsmaßnahmen stattgefunden haben. Im niedersächsischen Tiefland ist bei der Bodenschutzkalkung zusätzlich zu den magnesiumhaltigen Carbonatgesteinsmehlen – in einem hier nicht quantifizierbaren Umfang – die Zugabe von Phosphor erfolgt. Dieser Einfluss auf die Blatt- und Nadelgehalte an den gekalkten BZE-Punkten lässt sich hier nicht klar beziffern, da die Phosphorzugabe nicht eindeutig dokumentiert wurde. Die statistische Auswertung des Kalkungsvergleichs erfolgte mit dem Wilcoxon-Rangsummentest.

Für die Ermittlung zeitlicher Trends wurden die Elementgehalte in Nadeln und Blättern von Intensivmonitoringflächen (s. Tab. 23) für den Zeitraum 1994-2007 (Fichte, Kiefer) bzw. 1995-2008 (Buche, Eiche) berücksichtigt. Für die einzelnen Nährelemente wurde der Median für den Untersuchungszeitraum ermittelt. Für die statistische Analyse der zeitlichen Trends wurde ein gemischtes lineares Modell gewählt (PINHEIRO u. BATES 2000). Die zeitliche Variable „Jahr“ ging als fester Effekt in das Modell ein, die räumliche Variable „Fläche“ als zufälliger Effekt. Es wurden zwei Modellvarianten verglichen: In der einen Variante wurde nur das Niveau der Elementgehalte für die Flächen geschätzt, in der anderen zusätzlich zum absoluten Niveau auch das lineare Glied des Zeiteinflusses. Die Modellkomponenten wurden mit der ML (Maximum Likelihood)-Methode geschätzt. Die Modellvariante mit dem kleineren AIC (Akaike's Information Criterion) wurde zur Beurteilung der Trends ausgewählt. Zur Berechnung wurde das Statistikprogramm R (Version 2.9.1) mit der Library „nlme“ verwendet (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2009).

Für die statistische Auswertung der Unterschiede zwischen den Inventurzeitpunkten wurde der simultane Tukey-Test verwendet.

Tabelle 23: *Flächen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen für die Ermittlung zeitlicher Trends der Elementgehalte in Nadeln und Blättern im Zeitraum 1994-2007 (Kiefer, Fichte) bzw. 1995-2008 (Buche, Eiche)*

Fläche	BA	Substratgruppe	K	Waldregion
Augustendorf	Ki	unverlehmte Sande	j ¹	Westniedersächsisches Tiefland
Ehrhorn	Ki	schwach verlehmte Sande	j ²	Ostniedersächsisches Tiefland
Fuhrberg	Ki	unverlehmte Sande	n	Ostniedersächsisches Tiefland
Luess	Bu, Ei	schwach verlehmte Sande	n	Ostniedersächsisches Tiefland
Solling B1	Bu	Buntsandstein	n	Niedersächsisches Bergland
Solling BD	Bu	Buntsandstein	j ³	Niedersächsisches Bergland
Solling BK	Bu	Buntsandstein	j ⁴	Niedersächsisches Bergland
Solling BN	Bu	Buntsandstein	n ⁵	Niedersächsisches Bergland
Göttinger Wald	Bu	Kalkstein	e	Niedersächsisches Bergland
Harste	Bu	Kalkstein	e	Niedersächsisches Bergland
Solling F1	Fi	Buntsandstein	n	Niedersächsisches Bergland
Solling FD	Fi	Buntsandstein	j ³	Niedersächsisches Bergland
Hilskamm, Altfichte	Fi	Kreidesandstein	n	Niedersächsisches Bergland
Hilsmulde, Altfichte	Fi	Kreidesandstein	n	Niedersächsisches Bergland
Hilsmulde, Jungfichte	Fi	Kreidesandstein	n	Niedersächsisches Bergland
Lange Bramke, Kamm	Fi	Quarzit	n ⁶	Niedersächsisches Bergland
Lange Bramke, Nordhang	Fi	Quarzit	n	Niedersächsisches Bergland
Lange Bramke, Südhang	Fi	Grauwacke	n	Niedersächsisches Bergland
Spanbeck	Fi	Buntsandstein (tonig)	n	Niedersächsisches Bergland
Wingst	Fi	schwach verlehmte Sande	n	Westniedersächsisches Tiefland
Ehrhorn	Ei	schwach verlehmte Sande	n	Ostniedersächsisches Tiefland
Drömling	Ei	organisch. gepr. Standorte	e	Ostniedersächsisches Tiefland
Göhrde	Ei	schwach verlehmte Sande	n	Ostniedersächsisches Tiefland
Herrenholz	Ei	Lehm	j ⁷	Westniedersächsisches Tiefland
Ihlow	Ei, Bu	unverlehmte Sande	j ⁸	Westniedersächsisches Tiefland

BA = Baumart; K = Kalkung; j = ja, n = nein, e = entfällt;

¹ Kalkung vor 1990: 3 t/ha

² Kalkung vor 1990: Menge unbekannt

³ Kalkung 1975: 4,4 t/ha, 1980: 4 t/ha

⁴ Kalkung 1982: 30 t/ha

⁵ 1982-1993: jährlich 140 kg/ha Stickstoff als Ammoniumsulfat

⁶ ca 1995: evtl. leichter Kalkungseinfluss durch Abdrift bei Hubschrauberalkung

⁷ Kalkung 1987: 3 t/ha

⁸ Kalkung vor 1993: 3 t/ha

Zusätzlich zu den Ergebnissen zur Nährstoffversorgung von Kiefer, Fichte, Buche und Eiche in Niedersachsen (inkl. Bremen) werden die gemeinsamen Mittelwerte für Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt (Drei-Länder-Mittelwert) des 8 x 8 km-Rasters der BZE II dargestellt. Der Drei-Länder-Mittelwert errechnete sich aus den Mittelwerten der Länder. Die Anzahl der analysierten Mischproben pro Baumart in den Ländern zeigt Tabelle 24.

Tabelle 24: Übersicht der walderährungskundlich beprobten BZE II-Punkte in Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt für Kiefer, Fichte, Buche und Eiche (8 x 8 km-Raster)

Land	Kiefer	Fichte	Buche	Eiche
Niedersachsen (inkl. Bremen)	82	52	44	28
Hessen	47	67	80	44
Sachsen-Anhalt	44	10	11	13
insgesamt	173	129	135	85

8.3 Ergebnisse

8.3.1 Kiefer

8.3.1.1 Ernährungsstatus 2007

Die Kiefer ist mit einem Anteil von 29 % der Waldfläche die häufigste Baumart in Niedersachsen (ML 2014). In der BZE-Stichprobe ist sie vor allem in den Substratgruppen unverlehmte Sande (n = 65) und schwach verlehmte Sande (n = 26) vertreten (s. Abb. 129 und 130). Der Vollständigkeit halber sind in den Abbildungen auch die Kiefern auf organisch geprägten Standorten dargestellt. Da es sich hierbei um Sonderstandorte für die Kiefer handelt, bleiben sie von der Gesamtbetrachtung der Kiefernernährung (s. Tab. 25) ausgenommen.

Die Nadelanalysen 2007 zeigen für die Kiefer an allen beprobten Kiefern-punkten mindestens Stickstoffgehalte im Normalbereich. 83 % der Kiefernadelgehalte liegen oberhalb des Normalbereichs (Luxusernährung). Eine Differenzierung zwischen den Substratgruppen besteht nicht (s. Abb. 129).

Die Versorgung der Kiefer mit Phosphor, Kalium und Calcium ist insgesamt und für die Substratgruppen gut (Normalbereich). Die Stickstoffquotienten zeigen überwiegend ausgeglichene Verhältnisse an (s. Abb. 130). Auf den organisch geprägten Standorten befinden sich die Phosphorgehalte jedoch überwiegend im latenten Mangelbereich und der N/P-Quotient außerhalb des Bereichs harmonischer Elementverhältnisse.

Auch die Schwefel-, Eisen-, Mangan- und Zinkgehalte der Kiefernadeln liegen meist im Normalbereich. Kiefern auf organisch geprägten Standorten weisen vergleichsweise niedrige Schwefel- und Eisengehalte auf. Die Zinkgehalte der Kiefernadeln auf diesen Standorten sind hingegen höher als in den anderen Substratgruppen.

Ernährungsdefizite zeigen sich für die Magnesiumgehalte der Kiefer. Für 30 % der Nadelproben wird (latenter) Mangel festgestellt und 31 % der Kiefernadelproben weisen unharmonische N/Mg-Quotienten auf (s. Tab. 25, ohne organisch geprägte Standorte). Bei der Kiefer auf unverlehmtem Sand ist die Spanne der Magnesiumgehalte besonders groß. Sowohl der höchste als auch der niedrigste gemessene Wert im BZE-Kiefernkollektiv gehört zu dieser Substratgruppe.

Ein besonders deutlicher Unterschied zum Drei-Länder-Mittelwert tritt für die Kiefern an den BZE-Punkten in Niedersachsen bei den Mangangehalten auf. In Niedersachsen sind sie nur halb so hoch wie der Mittelwert für Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt insgesamt.

Für die waldbaulich bedeutsamsten Kiefernstandorte auf verlehmttem und unverlehmttem Sand liegen die Mediane der Nährelementgehalte und der Stickstoffquotienten mindestens im Normalbereich. Phosphordefizite treten beim schwach verlehmtten Sand etwas häufiger auf als beim unverlehmtten Sand.

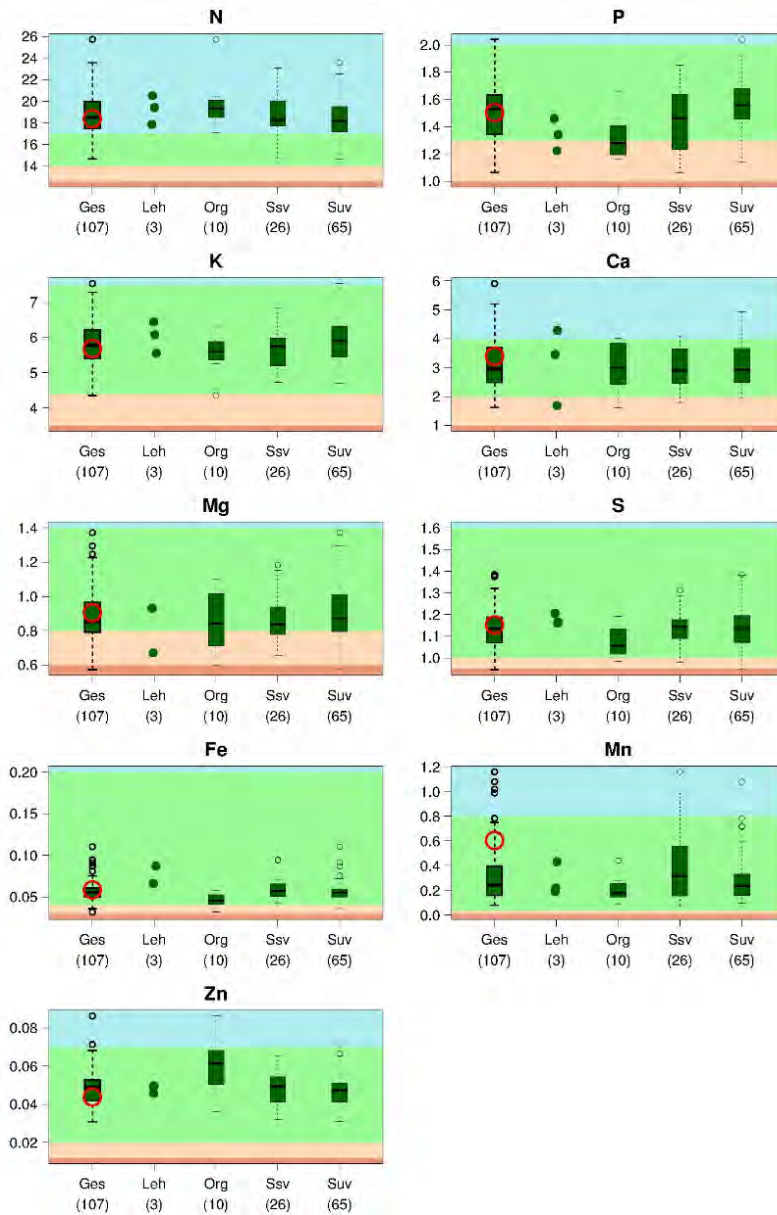


Abbildung 129: Elementgehalte [mg/g] in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) 2007. Verteilung für die Kiefer in Niedersachsen (inkl. Bremen) insgesamt ($n = 107$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$; Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn $n = 3$. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 22, S. 266.

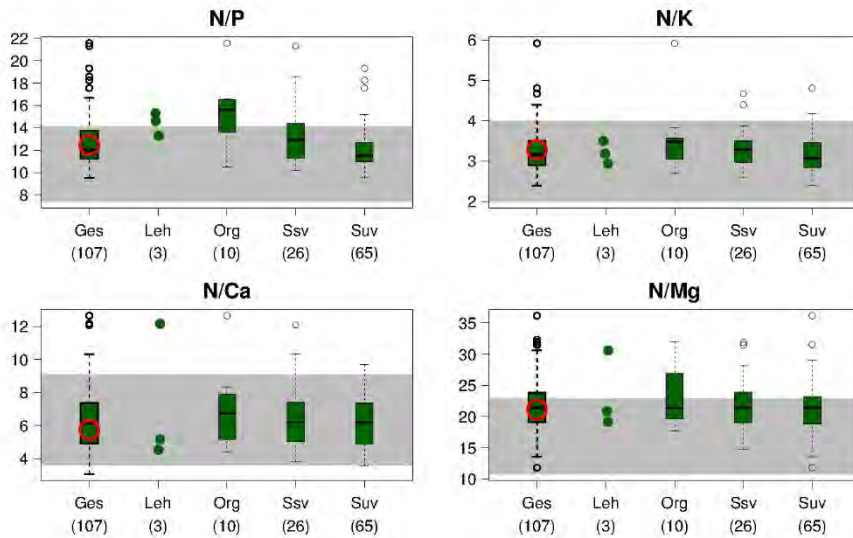


Abbildung 130: Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) 2007. Verteilung für die Kiefer in Niedersachsen (inkl. Bremen) insgesamt ($n = 107$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$; Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn $n = 3$. Bewertung nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 22, S. 266.

Ohne (latenten) Mangel an Hauptnährelementen (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel) und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten werden 2007 47 % der BZE-Kiefernpunkte (ohne organisch geprägte Standorte) eingestuft. Latenter Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten werden an etwa der Hälfte (51 %) der Kiefernpunkte vorgefunden. An zwei Kiefernpunkten unterschreiten die Magnesium- bzw. Schwefelgehalte in den Kiefernadeln die Symptomgrenze (= Mangel).

Tabelle 25: Zuordnung [Anteil in %] von 97 BZE-Kiefernpunkten 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) (ohne organisch geprägte Standorte) nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomgrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	100
P	-	15	85
K	-	-	100
Ca	-	8	92
Mg	1	29	70
S	1	4	95
Fe	-	2	98
Mn	-	-	100
Zn	-	-	100
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	81		
N/K	93		
N/Ca	88		
N/Mg	69		

8.3.1.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

Die BZE-Kiefernpunkte liegen fast alle im Tiefland Niedersachsens (s. Abb. 131), nur zwei Kiefernpunkte in der Westfälischen Bucht sind dem Bergland zuzuordnen. Deutliche Unterschiede der Nährstoffgehalte in den Kiefernadeln zwischen den Waldregionen bestehen 2007 für die Stickstoffernährung. Die Überversorgung mit Stickstoff ist im Westniedersächsischen Tiefland mit Stickstoffgehalten fast ausschließlich im Luxusbereich stärker ausgeprägt als im Ostniedersächsischen Tiefland, wo sich rund ein Viertel der Stickstoffgehalte im Normalbereich befinden. Für die anderen Hauptnährelemente (Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium und Schwefel) sind die regionalen Unterschiede gering.

Die beiden BZE-Punkte mit Mangelernährung liegen im Nordosten (s. Abb. 132).

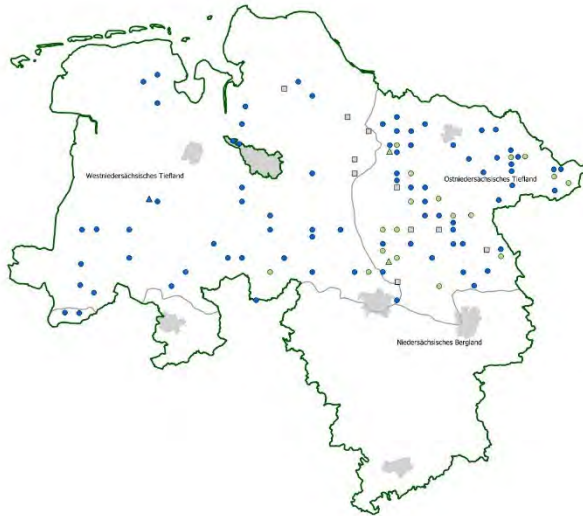


Abbildung 131: Stickstoffgehalte in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich; organisch geprägte Standorte wurden nicht bewertet (graue Quadrate))

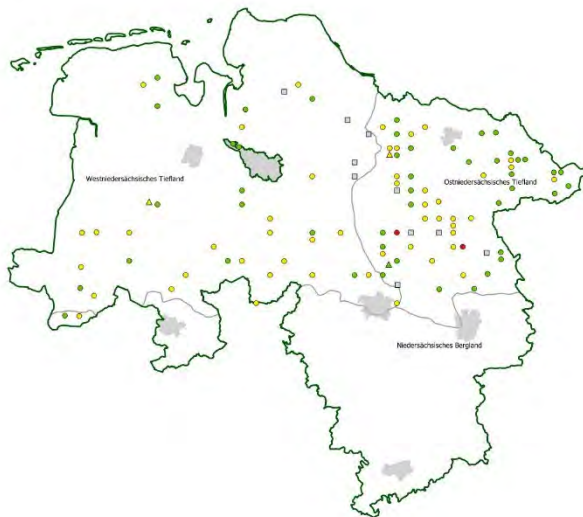


Abbildung 132: Ernährungssituation der Kiefer (1. Nadeljahrgang) in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007); grün: Hauptnährelemente mindestens im Normalbereich und Stickstoffquotienten ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten unausgewogen, rot: Mangelernährung; organisch geprägte Standorte wurden nicht bewertet (graue Quadrate))

8.3.1.3 Kalkungsvergleich 2007

Eindeutige Unterschiede zwischen den Elementgehalten an gekalkten und ungekalkten Kiefernpunkten sind nicht festzustellen (s. Abb. 133). Ein positiver signifikanter Kalkungseffekt zeigt sich beim N/Mg-Verhältnis: Die gekalkten Kiefern befinden sich häufiger im harmonischen Bereich als die ungekalkten Kiefern (s. Abb. 134 u. Tab. 26).

Für die Substratgruppe unverlehmte Sande (ohne Abbildung) sind auch die höheren Magnesiumgehalte an den gekalkten gegenüber den ungekalkten BZE-Punkten signifikant.

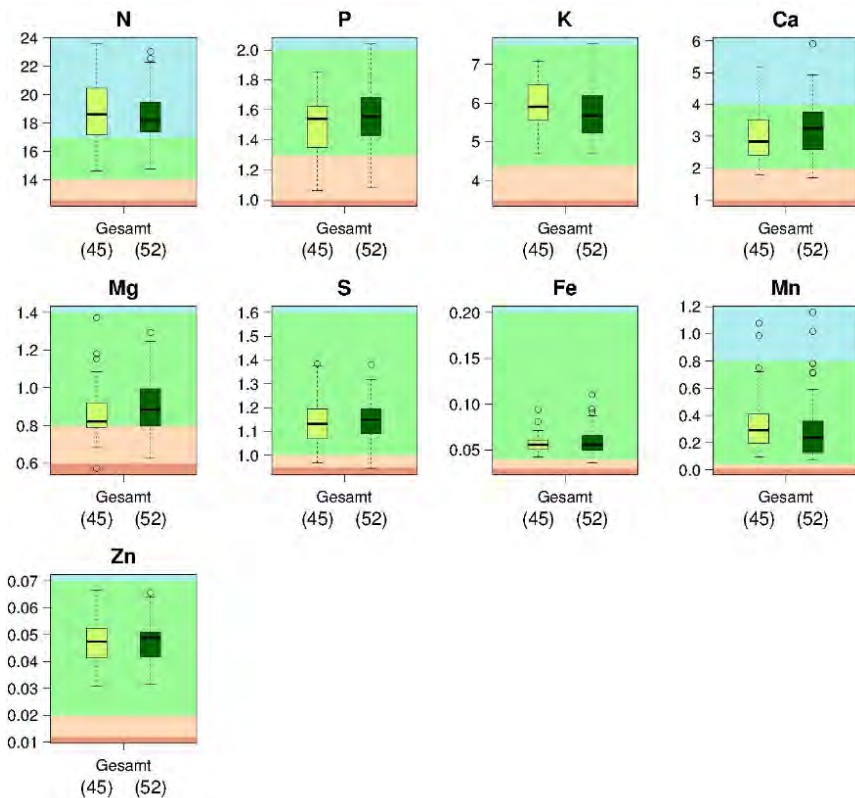


Abbildung 133: Kalkungsvergleich für Kiefer in Niedersachsen (inkl. Bremen). Elementgehalte [mg/g] in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) 2007. Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Kiefern der Kalkungskulisse. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

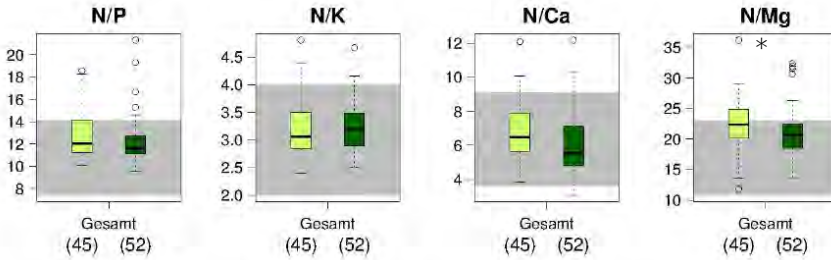


Abbildung 134: Kalkungsvergleich für Kiefer in Niedersachsen (inkl. Bremen). Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) 2007. Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Kiefern der Kalkungskulisse. Bewertung nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Irrtumswahrscheinlichkeit: * $p < 5\%$; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

Tabelle 26: Zuordnung [Anteil in %] der ungekalkten und gekalkten BZE-Kiefernpunkte 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	Anteil [%] an ungekalkten (n = 45) und gekalkten (n = 52) BZE-Punkten mit Kiefer (2007)					
	unter der Symptommgrenze = Mangel		unter Normalbereich = latenter Mangel		im/über Normalbereich	
	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt
N	-	-	-	-	100	100
P	-	-	18	13	82	87
K	-	-	-	-	100	100
Ca	-	-	11	6	89	94
Mg	2	-	33	25	65	75
S	-	2	7	2	93	96
Fe	-	-	-	4	100	96
Mn	-	-	-	-	100	100
Zn	-	-	-	-	100	100
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse					
	ungekalkt			gekalkt		
N/P	73			88		
N/K	89			96		
N/Ca	84			90		
N/Mg	58			77		

In der Gesamtschau (s. Tab. 26) zeigt sich eine bessere und ausgewogenere Ernährungssituation für Kiefern an gekalkten als an ungekalkten BZE-Punkten. Für 58 % der gekalkten Kiefern befinden sich die Hauptnährelementgehalte mindestens im Normalbereich und die Elementverhältnisse sind ausgewogen, an den ungekalkten BZE-Kiefernpunkten ist dies nur bei 33 % der Fall.

8.3.1.4 Zeitliche Veränderungen

Für die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Ernährungssituation der Kiefer stehen drei landesweite Erhebungen (BZE I, Inventur 1996, BZE II) sowie die Ergebnisse von drei Kiefernflächen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen zur Verfügung.

Die Stickstoff-, Phosphor- und Calciumgehalte sind 1990 und 2007 etwa gleich hoch, während 1996 niedrigere Werte gemessen wurden (s. Abb. 135). Die Mediane für Phosphor und Calcium bleiben zu den drei Inventurzeitpunkten im Normalbereich, die Stickstoffgehalte im Luxusbereich. Die N/P- und N/Ca-Quotienten zeigen zu den drei Inventurzeitpunkten harmonische Verhältnisse (s. Abb. 136).

Die Kaliumgehalte in den Kiefernadeln sind seit der BZE I von 5,0 mg/g auf 5,8 mg/g (2007) angestiegen. Das N/K-Verhältnis verbesserte sich von 1990 zu 1996 und bleibt 2007 stabil.

Die Schwefel- und Eisengehalte haben deutlich und die Zinkgehalte leicht abgenommen. Für alle drei Elemente befinden sich die Gehalte aber nach wie vor im Normalbereich.

Für Magnesium und Mangan gibt es zwischen den drei Inventuren keine signifikanten Unterschiede.

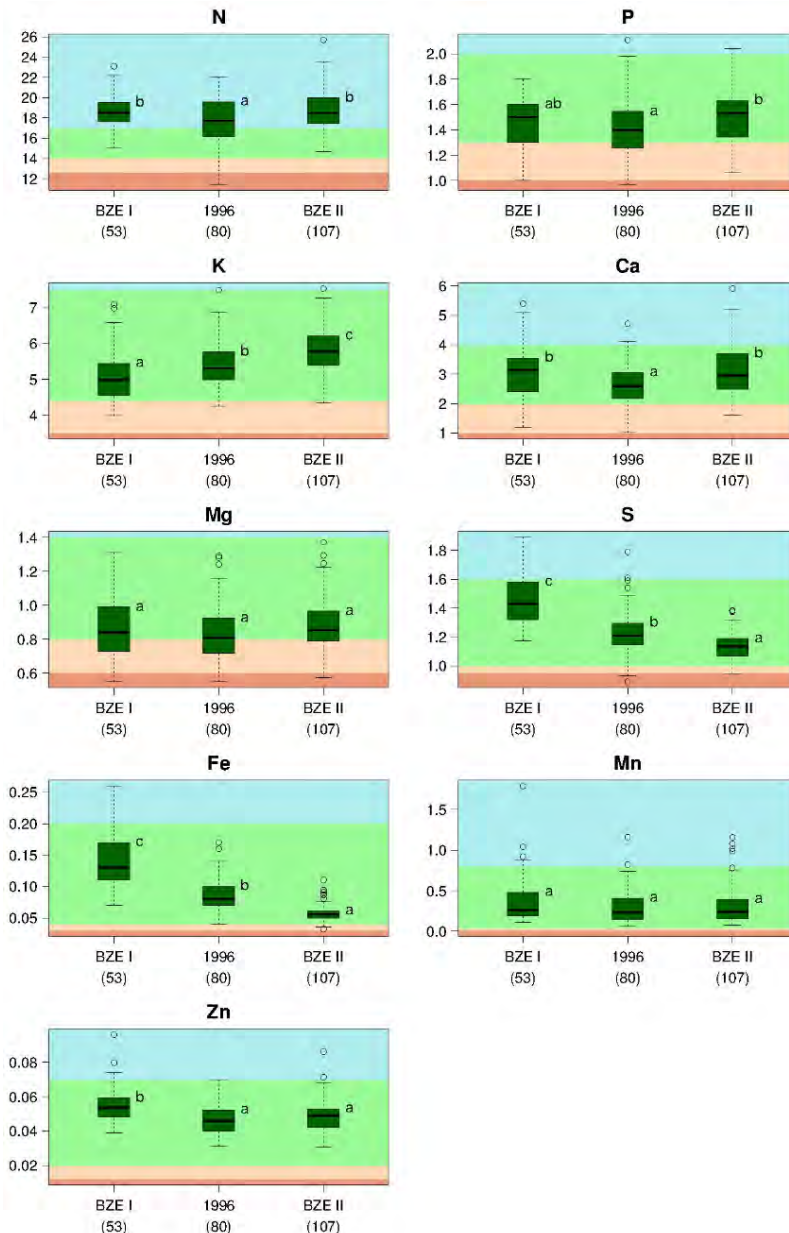


Abbildung 135: Vergleich der Elementgehalte für Kiefern der BZE I, Inventur 1996 und BZE II in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen). Elementgehalte [mg/g] in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

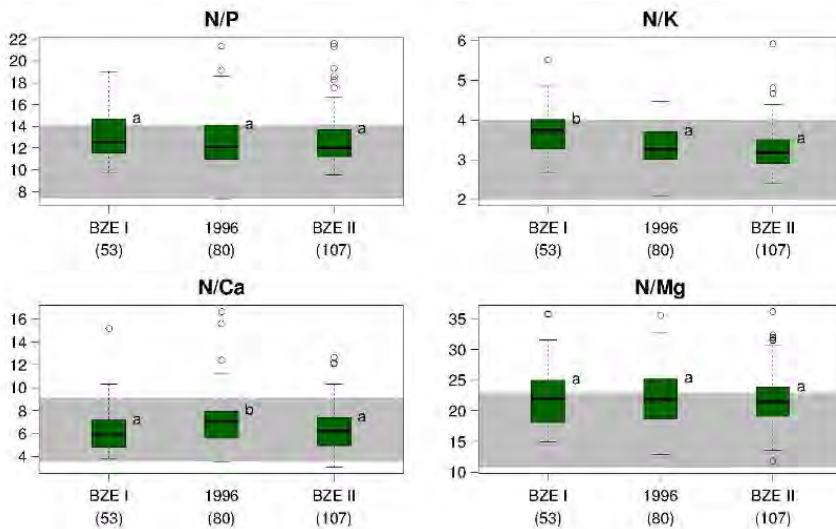


Abbildung 136: Vergleich der Elementverhältnisse für Kiefern der BZE I, Inventur 1996 und BZE II in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen). Elementverhältnisse in Kiefernnadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse mausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

Aus den drei Flächen des Intensiven Monitorings, die im Hauptverbreitungsgebiet der Kiefer im niedersächsischen Tiefland auf den verbreitetsten Substratgruppen (unverlehmte und schwach verlehmte Sande) liegen, ergeben sich keine zeitlichen Trends. Zwei der drei Flächen sind gekalkt. Die langjährigen Mediane der Elementgehalte und der Elementverhältnisse der Intensivflächen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Medianen der Kiefern des BZE-Rasters im Jahr 2007 (s. Tab. 27). Die Erhebung 2007 spiegelt demnach mittlere Verhältnisse für die Ernährung der Kiefer in Niedersachsen wider.

Tabelle 27: Elementgehalte und Elementverhältnisse (Median) in Kiefernadeln in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen) zu drei Inventurzeitpunkten und Elementgehalte und Elementverhältnisse in Kiefernadeln sowie deren Trends auf drei Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007)

Elementgehalt [mg/g]					Trend	
	BZE I 1990/91 n = 53	Inventur 1996 n = 80	BZE II 2007 n = 107	Intensives Monitoring 1994-2007 n = 3		
N	18,5	17,7	18,5	17,9	-	n. s.
P	1,5	1,4	1,53	1,55	-	n. s.
K	5,0	5,3	5,8	5,6	-	n. s.
Ca	3,1	2,6	3,0	2,9	-	n. s.
Mg	0,84	0,81	0,85	0,87	-	n. s.
S	1,4	1,2	1,1	1,1	-	n. s.
Fe	0,13	0,08	0,056	0,067	-	n. s.
Mn	0,26	0,23	0,239	0,187	-	n. s.
Zn	0,054	0,046	0,049	0,053	kein Trend berechnet	
Elementverhältnis [mg/mg]					Trend	
N/P	12,6	12,1	12,0	12,3	-	n. s.
N/K	3,7	3,3	3,2	3,2	-	n. s.
N/Ca	5,9	7,1	6,2	6,0	-	n. s.
N/Mg	21,9	21,8	21,4	19,2	-	n. s.

Trend: n. s. = nicht signifikant.

Blauer Hintergrund: Elementgehalt im Luxusbereich

Hellgrüner Hintergrund: Elementgehalt im Normalbereich bzw. Elementverhältnis im harmonischen Bereich

8.3.2 Fichte

8.3.2.1 Ernährungsstatus 2007

Die Fichte nimmt in Niedersachsen einen Anteil von 17 % der Waldfläche ein (ML 2014). In der BZE-Stichprobe ist sie am häufigsten auf den Sanden (unverlehmte Sande n = 12, schwach verlehmte Sande n = 8) vertreten (s. Abb. 137 und 138). Der Vollständigkeit halber sind in den Abbildungen auch die Fichten auf organisch geprägten Standorten dargestellt. Da es sich hierbei um Sonderstandorte für die Fichte handelt, bleiben die Ergebnisse dieser Substratgruppe bei der Gesamtbetrachtung (s. Tab. 28) unberücksichtigt.

Der Median der Stickstoffgehalte in den Fichtennadeln entspricht 2007 dem oberen Grenzwert des Normalbereichs (17,0 mg/g), d. h. die Hälfte der Fichtenpunkte befindet sich im Luxusbereich. Zwischen den Substratgruppen bestehen leichte Unterschiede. Ausschließlich im Luxusbereich befinden sich die Fichten auf Lehm, ausschließlich im Normalbereich die Fichten auf Tonschiefer.

Die Nadelgehalte an Phosphor, Calcium, Magnesium, Eisen, Mangan und Zink liegen überwiegend im Normalbereich. Fichten auf organisch geprägten Standorten zeigen allerdings häufig (latenten) Phosphormangel. Bei den Calcium- und Magnesiumgehalten sind Unterschiede zwischen den Substratgruppen erkennbar. Die Calciumgehalte (Median) auf Kalkstein sind am höchsten und auf den organisch geprägten Standorten am niedrigsten. Mit Magnesium (Median) sind die Fichten auf Grauwacke am besten versorgt, auf Kalkstein am schlechtesten. Unterschreitungen des Normalbereichs sind für Calcium und Magnesium aber selten, 96 bzw. 95 % der Fichtenproben (ohne organisch geprägte Standorte) befinden sich mindestens im Normalbereich (s. Tab. 28). Die Spanne der Mangangehalte ist sehr weit. Auffällig sind die relativ hohen Mangangehalte der Fichtennadeln auf Buntsandstein. Am niedrigsten sind die Werte auf unverlehmtem Sand. Die Zinkgehalte sind auf Buntsandstein, Lösslehm und den organisch geprägten Standorten am niedrigsten.

Kalium- und Schwefeldefizite sind bei der Fichte häufig. Insgesamt zeigen 36 % der Fichtenproben (latenten) Kaliummangel. An 45 % der Fichtenpunkte tritt nach den hier verwendeten Grenzwerten latenter Schwefelmangel auf (s. Tab. 28). Auf Kalk, Lehm und schwach verlehmtem Sand sind Kaliumdefizite selten, am niedrigsten sind die Kaliumgehalte (Median) auf Grauwacke und Tonschiefer. Auch mit Schwefel sind die Fichten auf Grauwacke- und Tonschiefer-Standorten (neben den organisch geprägten Standorten) am ehesten unterversorgt.

Alle dargestellten Elementgehalte (bis auf Stickstoff) liegen für die Fichten in Niedersachsen (inkl. Bremen) unterhalb der Drei-Länder-Mittelwerte.

Bei den Stickstoffquotienten überschreiten vor allem die Fichten auf organisch geprägten Standorten und auf schwach verlehmtem Sand die Grenzwerte für ein harmonisches N/P-Verhältnis (s. Abb. 138). Unharmonische N/K-Verhältnisse kommen in allen Substratgruppen vor, insgesamt liegen nur 32 % der Fichten (ohne organisch geprägte Standorte) im harmonischen Bereich (s. Tab. 28). Trotz meist normaler Calcium- und Magnesiumgehalte zeigen rund ein Viertel der Fichtennadelproben unharmonische N/Ca- und N/Mg-Verhältnisse. An einigen BZE-Punkten befinden sich die N/Mg-Quotienten unterhalb der harmonischen Bereiche, d. h. sie werden durch hohe Magnesiumgehalte hervorgerufen.

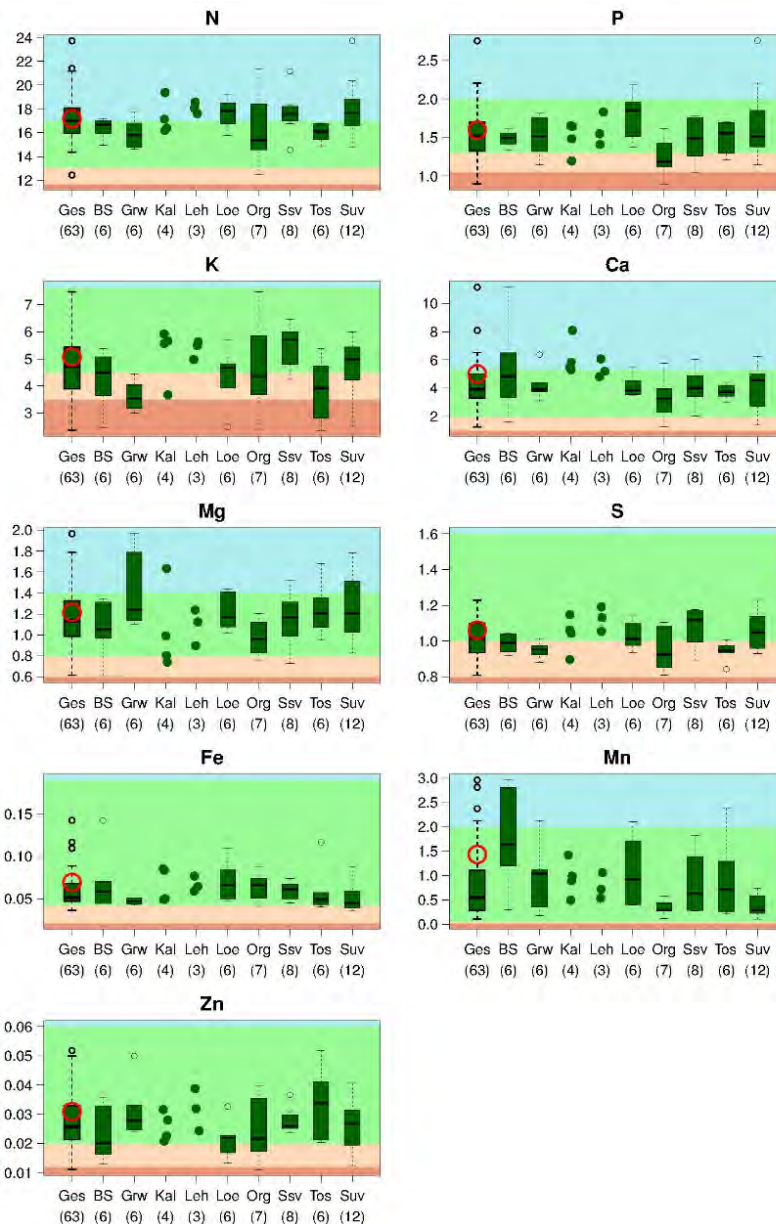


Abbildung 137: Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. Nadeljabrgang) 2007. Verteilung für die Fichte in Niedersachsen (inkl. Bremen) insgesamt ($n = 63$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn $n = 3$ bis 4. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 22, S. 266.

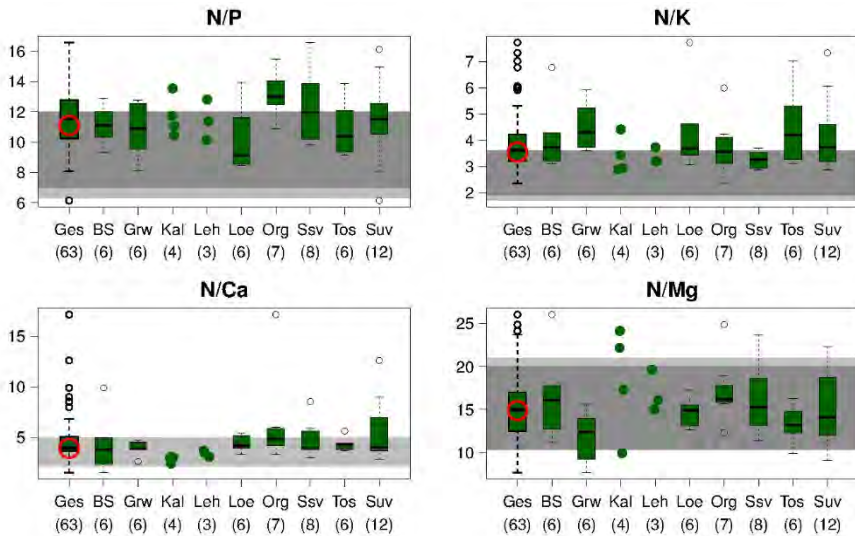


Abbildung 138: Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) 2007. Verteilung für die Fichte in Niedersachsen (inkl. Bremen) insgesamt ($n = 63$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn $n = 3$ bis 4. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 22, S. 266.

Tabelle 28: Zuordnung [Anteil in %] von 56 BZE-Fichtenpunkten 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) (ohne organisch geprägte Standorte) nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomgrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	100
P	2	18	80
K	18	18	64
Ca	-	4	96
Mg	-	5	95
S	-	45	55
Fe	-	12	88
Mn	-	-	100
Zn	-	16	84
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	55		
N/K	32		
N/Ca	73		
N/Mg	77		

Eine überwiegend gute und ausgewogene Ernährungssituation zeigen Fichten auf Kalk und Lehm, die nicht zu den typischen Fichtenstandorten gehören, sowie Fichten auf schwach verlehmttem Sand. In den übrigen Substratgruppen sind (latenter) Kaliummangel und unausgewogene N/K-Quotienten häufig.

Nur an drei Fichtenpunkten der BZE 2007 (5 %) zeigen sich weder (latente) Mangelwerte für die Hauptnährelemente noch unausgewogene Stickstoffquotienten. Ernährungsdefizite gibt es an 75 % der Fichtenpunkte. Vor allem (latenter) Kaliummangel und unharmonische N/K-Quotienten führen zu dieser Einstufung. Latenter Schwefelmangel ist häufig (45 %) anzutreffen, tritt aber im Fichtenkollektiv der BZE nur in Zusammenhang mit anderen Ernährungsdefiziten auf. An 20 % der Punkte wird die Symptomgrenze (= Mangel) für ein Hauptnährelement (meist Kalium) unterschritten.

8.3.2.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

Das Hauptverbreitungsgebiet der Fichte in Niedersachsen liegt im Niedersächsischen Bergland (s. Abb. 139). Regionale Unterschiede für die Ernährung der Fichte mit den Hauptnährelementen bestehen 2007 für Stickstoff, Phosphor, Kalium und Schwefel. Obwohl die Fichte im Westniedersächsischen Tiefland nur mit wenigen BZE-Punkten vertreten ist, lässt sich für die Stickstoffgehalte ein West-Ost-Gradient ablesen. Wie bei der Kiefer sind im Nordwesten die Stickstoffgehalte in den Fichtennadeln höher (Luxusbereich) als im Nordosten und im Bergland. Die Phosphorversorgung ist im Nordwesten am besten (keine Defizite) und im Bergland ist der Anteil an BZE-Fichtenpunkten mit mindestens normalen Phosphorgehalten höher als im Nordosten (s. Abb. 140). (Latenter) Kaliummangel tritt auf den Ton-schiefer- und Grauwackestandorten im Harz gehäuft auf (s. Abb. 141). In den Wuchsregionen des Tieflandes befinden sich die Schwefelgehalte der Fichten zu rund 70 % im Normalbereich, im Bergland herrscht dagegen latenter Schwefelmangel vor (s. Abb. 142).

Die drei BZE-Fichtenpunkte ohne latenten Mangel an Hauptnährelementen und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten verteilen sich auf die drei Waldregionen (s. Abb. 143). Mangelernährung kommt ebenfalls in allen drei Waldregionen vor, verstärkt aber bei der Fichte im Bergland.

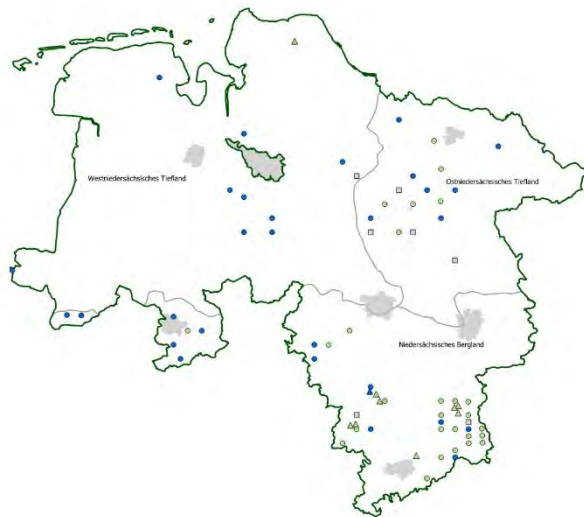


Abbildung 139: Stickstoffgehalte in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Fichtenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich; organisch geprägte Standorte wurden nicht bewertet (graue Quadrate))

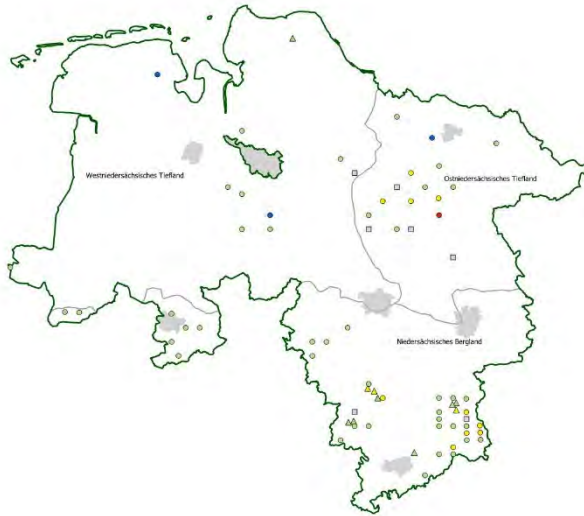


Abbildung 140: Phosphorgehalte in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Fichtenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich, gelb: latenter Mangel, rot: Mangel; organisch geprägte Standorte wurden nicht bewertet (graue Quadrate))

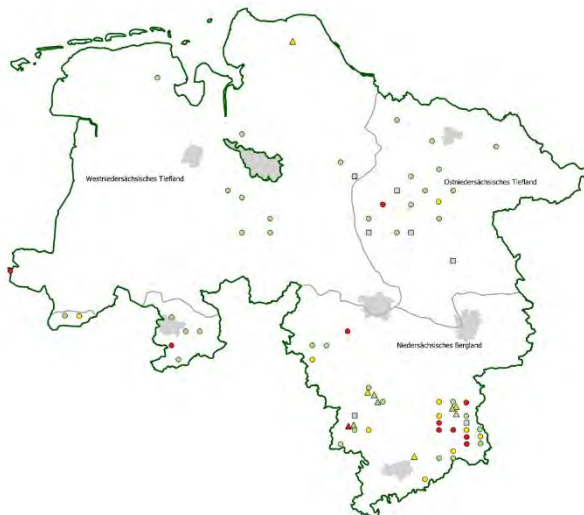


Abbildung 141: Kaliumgehalte in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Fichtenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007); grün: Normalbereich, gelb: latenter Mangel, rot: Mangel; organisch geprägte Standorte wurden nicht bewertet (graue Quadrate))

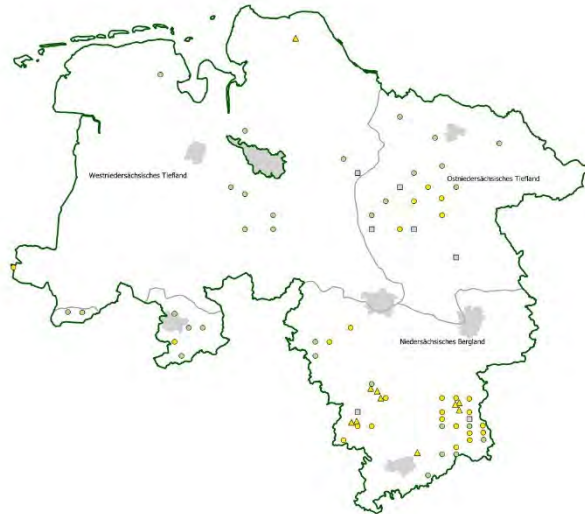


Abbildung 142: Schwefelgehalte in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Fichtenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007); grün: Normalbereich, gelb: latenter Mangel; organisch geprägte Standorte wurden nicht bewertet (graue Quadrate))

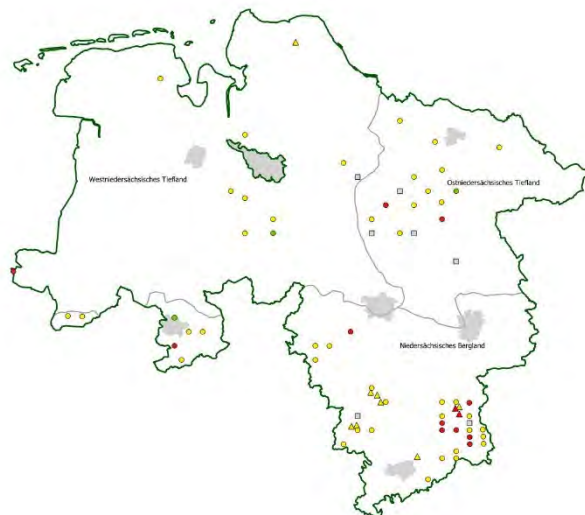


Abbildung 143: Ernährungssituation der Fichte (1. Nadeljahrgang) in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Fichtenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007); grün: Hauptnährelemente mindestens im Normalbereich und Stickstoffquotienten ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten unausgewogen, rot: Mangelerkrankung; organisch geprägte Standorte wurden nicht bewertet (graue Quadrate))

8.3.2.3 Kalkungsvergleich

Die Fichten auf gekalkten BZE-Punkten weisen gegenüber den ungekalkten BZE-Punkten signifikant höhere Magnesiumgehalte in den Nadeln auf (s. Abb. 144). Dies hat allerdings kaum Auswirkungen auf die Verteilung in die Bewertungsstufen, da sowohl die gekalkten als auch die ungekalkten Fichten normale Magnesiumgehalte aufweisen und das N/Mg-Verhältnis für beide Kollektive im harmonischen Bereich liegt (s. Abb. 145). Alle weiteren Nährelemente und Stickstoffquotienten zeigen keine eindeutigen Kalkungseffekte.

Aus Tabelle 29 wird deutlich, dass die Fichten auf gekalkten Standorten tendenziell besser mit Phosphor und Eisen versorgt sind als die Fichten auf ungekalkten Standorten. Umgekehrt ist es beim Kalium: die gekalkten Fichten sind zu 58 % gut mit Kalium ausgestattet, die ungekalkten Fichten dagegen zu 79 %.

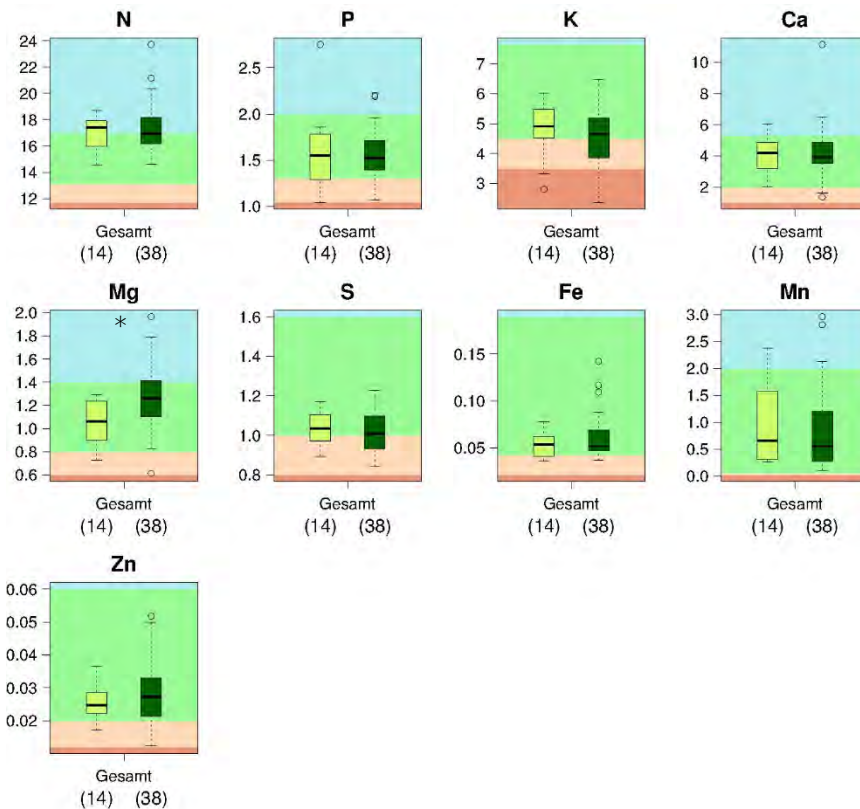


Abbildung 144: Kalkungsvergleich für Fichte in Niedersachsen (inkl. Bremen). Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) 2007. Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Fichten der Kalkungskulisse. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Irrtumswahrscheinlichkeit: * $p < 5\%$; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

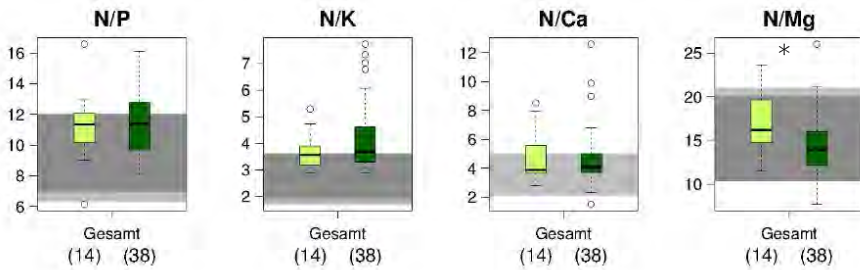


Abbildung 145: Kalkungsvergleich für Fichte in Niedersachsen (inkl. Bremen). Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljabrgang) 2007. Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und nicht gekalkte (hellgrün) Fichten der Kalkungskulisse. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Irrtumswahrscheinlichkeit: * $p < 5\%$; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

Tabelle 29: Zuordnung [Anteil in %] der ungekalkten und gekalkten BZE-Fichtenpunkte 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	Anteil [%] an ungekalkten (n = 14) und gekalkten (n = 38) BZE-Punkten mit Fichte (2007)					
	unter der Symptommgrenze = Mangel		unter Normalbereich = latenter Mangel		im/über Normalbereich	
	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt
N	-	-	-	-	100	100
P	7	-	29	13	64	87
K	14	21	7	21	79	58
Ca	-	-	-	5	100	95
Mg	-	-	7	3	93	97
S	-	-	43	47	57	53
Fe	-	-	29	8	71	92
Mn	-	-	-	-	100	100
Zn	-	-	14	18	86	82
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse					
	ungekalkt			gekalkt		
N/P	57			55		
N/K	36			32		
N/Ca	71			71		
N/Mg	79			82		

Sowohl unter den gekalkten als auch unter den ungekalkten BZE-Punkten sind nur sehr wenige Fichtenbestände gut und ausgewogen ernährt (3 bzw. 7 %). Auch der Anteil an Fichtenpunkten mit Mangelerkrankung ist in beiden Gruppen gleich (jeweils 21 %).

8.3.2.4 Vergleich 1. und 3. Nadeljahrgang 2007

Magnesium gehört zu den Elementen, die in der Pflanze leicht verlagert werden. Nach REEMTSMA (1986) findet bei einem Engpass in der Magnesiumversorgung eine Verlagerung von Magnesium aus den älteren in den jüngsten Nadeljahrgang statt. Dies äußert sich in geringeren Gehalten in älteren Nadeln (s. Tab. 30).

Tabelle 30: Beurteilung der Magnesiumgehalte von Fichte in verschiedenen Jahrgängen des 7. Quirls (nach REEMTSMA 1986)

Magnesiumgehalte	Bewertung
Im 1. Nadeljahrgang wird ein Basiswert von 1,0 mg/g erreicht oder überschritten und die Magnesiumversorgung ist in allen Jahrgängen weitgehend stabil.	„gute bis reichliche Versorgung“
Im 1. Nadeljahrgang werden 1,0 mg/g erreicht, in den älteren Nadeln fällt die Konzentration auf bis zu 0,7 mg/g ab.	„mangelfreie Ernährung“
Der Abfall der Gehalte in den Nadeljahrgängen ist steiler, wobei der 1. Nadeljahrgang noch über 1,0 mg/g und der 3. Nadeljahrgang zwischen 0,7 und 0,3 mg/g liegt. Oder: Im 1. Nadeljahrgang wird der Basiswert von 1,0 mg/g unterschritten, im 3. Nadeljahrgang liegen die Magnesiumgehalte über der Vergilbungsschwelle (> 0,3 mg/g).	„zunehmender Mangel“
Die Magnesiumgehalte im 3. Nadeljahrgang sind $\leq 0,3$ mg/g.	Unterschreiten der Vergilbungsschwelle

Eine Einstufung der Magnesiumversorgung an den BZE-Punkten mit Fichte (ohne organisch geprägte Standorte) nach REEMTSMA (1986) ergibt folgendes Bild: 59 % der BZE-Punkte fallen in die Kategorie „gute bis reichliche Versorgung“ bzw. „mangelfreie Ernährung“. Beide Kategorien sind in allen Substratgruppen vertreten. 39 % der Fichtenpunkte entfallen auf die Kategorie „zunehmender Mangel“. An einem BZE-Punkt unterschreitet der Magnesiumgehalt die Vergilbungsschwelle. Die Bewertung nach REEMTSMA (1986) zeigt damit ein differenzierteres Bild, als die in Tabelle 28 (S. 284) dargestellte Bewertung, wonach 95 % der Fichten Magnesiumgehalte im Normalbereich aufweisen.

Auf den gekalkten BZE-Fichtenpunkten in Niedersachsen ist nach REEMTSMA (1986) an 27 von 38 Fichtenpunkten (71 %) die Magnesiumversorgung „gut bis reichlich“ bzw. „mangelfrei“. Bei den ungekalkten Fichtenpunkten entfallen nur 5 von 14 Fichtenpunkten (36 %) in diese Bewertungsgruppen.

8.3.2.5 Zeitliche Veränderungen

Für die Fichte in Niedersachsen liegen Ergebnisse aus vier landesweiten Inventuren vor. Zusätzlich zu den Erhebungen im Rahmen der BZE I, der Inventur 1996 und der BZE II wurde in den Wintern 1983/1984 und 1984/1985 eine Stichprobenerhebung zu den Nadelinhaltsstoffen 61- bis 80-jähriger Fichten (IWE) durchgeführt. An 46 Aufnahmepunkten wurden je sechs Fichten gefällt und Nadelproben entnommen. Für die Berechnung zeitlicher Trends (1994-2007) wurden zehn Fichtenflächen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen einbezogen.

Die Stickstoffgehalte in den Fichtennadeln liegen bereits bei der IWE hoch, gegenüber 1990 und 2007 treten kaum Unterschiede auf (s. Abb. 146). Auffällig sind die Werte 1996 mit deutlich geringeren Stickstoffgehalten, die sogar in den (latenten) Mangelbereich hineinragen. Im Zeitraum 1994-2007 sind die Stickstoffgehalte auf den Fichtenflächen des Intensiven Monitorings signifikant angestiegen (s. Tab. 31).

Die Phosphorgehalte in den Fichtennadeln halten in allen vier Erhebungen das Niveau. Für die N/P-Quotienten zeichnet sich ebenfalls keine eindeutige Entwicklung ab (s. Abb. 147). Der N/P-Quotient im Intensiven Monitoring zeigt einen ansteigenden Trend.

Die Kaliumgehalte liegen in den ersten drei Inventuren weitgehend oberhalb der Mangelgrenzen. 2007 zeigt sich eine Abnahme, 36 % der Erhebungspunkte entfallen auf den Bereich des (latenten) Kaliummangels. Nur ein Drittel der Fichtenproben weist 2007 harmonische N/K-Verhältnisse auf. Ein abnehmender Trend der Kaliumgehalte wird auch im Intensiven Monitoring vorgefunden. Außerdem steigt hier der N/K-Quotient an.

Die Calciumgehalte schwanken zwischen den Erhebungszeitpunkten, befinden sich aber weitgehend im Normalbereich. Die N/Ca-Quotienten zeigen in den letzten drei Erhebungen harmonische Verhältnisse an. Die Fichten des Intensiven Monitorings sind deutlich schlechter mit Calcium versorgt als die Fichten des BZE-Kollektivs. Ein signifikanter Trend ist nicht abzuleiten, der N/Ca-Quotient steigt auf den Flächen des Intensiven Monitorings an.

Bis 1996 werden relativ niedrige Magnesiumgehalte festgestellt. Bei der ersten Inventur weisen 50 % der Fichtenbestände (latenten) Magnesiummangel auf. 2007 zeichnet sich eine wesentliche Verbesserung ab, fast alle Magnesiumgehalte (95 %) befinden sich im Normalbereich. Auch die N/Mg-Quotienten zeigen 2007 kaum noch unharmonische Verhältnisse an. Die Magnesiumgehalte der Fichtennadeln des Intensiven Monitorings liegen mehrheitlich im latenten Mangelbereich. Es gibt zwar

einen positiven Trend, allerdings bleibt der Anstieg so gering, dass die Magnesiumgehalte im (latenten) Mangelbereich verharren. Die N/Mg-Quotienten nehmen ab.

Die Schwefelgehalte sind 1996 und 2007 deutlich niedriger als bei den ersten beiden Inventuren. 2007 befinden sich nur rund die Hälfte (55 %) der Schwefelgehalte im Normalbereich. Die signifikante Abnahme der Schwefelgehalte in den Inventuren bestätigt sich auf den Flächen des Intensiven Monitorings.

Bei den Eisengehalten ist die Spanne der Werte bei der IWE groß. Bis 1996 sinken die Werte stark ab, zwischen 1996 und 2007 besteht kein Unterschied. Auf den Intensivflächen ist kein Trend für die Eisengehalte in den Fichtennadeln festzustellen.

Die Mangangehalte bleiben bei allen vier Inventuren stabil im Normalbereich, während es beim Intensiven Monitoring einen ansteigenden Trend gibt.

Zink wurde bei der IWE nicht untersucht. 2007 haben die Zinkgehalte gegenüber 1990 und 1996 abgenommen. Beim Intensiven Monitoring wurde kein Trend berechnet, weil Zink in den ersten Jahren nicht analysiert wurde.

Die langjährigen Mediane der Nadelanalysen des Intensiven Monitorings entsprechen für Kalium, Schwefel, Eisen und Zink sowie den N/P- und N/K-Quotienten den Ergebnissen der BZE 2007 (s. Tab. 31). Die Stickstoff, Phosphor, Calcium- und Magnesiumgehalte sind auf den Intensivmessflächen deutlich niedriger als im BZE-Kollektiv, die Mangangehalte höher. Die Unterschiede in der Nährstoffversorgung zwischen beiden Kollektiven sind vor allem durch die Flächenauswahl bedingt. Die Fichtenflächen des Intensiven Monitorings liegen i. d. R. auf basenarmen Standorten der Substratgruppen Buntsandstein, Kreidesandstein und Quarzit (s. Tab. 23, S. 268). Zwei der zehn Flächen sind gekalkt worden. Die Fichten im BZE-Kollektiv umfassen ein breiteres Standortsspektrum, zu dem auch besser ausgestattete Standorte wie z. B. Kalk, Lehm und Lösslehm gehören. Außerdem ist ein Großteil der BZE-Fichtenpunkte gekalkt.

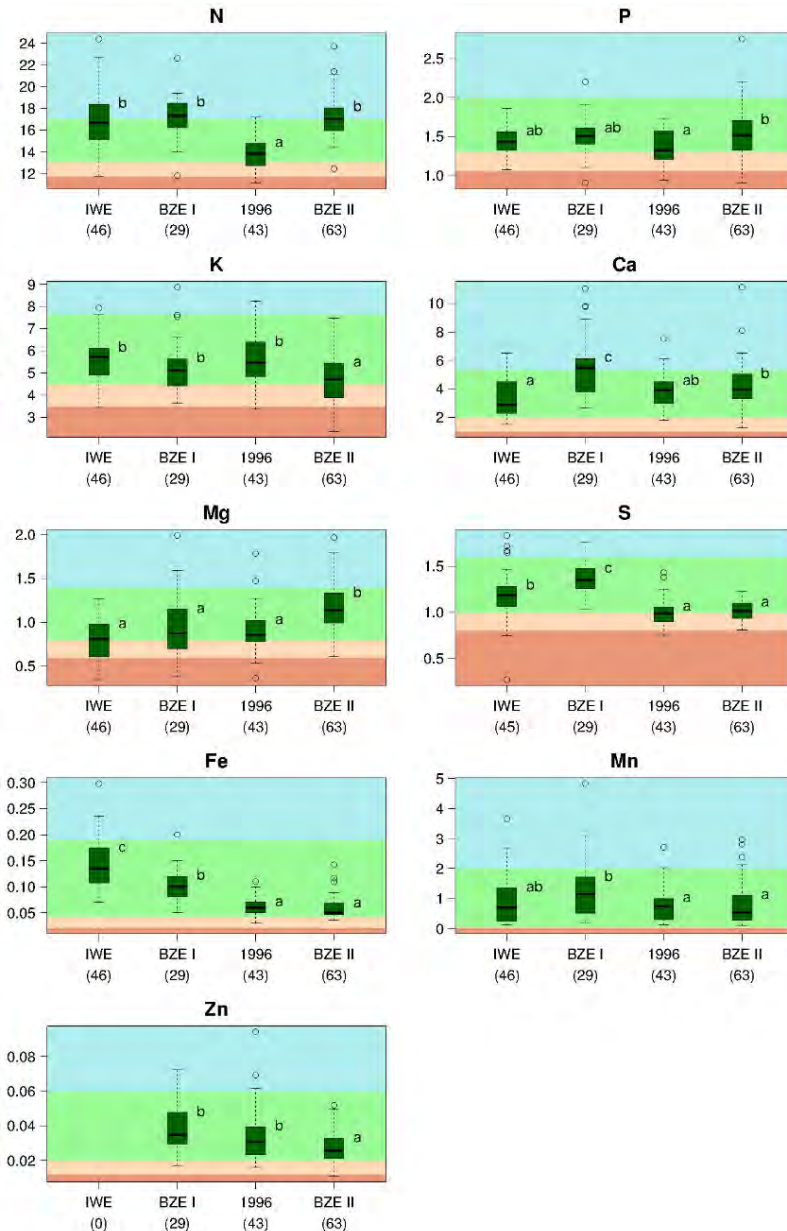


Abbildung 146: Vergleich der Elementgehalte für Fichten der IWE, BZE I, Inventur 1996 und BZE II in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen). Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

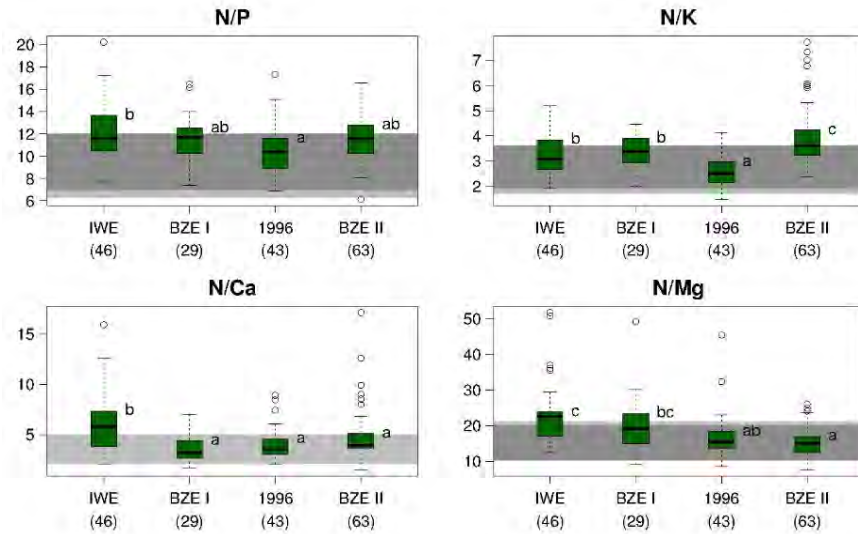


Abbildung 147: Vergleich der Elementverhältnisse für Fichten der IWE, BZE I, Inventur 1996 und BZE II in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen). Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

Tabelle 31: Elementgehalte und Elementverhältnisse (Median) in Fichtennadeln (1. Nadeljabrgang) zu vier Inventurzeitpunkten in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen) und Elementgehalte und Elementverhältnisse sowie deren Trends in Fichtennadeln auf zehn Fichtenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1994-2007)

	Elementgehalt [mg/g]					Trend	
	IWE 1983-1985 n = 46	BZE I 1990/91 n = 29	Inventur 1996 n = 43	BZE 2007 n = 63	Intensives Monitoring 1994-2007 n = 10		
N	16,7	17,3	13,8	17,0	14,8	↑	***
P	1,43	1,5	1,32	1,52	1,34	-	n. s.
K	5,7	5,1	5,5	4,7	4,75	↓	***
Ca	2,8	5,5	3,9	3,9	2,3	-	n. s.
Mg	0,81	0,87	0,85	1,13	0,76	↑	***
S	1,18	1,35	0,99	1,0	0,9	↓	***
Fe	0,13	0,1	0,06	0,051	0,051	-	n. s.
Mn	0,65	1,14	0,74	0,544	0,963	↑	**
Zn	-	0,035	0,031	0,026	0,024	kein Trend berechnet	
Elementverhältnis [mg/mg]						Trend	
N/P	11,5	11,7	10,4	11,6	11,0	↑	**
N/K	3,1	3,4	2,5	3,6	3,2	↑	***
N/Ca	5,8	3,2	3,5	3,9	6,6	↑	*
N/Mg	22,7	19,2	15,4	15,0	19,0	↓	**

Trend: ↑ zunehmend, ↓ abnehmend.

Irrtumswahrscheinlichkeiten: * $p < 5\%$, ** $p < 1\%$, *** $p < 0,1\%$, n. s. = nicht signifikant.

Blauer Hintergrund: Elementgehalt im Luxusbereich

Hellgrüner Hintergrund: Elementgehalt im Normalbereich bzw. Elementverhältnis innerhalb der Grenzwerte für eine harmonische Ernährung

Orangener Hintergrund: Elementgehalt im latenten Mangelbereich bzw. Elementverhältnis außerhalb der Grenzwerte für harmonische Elementverhältnisse.

8.3.3 *Buche*

8.3.3.1 *Ernährungsstatus 2007*

Die Buche nimmt in Niedersachsen einen Anteil von 14 % an der Waldfläche ein (ML 2014). In der BZE-Stichprobe ist sie am häufigsten in den Substratgruppen Kalkstein (16), Lösslehm (15) und Buntsandstein (11) vertreten.

Die Stickstoffgehalte der Buchenblätter liegen 2007 vorwiegend im Normalbereich (s. Abb. 148). 39 % der Stickstoffgehalte befinden sich im Luxusbereich.

Für die Phosphor-, Kalium- und Schwefelernährung bestehen für die Buche erhebliche Defizite in allen Substratgruppen. Rund drei Viertel der Phosphorgehalte und etwa die Hälfte der Kalium- und Schwefelgehalte befinden sich im (latenten) Mangelbereich (s. Tab. 32).

Die Calciumgehalte decken eine weite Spanne ab. Am höchsten sind sie auf Kalkstein, am niedrigsten auf schwach verlehmttem Sand. Insgesamt befinden sich 95 % der Buchen mindestens im Normalbereich.

Auch der Median der Magnesiumgehalte befindet sich insgesamt im Normalbereich, allerdings treten in allen Substratgruppen auch Defizite auf, sodass nur 68 % der Buchen normal mit Magnesium versorgt sind.

Die Gehalte der Buchenblätter an Eisen, Mangan und Zink fallen nahezu vollständig in den Normalbereich. Die Mangangehalte der Buchen sind – wie bei der Fichte – auf Buntsandstein am höchsten. Ein Buchenpunkt auf Grauwacke fällt durch einen extrem hohen Zinkgehalt auf, der bereits bei der BZE I und der Inventur 1996 an diesem Punkt beobachtet wurde. Dieser hohe Zinkgehalt ist vermutlich geogen bedingt, da der Buchenpunkt – ebenso wie zwei Fichtenpunkte mit ungewöhnlich hohen Zinkgehalten – im Harz, einer Region mit ehemals intensiver Bergbautätigkeit, liegt.

Der Vergleich mit dem Drei-Länder-Mittelwert zeigt, dass die Mangangehalte in den Buchenblättern in Niedersachsen (inkl. Bremen) deutlich niedriger liegen als in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt insgesamt.

Analog zu den niedrigen Phosphor- und Kaliumgehalten der Buchenblätter zeigen die N/P- und N/K-Quotienten nur zu 1 bzw. 38 % harmonische Verhältnisse an (s. Tab. 32 u. Abb. 149). Zusätzlich liegen auch die N/Ca- und N/Mg-Verhältnisse häufig außerhalb der Grenzwerte einer harmonischen Ernährung (38 bzw. 48 %).

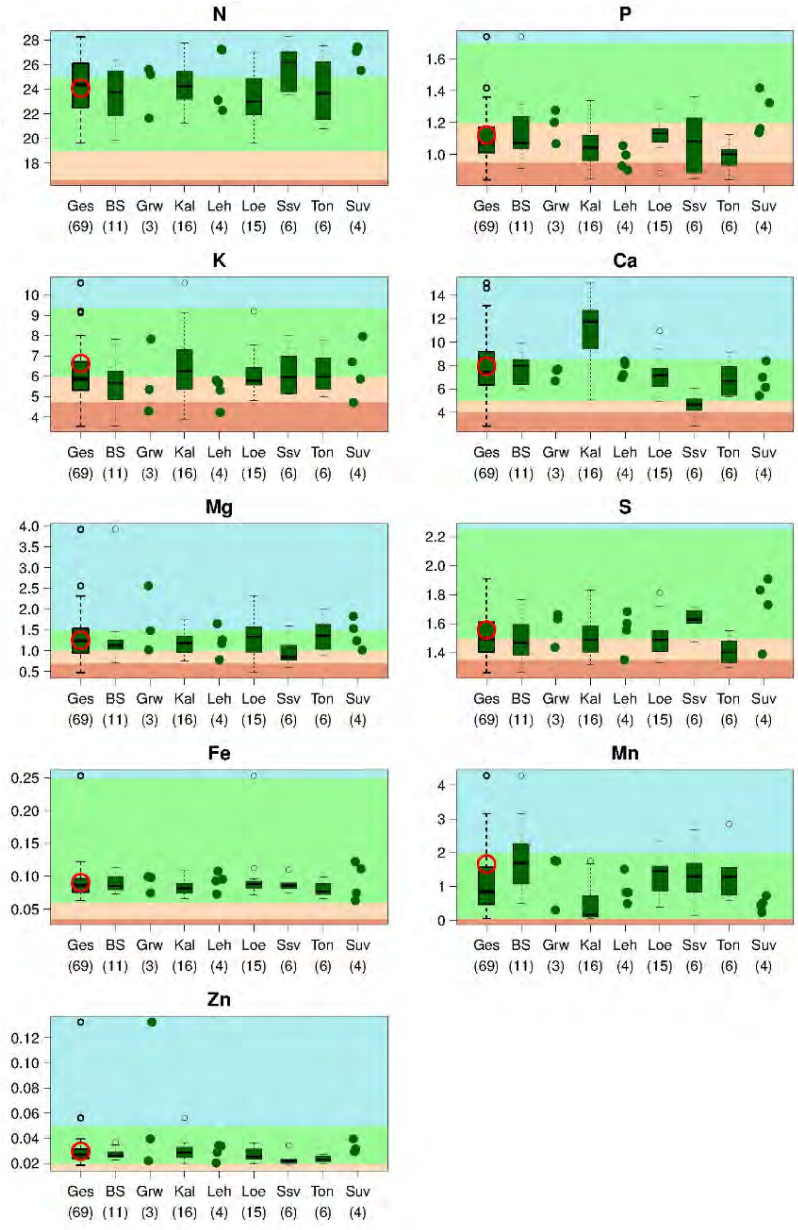


Abbildung 148: Elementgehalte [mg/g] in Buchenblättern 2007. Verteilung für die Buche in Niedersachsen (inkl. Bremen) insgesamt (n = 69) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn n ≥ 3, Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn n = 3 bis 4. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 22, S. 266.

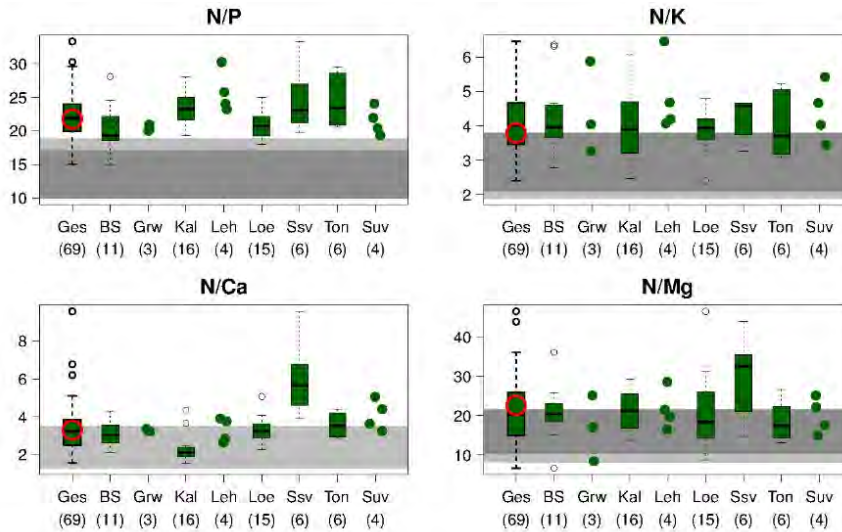


Abbildung 149: Elementverhältnisse in Buchenblättern 2007. Verteilung für die Buche in Niedersachsen (inkl. Bremen) insgesamt ($n = 69$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn $n = 3$ bis 4. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 22, S. 266.

Aufgrund der weitverbreiteten, substratgruppenübergreifenden Defizite an Phosphor und Kalium sowie der unharmonischen N/P- und N/K-Quotienten ist für die Buche in keiner Substratgruppe eine gute und ausgewogene Ernährung gegeben.

Nur an einem BZE-Buchenpunkt bestehen keine Defizite bei den Hauptnährelementen oder unharmonische Elementverhältnisse. (Latenter) Mangel und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten gibt es an 57 %, Mangelernährung an 42 % der Buchenpunkte. Defizite an Phosphor, Kalium und Schwefel sind am häufigsten.

Tabelle 32: Zuordnung [Anteil in %] der 69 BZE-Buchenpunkte 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomgrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	100
P	16	61	23
K	15	39	46
Ca	1	4	95
Mg	3	29	68
S	13	38	49
Fe	-	-	100
Mn	-	1	99
Zn	-	6	94
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	1		
N/K	38		
N/Ca	62		
N/Mg	52		

8.3.3.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

BZE-Punkte mit Buche kommen vor allem im Niedersächsischen Bergland vor. Trotz der geringen Stichprobenanzahl in den nördlichen Waldregionen sind 2007 räumliche Muster in den Blattgehalten für die Hauptnährelemente Stickstoff, Calcium und Schwefel erkennbar. Die Stickstoffgehalte sind in den westlichen Landesteilen höher als im Osten und Süden (s. Abb. 150). Luxuriöse Calciumgehalte sind im Tiefland selten (s. Abb. 151), im Bergland aber verbreitet (34 %). Die Schwefelernährung der Buche ist im Bergland schlechter (40 % Normalbereich) als im Tiefland (75 % Normalbereich) (s. Abb. 152).

Die Anteile an mangelernährten Buchen sind im Westniedersächsischen Tiefland und im Bergland etwa gleich hoch (s. Abb. 153).

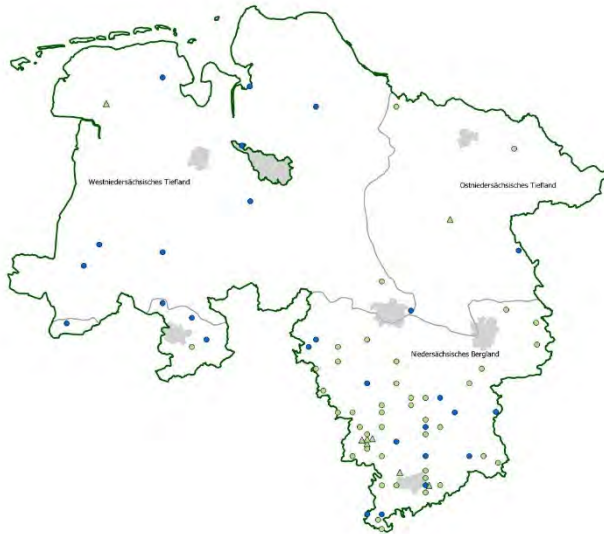


Abbildung 150: Stickstoffgehalte in Buchenblättern in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Buchenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1995-2008); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich)

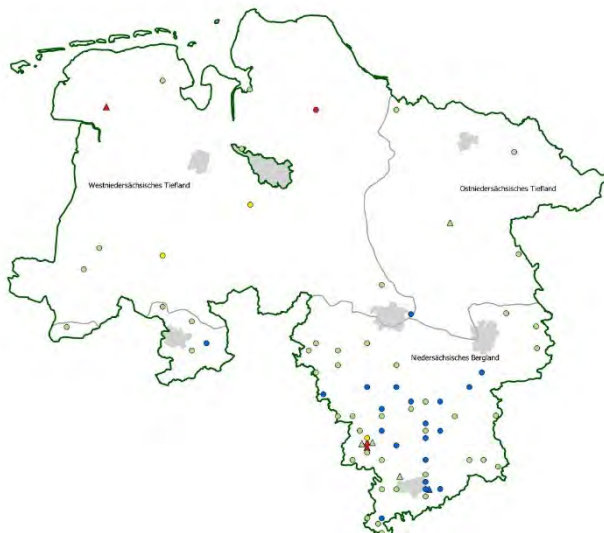


Abbildung 151: Calciumgehalte in Buchenblättern in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Buchenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1995-2008); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich, gelb: latenter Mangel, rot: Mangel)

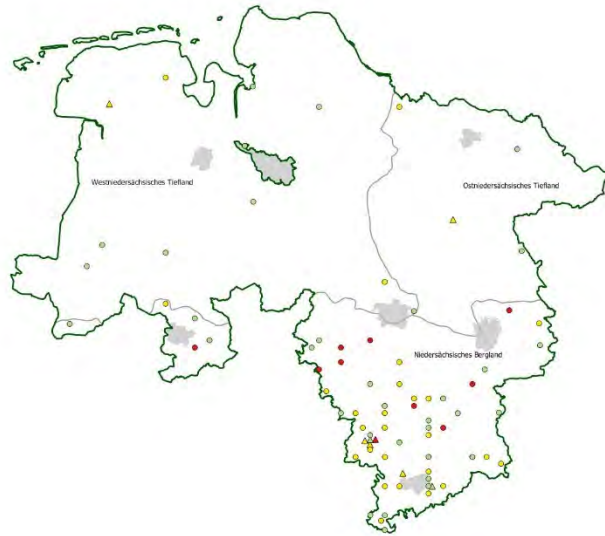


Abbildung 152: Schwefelgehalte in Buchenblättern in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Buchenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1995-2008); grün: Normalbereich, gelb: latenter Mangel, rot: Mangel)

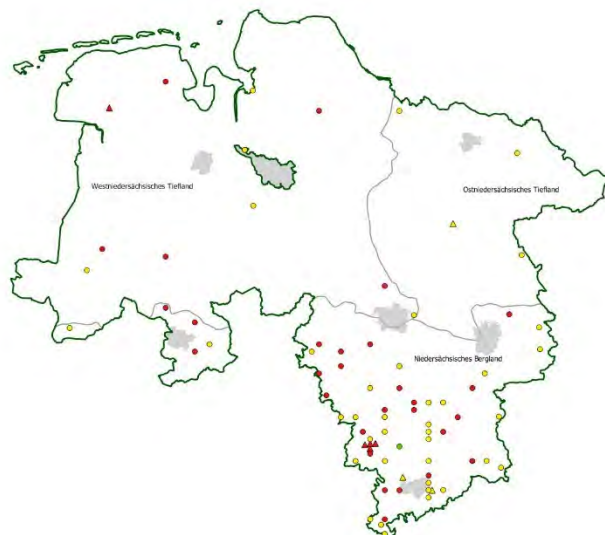


Abbildung 153: Ernährungssituation der Buche in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Buchenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1995-2008); grün: Hauptnährelemente mindestens im Normalbereich und Stickstoffquotienten ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten unausgewogen, rot: Mangelernährung)

8.3.3.3 Kalkungsvergleich

Signifikante Kalkungseffekte auf die Ernährungssituation der Buche sind für das BZE-Kollektiv in Niedersachsen (inkl. Bremen) 2007 nicht festzustellen. Für Calcium und Magnesium werden für die gekalkten gegenüber den ungekalkten BZE-Punkten tendenziell höhere Gehalte festgestellt, für Kalium und Schwefel tendenziell niedrigere Gehalte (s. Abb. 154). Entsprechend zeigen die gekalkten Buchenpunkte beim N/K-Verhältnis und die ungekalkten Buchenpunkte bei den N/Ca- und N/Mg-Verhältnissen häufig unharmonische Verhältnisse (s. Abb. 155 u. Tab. 33).

Wie bei der Buche insgesamt sind auch die gekalkten und ungekalkten Buchen nur sehr selten (3 % bzw. 0 %) gut und ausgewogen mit den sechs Hauptnährstoffen versorgt. An 38 % der gekalkten Buchenpunkte tritt Mangelernährung auf, bei den ungekalkten Buchenpunkten sind es 58 %.

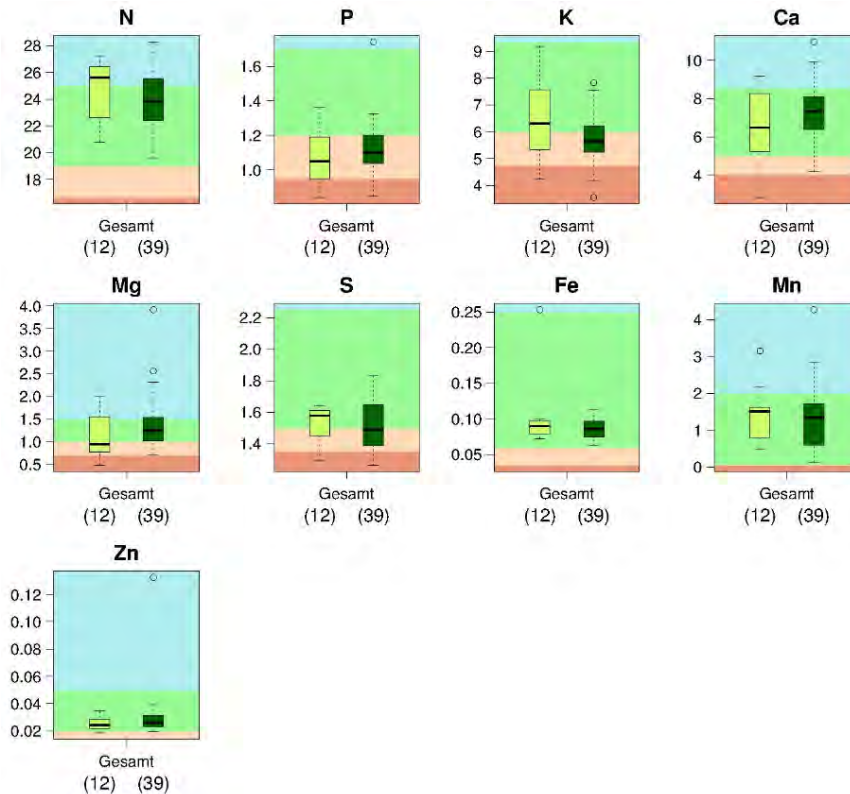


Abbildung 154: Kalkungsvergleich für Buche in Niedersachsen (inkl. Bremen). Elementgehalte [mg/g] in Buchenblättern 2007. Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Buchen der Kalkungskulisse. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

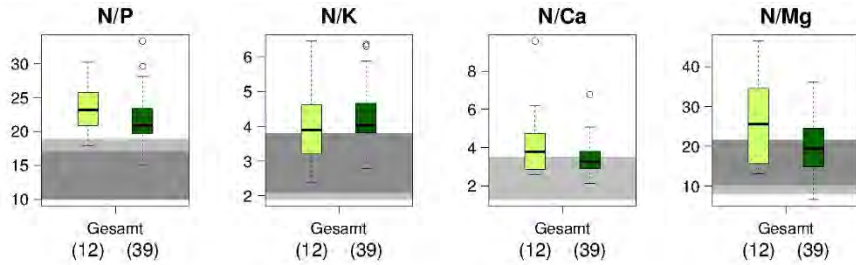


Abbildung 155: Kalkungsvergleich für Buche in Niedersachsen (inkl. Bremen). Elementverhältnisse in Buchenblättern 2007. Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (bellgrün) Buchen der Kalkungskulisse. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

Tabelle 33: Zuordnung [Anteil in %] der ungekalkten und gekalkten BZE-Buchepunkte 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	Anteil [%] an ungekalkten (n = 12) und gekalkten (n = 39) BZE-Punkten mit Buche (2007)					
	unter der Symptombegrenze = Mangel		unter Normalbereich = latenter Mangel		im/über Normalbereich	
	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt
N	-	-	-	-	100	100
P	25	13	50	61	25	26
K	17	13	25	54	58	33
Ca	8	-	8	5	84	95
Mg	17	-	33	23	50	77
S	8	15	25	41	67	44
Fe	-	-	-	-	100	100
Mn	-	-	-	-	100	100
Zn	-	-	17	3	83	97
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse					
	ungekalkt			gekalkt		
N/P	0			3		
N/K	50			26		
N/Ca	33			64		
N/Mg	50			62		

8.3.3.4 Zeitliche Veränderungen

Landesweite Inventuren zu den Elementgehalten und -verhältnissen in Buchenblättern wurden 1990 (BZE I), 1996 (Inventur) und 2007 (BZE II) durchgeführt. Die Ableitung zeitlicher Trends für die Ernährungssituation der Buche erfolgte anhand von acht Intensivmonitoringflächen in Niedersachsen für den Zeitraum 1995-2008.

Wie bei Kiefer und Fichte liegen die Stickstoffgehalte der Buche 1990 und 2007 auf gleichem Niveau, 1996 sind sie relativ niedrig (s. Abb. 156). Die Stickstoffgehalte der Buchen im Intensiven Monitoring zeigen einen zunehmenden Trend (s. Tab. 34).

Die Phosphorgehalte der Buchen entfallen zu allen drei BZE-Zeitpunkten überwiegend in den latenten Mangelbereich. Auch die Buchen auf den Flächen des Intensiven Monitorings weisen Phosphordefizite und unharmonische N/P-Quotienten auf. Ein zeitlicher Trend ist nicht festzustellen.

Die Kaliumversorgung der Buche zeigt zwischen 1990 und 2007 keinen signifikanten Unterschied. Zwischen 1996 und 2007 nehmen die Kaliumgehalte ab. Im Gegensatz hierzu nehmen die Kaliumgehalte auf den Buchenflächen des Intensiven Monitorings zwischen 1995 und 2008 zu.

Die Calciumgehalte unterscheiden sich zwischen den drei landesweiten Inventuren nicht. Sie liegen zu allen drei Zeitpunkten im Normalbereich. Ein Trend der Calciumgehalte für die Buchen im Intensiven Monitoring besteht nicht.

Die Magnesiumgehalte haben sich 1996 gegenüber 1990 verbessert und bleiben 2007 stabil. Allerdings zeigen 2007 immer noch ein Drittel der Buchen Magnesiumdefizite und die Hälfte der Buchen unharmonische N/Mg-Quotienten (s. Abb. 157). Für die Buchen des Intensiven Monitorings haben die Magnesiumgehalte im Untersuchungszeitraum 1995-2008 zugenommen.

Die Schwefelgehalte in den Buchenblättern nehmen einen ähnlichen Verlauf wie die der Fichtennadeln. 1990 waren deutlich höhere Schwefelgehalte festzustellen als 1996 und 2007. Bei den letzten beiden Erhebungen befindet sich die Hälfte der Buchenpunkte im (latenten) Mangelbereich. Die Schwefelernährung der Buchen des Intensiven Monitorings zeigt ebenfalls Defizite. Ein Trend ist für diese Flächen nicht aufgetreten.

Die Eisengehalte sind 2007 und 1996 niedriger als 1990, befinden sich jedoch noch im Normalbereich. Im Intensiven Monitoring gibt es keinen Trend. Bei den Mangangehalten sind weder bei den drei landesweiten Inventuren noch beim Intensiven Monitoring zeitliche Veränderungen aufgetreten. Auch die Zinkgehalte veränderten sich zwischen der BZE I und II nicht.

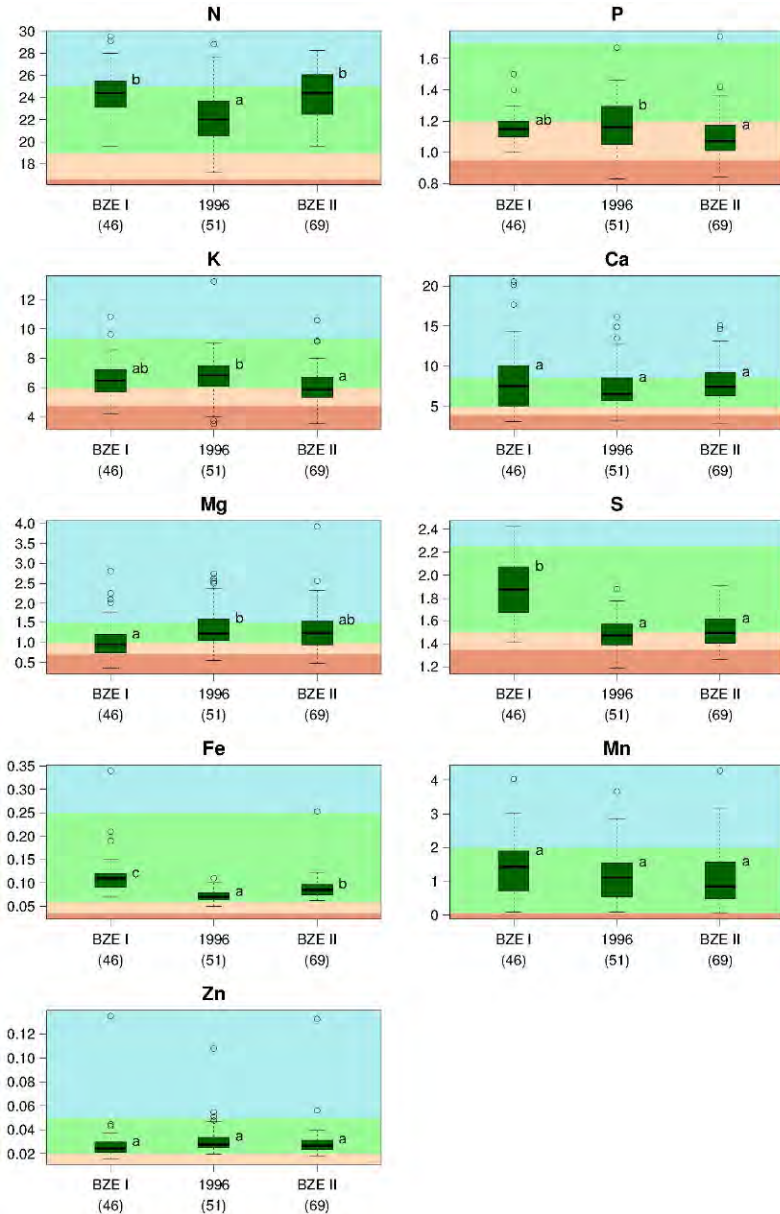


Abbildung 156: Vergleich der Elementgehalte der Buchen der BZE I, Inventur 1996 und BZE II in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen). Elementgehalte [mg/g] in Buchenblättern. Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015); blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

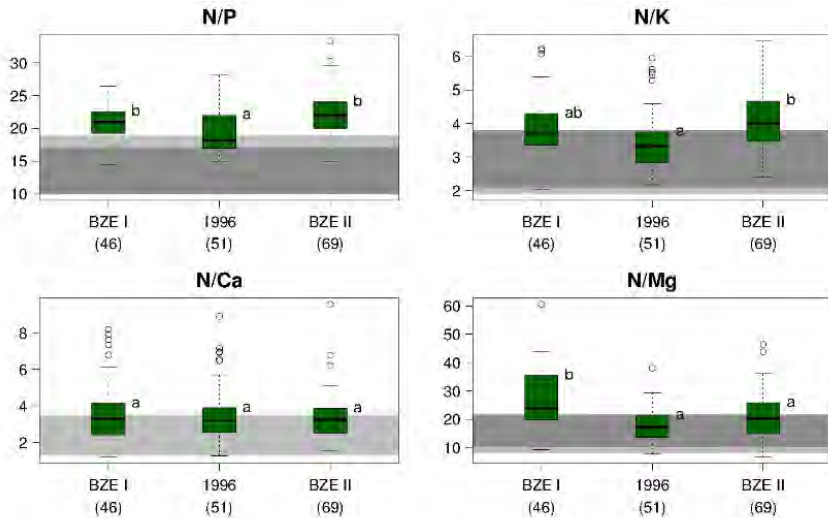


Abbildung 157: Vergleich der Elementverhältnisse für Buchen der BZE I, Inventur 1996, BZE II in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen). Elementverhältnisse in Buchenblättern. Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

Die acht Buchenflächen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen befinden sich vor allem im Bergland in den Substratgruppen Buntsandstein und Kalkstein. Die langjährigen Mediane weisen vergleichbare Stickstoff-, Kalium-, Schwefel-, Eisen- und Zinkgehalte wie die BZE-Buchenpunkte 2007 auf (s. Tab. 34). Die Calcium- und Magnesiumgehalte sind in den Buchenblättern des Intensiven Monitorings niedriger als an den BZE-Buchenpunkten (2007), die Phosphor- und Manganengehalte dagegen höher.

Aus dem Intensiven Monitoring ergeben sich für den Zeitraum 1995-2008 ansteigende Trends für die Stickstoff-, Kalium- und Magnesiumgehalte.

Tabelle 34: Elementgehalte und Elementverhältnisse (Median) in Buchenblättern in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen) zu drei Inventurzeitpunkten und Elementgehalte und Elementverhältnisse sowie deren Trends in Buchenblättern auf acht Buchenflächen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen (Median 1995-2008)

Elementgehalt [mg/g]					Trend	
	BZE I 1990/91 n = 46	Inventur 1996 n = 51	BZE II 2007 n = 69	Intensives Monitoring 1995-2008 n = 8		
N	24,4	22,0	24,4	23,8	↑	*
P	1,15	1,16	1,07	1,18	-	n. s.
K	6,5	6,8	5,9	6,1	↑	*
Ca	7,5	6,5	7,4	6,6	-	n. s.
Mg	0,95	1,22	1,23	1,03	↑	**
S	1,88	1,47	1,49	1,47	-	n. s.
Fe	0,110	0,07	0,086	0,079	-	n. s.
Mn	0,142	1,11	0,840	1,616	-	n. s.
Zn	0,024	0,027	0,027	0,026	kein Trend berechnet	
Elementverhältnis [mg/mg]					Trend	
N/P	21,0	18,1	22,0	20,3	-	n. s.
N/K	3,7	3,3	4,0	3,9	-	n. s.
N/Ca	3,3	3,2	3,2	3,5	-	n. s.
N/Mg	23,8	17,2	20,4	24,4	-	n. s.

Trends: ↑ zunehmend, ↓ abnehmend.

Irrtumswahrscheinlichkeiten: * $p < 5\%$, ** $p < 1\%$, n. s. = nicht signifikant.

Hellgrüner Hintergrund: Elementgehalt im Normalbereich bzw. Elementverhältnis innerhalb der Grenzwerte für harmonische Ernährung

Orangener Hintergrund: Elementgehalt im latenten Mangelbereich bzw. Elementverhältnis außerhalb der Grenzwerte für harmonische Elementverhältnisse.

8.3.4 Eiche

8.3.4.1 Ernährungsstatus 2007

Die Eiche nimmt in Niedersachsen einen Anteil von 13 % an der Waldfläche ein (ML 2014). In der BZE-Stichprobe kommt sie in sieben Substratgruppen vor, die Anzahl der BZE-Eichenpunkte pro Substratgruppe ist gering. Am häufigsten ist die Eiche auf unverlehmtem Sand ($n = 10$) und Lösslehm ($n = 8$) anzutreffen (s. Abb. 158).

Die Stickstoffgehalte der Eichenblätter liegen überwiegend (74 %) im Luxusbereich. Die Überversorgung mit Stickstoff ist bei Kiefer und Eiche stärker ausgeprägt als bei Fichte und Buche.

Die Versorgung mit Kalium, Schwefel, Eisen, Mangan und Zink ist substratübergreifend gut (Normalbereich).

Phosphordefizite treten häufig auf (42 % der Eichenpunkte). In der Substratgruppe unverlehmte Sande ist die Spannweite der Phosphorgehalte vom Mangel- bis zum Luxusbereich besonders groß.

Die Calciumgehalte liegen zu 79 % im Normalbereich oder höher, differieren zwischen den Substratgruppen aber stark. Calciumdefizite bestehen insbesondere auf schwach verlehmtem Sand. Dies wurde auch bei der Buche beobachtet, nicht jedoch bei Fichte und Kiefer.

An 71 % der Eichenpunkte ist die Magnesiumversorgung gut (s. Tab. 35), Defizite kommen in allen Substratgruppen – mit Ausnahme des Ton(stein)s – vor.

Die Mangangehalte in den Eichenblättern liegen an allen Eichenpunkten im bzw. über dem Normalbereich. Wie bei den anderen Baumarten liegen auch bei der Eiche die Mangangehalte in Niedersachsen (inkl. Bremen) deutlich unter dem Dreiländer-Mittelwert.

Unharmonische Stickstoffquotienten sind bei der Eiche weit verbreitet. Für keine Substratgruppe kann ein uneingeschränkt ausgewogenes Elementverhältnis festgestellt werden (s. Abb. 159).

Nur vier Eichenpunkte (10 %) in der BZE-Stichprobe weisen 2007 für die Hauptnährelemente Blattgehalte auf, die sich mindestens im Normalbereich befinden und zeigen ausgewogene Stickstoffquotienten. (Latenten) Mangel und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten gibt es an 82 % der Eichenpunkte. Phosphordefizite sind im BZE-Kollektiv 2007 bei der Eiche am häufigsten aufgetreten, gefolgt von Magnesium- und Calciumdefiziten. An drei Eichenpunkten (8 %) tritt Mangel (Phosphor bzw. Magnesium) auf. Relativ am besten ist die Ernährungssituation der Eiche auf Lösslehm.

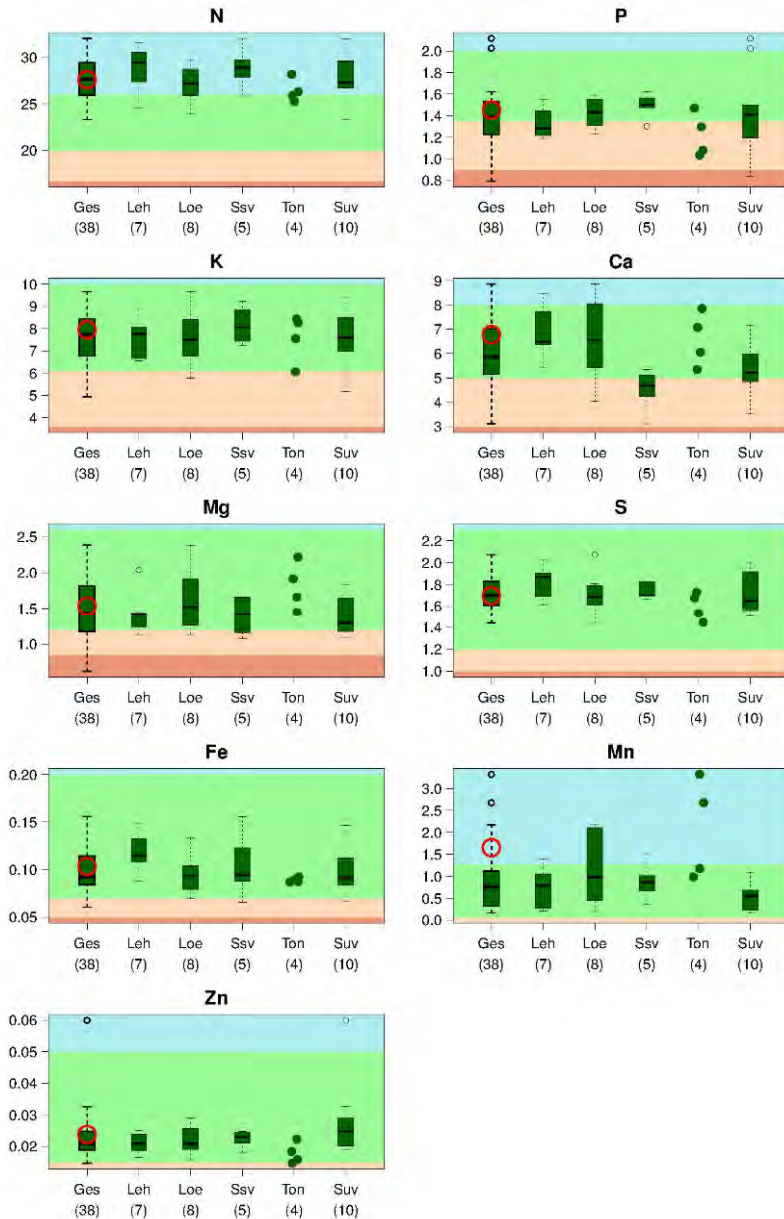


Abbildung 158: Elementgehalte [mg/g] in Eichenblättern 2007. Verteilung für die Eiche in Niedersachsen (inkl. Bremen) insgesamt (n = 38) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn n ≥ 3, Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn n = 4. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 22, S. 266.

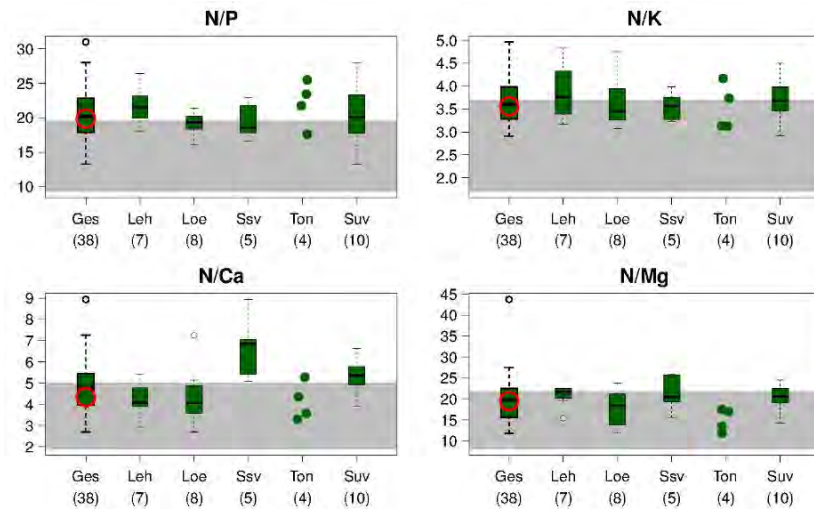


Abbildung 159: Elementverhältnisse in Eichenblättern 2007. Verteilung für die Eiche in Niedersachsen (inkl. Bremen) insgesamt ($n = 44$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$. Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn $n = 4$. Bewertung nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 22, S. 266.

Tabelle 35: Zuordnung [Anteil in %] der 38 BZE-Eichenpunkte 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomen- grenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	100
P	5	37	58
K	-	13	87
Ca	-	21	79
Mg	3	26	71
S	-	-	100
Fe	-	11	89
Mn	-	-	100
Zn	-	3	97
Element- verhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	47		
N/K	53		
N/Ca	55		
N/Mg	66		

8.3.4.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

Die BZE-Eichenpunkte sind gleichmäßig über Niedersachsen verteilt. Räumliche Muster in den Gehalten zeigen sich 2007 für die Hauptnährelemente Calcium und Magnesium. Die Eiche im Bergland ist gut mit Calcium versorgt (Normalbereich und Luxusbereich). Latenter Calciummangel tritt ausschließlich im Tiefland auf (s. Abb. 160). Magnesiumdefizite sind im Ostniedersächsischen Tiefland und im Bergland häufiger als im Westniedersächsischen Tiefland (s. Abb. 161). Die Stickstoffernährung der Eichen ist an drei Vierteln der BZE-Punkte luxuriös. Regionale Unterschiede der Stickstoffgehalte bestehen im Gegensatz zu Kiefer, Fichte und Buche bei der Eiche nicht (ohne Abbildung).

Die vier BZE-Eichenpunkte mit Hauptnährstoffen mindestens im Normalbereich und ausgewogenen Stickstoffquotienten liegen im Ostniedersächsischen Tiefland und im Niedersächsischen Bergland (s. Abb. 162). Die drei Eichenpunkte mit Mangelernährung bezüglich der Hauptnährelemente verteilen sich auf die drei Waldregionen.

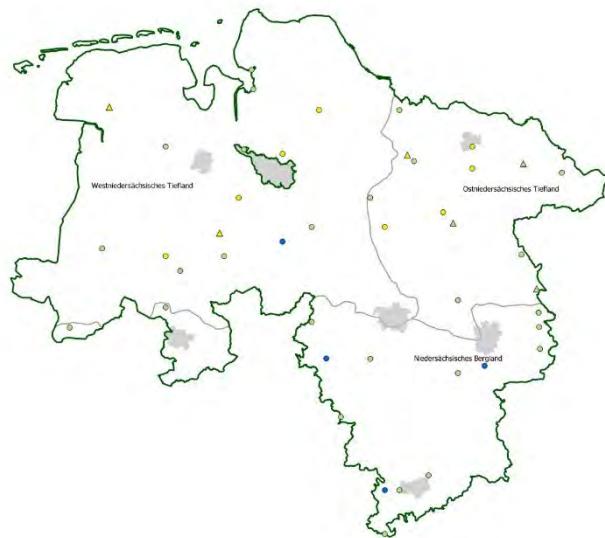


Abbildung 160: Calciumgehalte in Eichenblättern in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Eichenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1995-2008); blau: Luxusernährung, grün: Normalbereich, gelb: latenter Mangel)

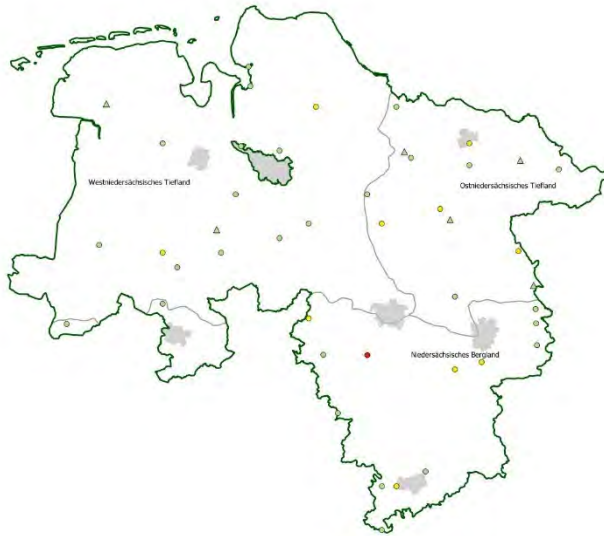


Abbildung 161: Magnesiumgehalte in Eichenblättern in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Eichenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1995-2008); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich, gelb: latenter Mangel, rot: Mangel)

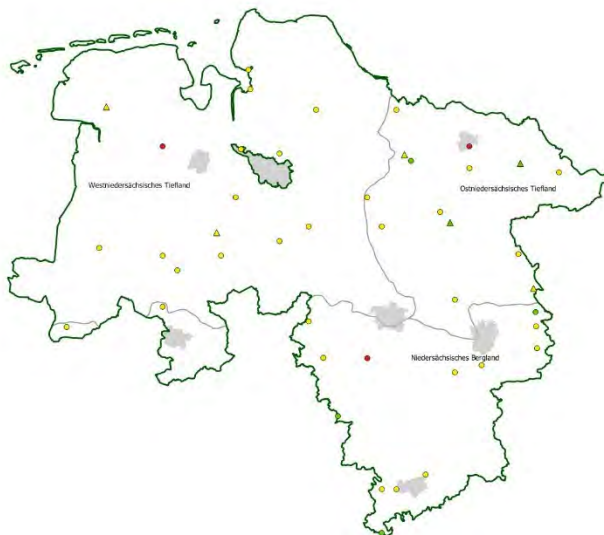


Abbildung 162: Ernährungssituation der Eiche in Niedersachsen (inkl. Bremen) (Punkte: BZE-Raster (2007), Dreiecke: Eichenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1995-2008); grün: Hauptnährelemente mindestens im Normalbereich und Stickstoffquotienten ausgegogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten unausgewogen, rot: Mangel)

8.3.4.3 Kalkungsvergleich 2007

Eichen auf gekalkten BZE-Punkten weisen gegenüber ungekalkten BZE-Punkten signifikant höhere Magnesiumgehalte und günstigere N/Mg-Quotienten auf (s. Abb. 163 und 164, s. Tab. 36). Für die anderen Nährstoffe konnten keine signifikanten Kalkungseffekte nachgewiesen werden.

Insgesamt zeigen vier von 17 gekalkten BZE-Eichenpunkten (24 %) eine Nährstoffversorgung mit Hauptnährelementen, die mindestens im Normalbereich liegen sowie ausgewogene Elementverhältnisse besitzen. An den ungekalkten BZE-Punkten ist dies an keinem BZE-Punkt der Fall.

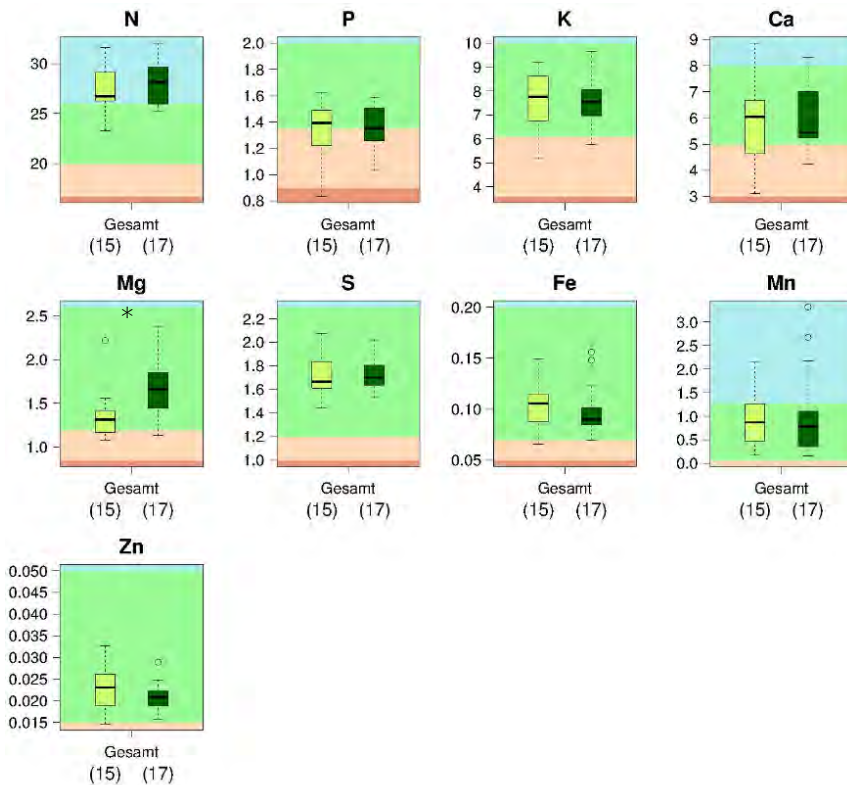


Abbildung 163: Kalkungsvergleich für Eiche in Niedersachsen (inkl. Bremen). Elementgehalte [mg/g] in Eichenblättern 2007. Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Eichen der Kalkungskulisse. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Irrtumswahrscheinlichkeit: * $p < 5\%$; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

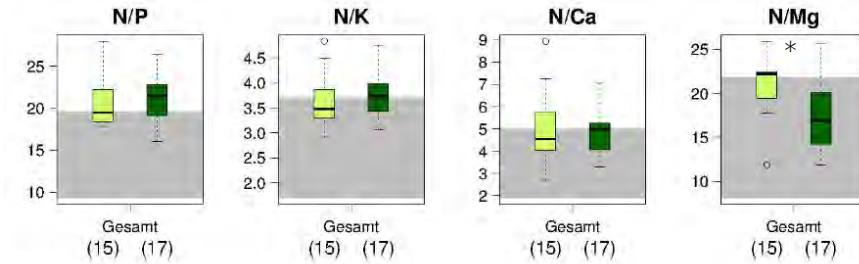


Abbildung 164: Kalkungsvergleich für Eiche in Niedersachsen (inkl. Bremen). Elementverhältnisse in Eichenblättern 2007. Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Eichen der Kalkungskulisse. Bewertung nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012); hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgewogen. Irrtumswahrscheinlichkeit: * $p < 5\%$; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

Tabelle 36: Zuordnung [Anteil in %] der ungekalkten und gekalkten BZE-Eichenpunkte 2007 in Niedersachsen (inkl. Bremen) nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	Anteil (%) an ungekalkten (n = 15) und gekalkten (n = 17) BZE-Punkten mit Eiche (2007)					
	unter der Symptommengrenze = Mangel		unter Normalbereich = latenter Mangel		im/über Normalbereich	
	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt
N	-	-	-	-	100	100
P	7	-	33	47	60	53
K	-	-	7	12	93	88
Ca	-	-	33	12	67	88
Mg	-	-	47	12	53	88
S	-	-	-	-	100	100
Fe	-	-	13	6	87	94
Mn	-	-	-	-	100	100
Zn	-	-	7	-	93	100
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse					
	ungekalkt			gekalkt		
N/P	53			35		
N/K	67			41		
N/Ca	53			53		
N/Mg	47			88		

8.3.4.4 Zeitliche Veränderungen

Für die Eichen in Niedersachsen liegen landesweite Ergebnisse aus Blattanalysen zu drei Inventurzeitpunkten vor. Für die Berechnung der zeitlichen Trends standen sechs Eichenflächen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen zur Verfügung.

Bereits 1990 liegen die Stickstoffgehalte der Eiche (Median) im BZE-Kollektiv oberhalb des Normalbereichs (Luxusernährung) (s. Abb. 165). Im Gegensatz zu Kiefer, Fichte und Buche zeigt sich bei der Eiche keine Absenkung der Stickstoffgehalte bei der Inventur 1996.

Die Entwicklung der Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte in den Eichenblättern verläuft weitgehend parallel: 1990 und 2007 sind die Gehalte etwa gleich hoch, während 1996 für diese drei Elemente höhere Blattgehalte gemessen wurden. Während die Kaliumgehalte zu den drei Inventurzeitpunkten überwiegend im Normalbereich liegen, tritt bei Phosphor und Magnesium 1990 und 2007 auch (latenter) Mangel auf. Die Mediane der N/P-Quotienten liegen 1990 und 2007 im unausgewogenen Bereich (s. Abb. 166).

Die Calciumgehalte der Eichen an den BZE-Punkten befinden sich 1996 überwiegend im latenten Mangelbereich, 1990 und 2007 sind die Eichen deutlich besser mit Calcium versorgt (Normalbereich).

Ähnlich wie bei Calcium sind auch die Eisengehalte in den Eichenblättern 1996 besonders niedrig, bei der BZE I und der BZE II liegen die Eisengehalte im Normalbereich.

Die Schwefelgehalte in den Eichenblättern sind zwischen der BZE I und BZE II signifikant zurückgegangen. Wie bei der Kiefer sinken die Schwefelwerte nicht unterhalb des Normalbereichs ab, wohingegen bei Fichte und Buche die Abnahme der Schwefelgehalte dazu führt, dass 2007 nur etwa die Hälfte der Schwefelgehalte im Normalbereich liegt.

Für Mangan und Zink sind keine signifikanten zeitlichen Veränderungen im BZE-Eichenkollektiv zu verzeichnen, die Gehalte in den Eichenblättern liegen zu allen drei Zeitpunkten im Normalbereich.

Im Intensiven Monitoring sind die langjährigen Mittelwerte der Stickstoff- und Calciumgehalte niedriger und die Phosphorgehalte höher als bei der BZE II (s. Tab. 37). Da die Eichenflächen im Intensiven Monitoring mehrheitlich zur Substratgruppe schwach verlehmt Sande gehören, die im BZE-Kollektiv im Vergleich der Substratgruppen mit relativ hohen Phosphorgehalten und niedrigen Calciumgehalten auffallen, ergeben sich die Unterschiede zwischen den beiden Kollektiven vor allem durch die unterschiedliche Besetzung der Substratgruppen. Die Mangan-gehalte im Intensiven Monitoring weisen auf eine Überversorgung hin. Signifikante Trends in den Elementgehalten und -verhältnissen für den Zeitraum 1995-2008 gab es auf diesen Flächen nicht.

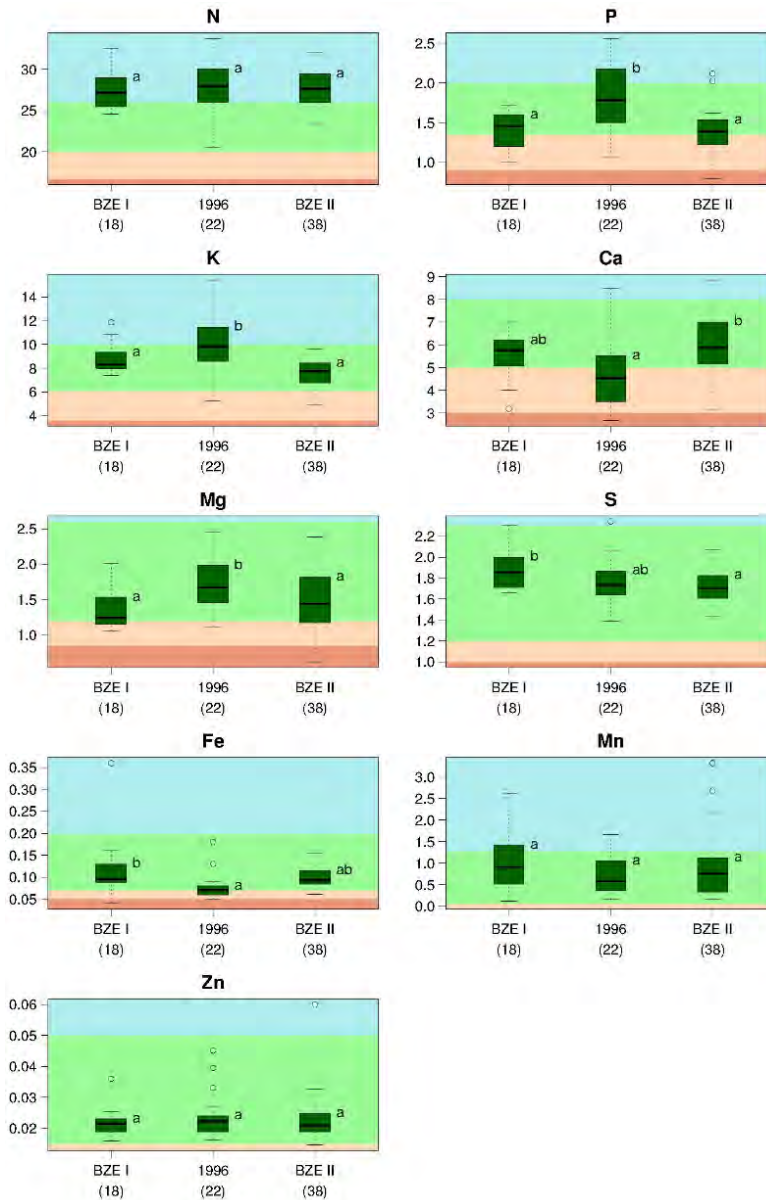


Abbildung 165: Zeitvergleich der Elementgehalte für Eichen der BZE I, Inventur 1996 und BZE II in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen). Elementgehalte [mg/g] in Eichenblättern. Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

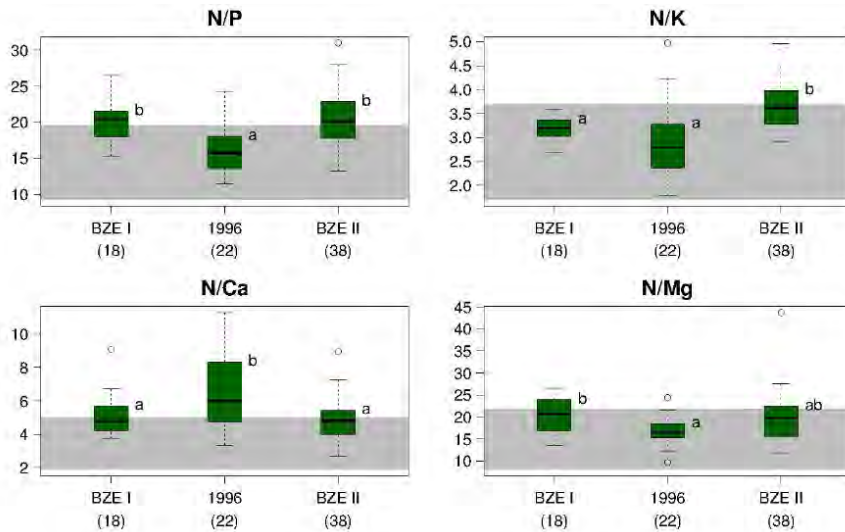


Abbildung 166: Vergleich der Elementverhältnisse für Eichen der BZE I, Inventur 1996 und BZE II in Niedersachsen (2007, inkl. Bremen). Elementverhältnisse in Eichenblättern. Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang.

Tabelle 37: Elementgehalte und Elementverhältnisse (Median) in Eichenblättern in Niedersachsen (inkl. Bremen) zu drei Inventurzeitpunkten und Elementgehalte und Elementverhältnisse sowie deren Trends in Eichenblättern auf sechs Eichenflächen des Intensiven Monitorings (Median 1995-2008)

Elementgehalt [mg/g]					Trend	
	BZE I 1990/91 n = 18	Inventur 1996 n = 22	BZE II 2007 n = 38	Intensives Monitoring 1995-2008 n = 6		
N	27,2	28,0	27,6	26,0	-	n. s.
P	1,45	1,79	1,39	1,64	-	n. s.
K	8,3	9,8	7,7	8,2	-	n. s.
Ca	5,8	4,5	5,9	4,8	-	n. s.
Mg	1,24	1,67	1,44	1,48	-	n. s.
S	1,86	1,74	1,7	1,6	-	n. s.
Fe	0,095	0,07	0,092	0,08	-	n. s.
Mn	0,91	0,585	0,757	1,543	-	n. s.
Zn	0,021	0,022	0,021	0,019	kein Trend berechnet	
Elementverhältnis [mg/mg]					Trend	
N/P	20,4	15,8	20,1	15,9	-	n. s.
N/K	3,2	2,8	3,6	3,1	-	n. s.
N/Ca	4,8	6,0	4,8	5,4	-	n. s.
N/Mg	20,7	16,4	19,8	18,0	-	n. s.

Trends: n. s. = nicht signifikant.

Blauer Hintergrund: Elementgehalt im Luxusbereich

Hellgrüner Hintergrund: Elementgehalt im Normalbereich bzw. Elementverhältnis im harmonischen Bereich

Oranger Hintergrund: Elementgehalt im latenten Mangelbereich bzw. Elementverhältnis außerhalb der Grenzwerte für harmonische Elementverhältnisse

8.4 Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation

Während Bodenanalysen das Nährstoffpotenzial eines Standorts aufzeigen, bilden Nadel- und Blattgehalte von Waldbäumen das verfügbare Nährstoffangebot über den gesamten wurzelerreichbaren Bodenraum ab und sind daher für die Beurteilung des Ernährungszustandes unter dem Einfluss von Standortseigenschaften, Umwelteinflüssen und forstlichen Maßnahmen besonders geeignet. Da die Nährstoffgehalte in Nadeln und Blättern Schwankungen unterliegen, sind bei der Beprobung Faktoren, die die Nährstoffgehalte beeinflussen, zu berücksichtigen. Einen Überblick über die Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation der Waldbäume und die methodischen Voraussetzungen von Nadel- und Blattanalysen als Diagnoseinstrument geben u. a. HEINZE u. FIEDLER (1992), HÜTTL (1992), EVERS (1986), KNABE (1984), REEMTSMA (1964) und WEHRMANN (1959).

Bei allen vier landesweiten Inventuren zur Waldernährung in Niedersachsen wurden standardisierte Probenahmen durchgeführt (KNABE 1981, KNABE 1984, BML 1990, WELLBROCK et al. 2006), um einige Einflussfaktoren einzugrenzen. So lassen sich z. B. Einflüsse durch individuelle genetische Unterschiede, die soziologische Stellung, die Exposition am Baum, die Kronenposition, das Nadelalter oder jahreszeitliche Rhythmen mit einer vereinheitlichten systematischen Erhebung stark reduzieren.

Die spezifischen Ernährungsansprüche der *Baumarten* wurden durch die Verwendung baumartenspezifischer Ernährungskennwerte berücksichtigt.

Die Stichprobenbäume des BZE-Kollektivs umfassen eine weite *Altersspanne*. Die Probebäume waren 2007 zwischen 10 und 223 Jahre alt. Der Einfluss des Baumalters auf die Hauptnährelementgehalte in den Nadeln und Blättern wurde in einer gemeinsamen Auswertung der BZE-Waldernährungsdaten (2007) von Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt mittels einer Kovarianzanalyse geprüft. Für Stickstoff (Fichte, Buche, Eiche), Phosphor (Kiefer, Buche, Eiche), Kalium (Fichte, Eiche), Magnesium (Kiefer, Buche) und Schwefel (Fichte, Buche, Eiche) zeigen sich Abnahmen der Gehalte mit zunehmendem Baumalter. Eine Zunahme mit dem Baumalter tritt bei den Calciumgehalten lediglich in Kiefernadeln auf. Die Änderungen der Hauptnährelementgehalte mit dem Baumalter betragen jedoch pro Jahr maximal 0,2 % des jeweiligen Medians. Für alle Hauptnährelemente gibt es also signifikante Zusammenhänge zwischen den Nadel- und Blattgehalten und dem Baumalter. Die Veränderungen sind jedoch so gering, dass sie bei der Bewertung der Ernährungssituation unberücksichtigt bleiben können.

Auch die Beziehungen zwischen den Hauptnährelementgehalten und den *Nadel- und Blattgewichten* wurden für die BZE-Waldernährungsdaten (2007) von Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt mittels einer Kovarianzanalyse untersucht. Für Kiefer und Buche zeigt sich kein durch das Nadel- bzw. Blattgewicht beeinflusster Trend. Bei den Eichen nehmen die Stickstoffgehalte in den Blättern mit steigendem Blattgewicht ab. In den Fichtennadeln nehmen die Calciumgehalte

mit steigendem Blattgewicht ab und die Phosphorgehalte zu. Insgesamt ist die Beeinflussung der Hauptnährelementgehalte durch die Nadel- und Blattgewichte auf wenige Fälle beschränkt und wurde bei der Bewertung der Ernährungssituation ebenfalls nicht berücksichtigt.

Bei *Einzelehebungen bzw. diskontinuierlich erhobenen Waldernährungsdaten*, wie sie bei der BZE vorliegen, können die durch die zeitliche Fluktuation bedingten Einflüsse auf den Ernährungsstatus nicht eingegrenzt werden (ASCHE 1997, EVERS 1972). Zu jährlichen Fluktuationen im Ernährungszustand führen z. B. die Witterung eines Jahres mit unterschiedlichen Temperatur- und Wasserhaushaltsbedingungen, die Intensität der Fruchtbildung sowie Insekten- und Pilzbefall. Zur Ergänzung der Blatt- und Nadelproben im Rahmen der BZE II in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt wurden im gleichen Zeitraum die Flächen des Intensiven Monitorings und Versuchsflächen zur Kalkung in diesen Ländern beprobt und einheitlich im Labor der NW-FVA analysiert, sodass auch die Vergleichbarkeit zwischen den Ländern und den unterschiedlichen Ebenen des Monitorings gegeben war.

Jahrweise Schwankungen der Blatt- und Nadelinhaltsstoffe können durch unterschiedliche *Witterungsbedingungen* verursacht werden, wenn z. B. witterungsabhängige Prozesse wie die Streuzersetzung, die Mineralisierungsraten oder das Baumwachstum variieren (EVERS 1972, ASCHE 1997). Das Vegetationsjahr 2006/2007 (Oktober 2006 bis September 2007) war deutlich wärmer und niederschlagsreicher als der langjährige Durchschnitt der Klimanormalperiode 1961-1990 (s. Abb. 167) (SUTMÖLLER 2017). Die pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicherung in der Vegetationsperiode 2007 war an den BZE II-Punkten überdurchschnittlich (s. Abb. 168) (SCHMIDT-WALTER et al. 2016), sodass in der Phase der Blatt- und Nadelentwicklung sowie im Probennahmezeitraum 2007 das Risiko für Trockenstress für die Waldbäume an den meisten Stichprobenpunkten sehr gering war. Fruchtbildung sowie Insekten- und Pilzbefall waren im Probennahmejahr durchschnittlich ausgeprägt (DAMMANN et al. 2007).

Die beiden Probennahmejahre der IWE unterschieden sich hinsichtlich der Temperaturverhältnisse. 1983 war die Temperatur überdurchschnittlich und 1984 durchschnittlich. Die Niederschläge entsprachen in beiden Jahren dem Mittel der Referenzperiode 1961-1990.

Auch die Beprobung der BZE I erfolgte in zwei aufeinanderfolgenden Jahren mit unterschiedlichen Witterungsbedingungen. Das Vegetationsjahr 1990 war überdurchschnittlich warm, die Niederschläge erreichten den langjährigen Mittelwert. 1991 lag die Temperatur nur geringfügig über dem langjährigen Mittel, die Niederschläge waren unterdurchschnittlich. Rund 60 % der Fichten und Buchen fruktifizierten 1990 mittel bis stark. Im Folgejahr blieb die Fruktifikation weitgehend aus. Insektenschäden spielten in beiden Jahren eine untergeordnete Rolle.

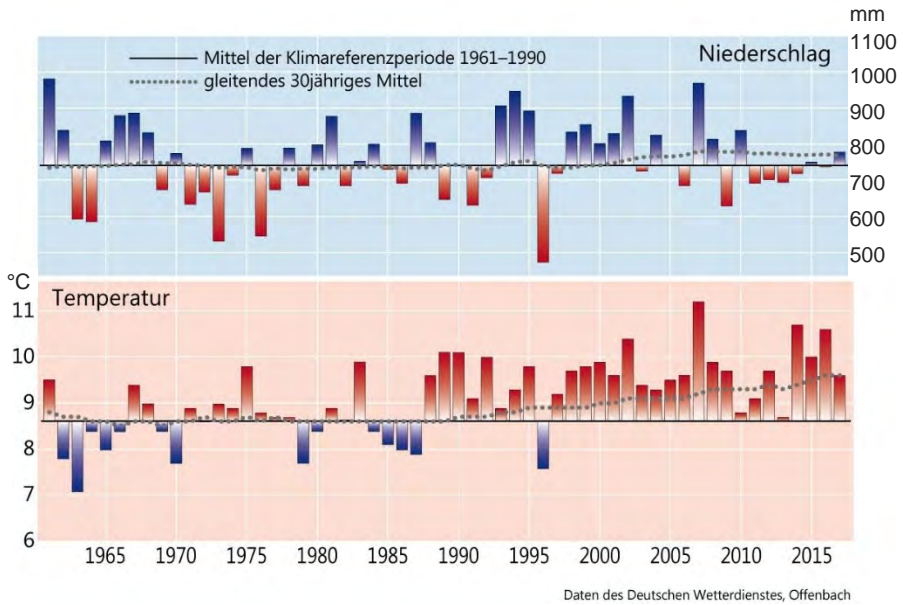


Abbildung 167: Abweichungen von Niederschlag und Temperatur vom Mittel der Klimareferenzperiode 1961-1990 und gleitendes 30-jähriges Mittel in Niedersachsen, Jahreswerte für das Vegetationsjahr (Oktober bis September) (SUTMÖLLER 2017)

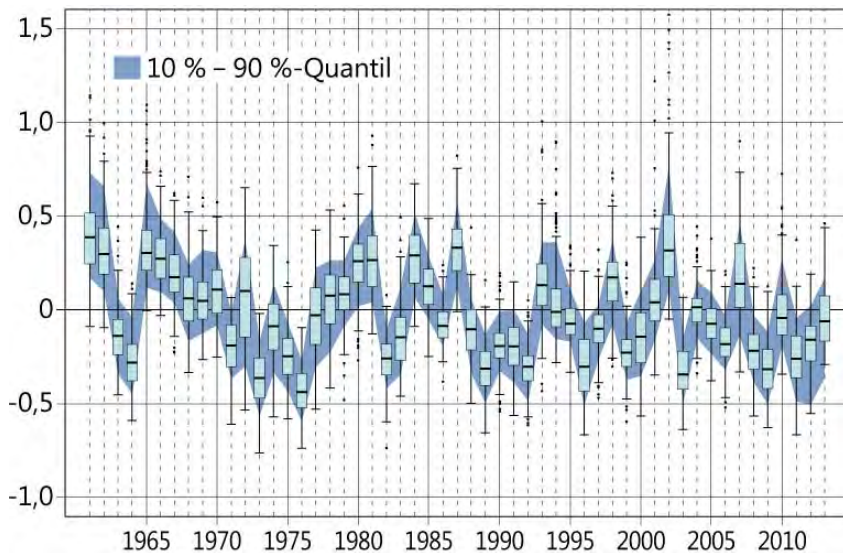


Abbildung 168: Pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicherfüllung in der Vegetationsperiode für die BZE II-Punkte in Niedersachsen im Zeitraum 1961-2013; Verteilung (Median, Quantil-Bereich (25-75 %, 10 %- und 90 %-Quantil)) dargestellt als relative Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 1961-1990 (SCHMIDT-WALTER et al. 2016)

Die Inventur 1996 fällt dagegen durch außergewöhnliche Witterungsbedingungen aus dem Rahmen. In der Messreihe seit 1961 ist das Vegetationsjahr 1996 (Oktober 1995 bis September 1996) das trockenste und nach 1963 das zweitkühlste Jahr in der Zeitreihe. Die Bodenwasserspeicherfüllung in der Vegetationsperiode (s. Abb. 168) ist unterdurchschnittlich. Diese vom Durchschnitt stark abweichenden Witterungsbedingungen sind vermutlich für die Unterschiede einiger, bei der Inventur 1996 erhobenen Nährstoffgehalte gegenüber den Ergebnissen der anderen landesweiten Inventuren verantwortlich. Die Ergebnisse der Blatt- und Nadelanalysen waren bei der Inventur 1996 für Stickstoff (Kiefer, Fichte, Buche), Phosphor (Kiefer) und Calcium (Kiefer) niedriger als bei der BZE I und der BZE II, bei der Eiche wurden 1996 erhöhte Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte festgestellt.

Insgesamt repräsentieren die Ergebnisse der Blatt- und Nadelanalysen 2007 in Niedersachsen aufgrund der guten Wasserversorgung sowie der mittleren Verhältnisse für die Fruchtbildung sowie für den Insekten- und Pilzbefall eine durchschnittliche Ernährungssituation für die untersuchten Waldbäume. Dies ergibt sich auch aus den guten Übereinstimmungen der BZE-Ergebnisse 2007 mit den langjährigen Durchschnittswerten aus dem Intensiven Monitoring. Dies gilt insbesondere für die Kiefer. Bei Fichte, Buche und Eiche ergeben sich Abweichungen z. B. für Phosphor, Calcium und Magnesium, die nicht durch Besonderheiten des Probenahmejahres 2007 entstanden sind, sondern durch standörtliche Unterschiede zwischen beiden Kollektiven und die Kalkungspraxis. Im Intensiven Monitoring sind basenarme Standorte bei Fichte, Buche und Eiche stärker vertreten als in der Stichprobe der BZE; außerdem sind die BZE-Punkte überwiegend gekalkt, während im Intensiven Monitoring die Flächen mehrheitlich nicht gekalkt wurden. Beide Faktoren tragen dazu bei, dass die Calciumgehalte von Fichte, Buche und Eiche und die Magnesiumgehalte von Fichte und Buche in den Nadeln und Blättern im Intensiven Monitoring niedriger liegen als im BZE-Kollektiv.

Die Einflüsse der *chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften* auf die Ernährungssituation der Bäume zeigen die bei der BZE 2007 nach Substratgruppen differenzierten Auswertungen zur Ernährungssituation. Allerdings wurden die natürlichen Standortseigenschaften und damit die Ernährung der Waldbäume in den vergangenen Jahrzehnten und Jahrhunderten durch unterschiedliche Einflüsse modifiziert. Historische Waldnutzungen, anthropogene Stoffeinträge und die Waldkalkung haben zu weitreichenden ökosystemaren Veränderungen geführt.

Historische Waldnutzungen haben in Niedersachsen auf nahezu allen Waldflächen stattgefunden und das heutige Waldbild nachhaltig mitgeprägt. Die Nutzung der Wälder durch den Menschen war vor der Einführung von Kunstdünger und der Verwendung fossiler Energiequellen sehr vielfältig. Vieheintrieb, Köhlerei, Glasverhüttung, Streunutzung und Holzeinschlag für Salinen brachten enorme Entzüge an Nährstoffen mit sich und führten regional zur zeitweisen Entwaldung. In der Folge waren viele Waldstandorte an Nährstoffen verarmt und Stickstoff wurde bis vor

wenigen Jahrzehnten als der begrenzende Faktor für das Wachstum der Waldbestände angesehen (KREUTZER 1993, MELLERT et al. 2004).

Seit den 1960er-Jahren setzte mit den *Säureeinträgen* in die Wälder eine überregionale Beeinflussung der Ernährungssituation ein. Mit den anthropogenen Sulfat- und Schwefeleinträgen haben sich erhebliche chemische Veränderungen des Bodens vollzogen. Beträchtliche Säuremengen sind in den Böden gespeichert. Der Eintrag basischer Stoffe (Calcium, Magnesium, Kalium) wurde stark reduziert und erhebliche Mengen dieser Nährstoffe sind durch Auswaschung mit dem Sickerwasser verlorengegangen. Anhaltend hohe *Stickstoffeinträge* in die Waldökosysteme haben ebenfalls zur Versauerung beigetragen und können u. a. durch die Anregung des Wachstums Nährstoffungleichgewichte induzieren.

Umfangreiche *Kalkungsmaßnahmen* zum Schutz der Böden und zum Ausgleich der versauerungsbedingten Nährstoffverluste haben die Ernährungssituation der Waldbäume ebenfalls beeinflusst. Rund 595.000 ha Wald wurden in Niedersachsen seit Anfang der 1980er-Jahre gekalkt, wobei ein Teil der Waldfläche inzwischen mehrmals gekalkt wurde (JACOB u. ANDREAE 2013).

Die *Effekte von Standort und Witterung* auf die verschiedenen Nährelemente sind unterschiedlich stark. TALKNER et al. (2011) errechneten auf der Basis der Flächen des Intensiven Monitorings in Deutschland die räumliche und zeitliche Varianz verschiedener Elemente in Buchenblättern und Fichtennadeln. Bei der Buche war für die Elemente Calcium, Magnesium und Schwefel der Anteil der räumlichen Varianz an der Gesamtvarianz groß, d. h. die Gehalte dieser Elemente in den Blättern wurden hauptsächlich von standörtlichen Faktoren beeinflusst. Jährliche Schwankungen spielten eine untergeordnete Rolle. Auch für die Kalium- und Phosphorblattgehalte der Buche waren die standörtlichen Faktoren von überwiegender Bedeutung, allerdings spielte die zeitliche Varianz für diese Elemente eine etwas größere Rolle als für Calcium, Magnesium und Schwefel. Bei den Stickstoffblattgehalten wurde hingegen der größte Teil der Varianz durch die zeitliche Komponente erklärt, der Standort spielte eine kleinere Rolle. Für die Fichte ging die Varianz für die Calcium- und Magnesiumgehalte der Nadeln ebenfalls hauptsächlich auf standörtliche Faktoren zurück und auch für Phosphor und Kalium war der räumliche Einfluss groß. Anders als bei der Buche war bei der Fichte für Schwefel der zeitliche Einfluss etwas größer als der räumliche und für Stickstoff zeigte sich ein etwas größerer Einfluss des Standorts im Vergleich zum Beprobungsjahr. Die Bedeutung der Standortverhältnisse für die Verfügbarkeit von Calcium und Magnesium zeigt sich auch im BZE-Kollektiv 2007. Für Fichte, Buche und Eiche ergeben sich für beide Elemente substratabhängige Muster in den Blatt- und Nadelgehalten. Auch für die Kalium-, Schwefel- und Mangangehalte von Fichte und Buche bestehen im BZE-Kollektiv deutliche Unterschiede zwischen den Substratgruppen. Bei der Kiefer werden dagegen kaum Unterschiede in den Elementgehalten zwischen den Substratgruppen festgestellt, da die Kiefer in Niedersachsen vor allem

auf Sanden vorkommt. Auf Bundesebene, wo die Kiefer auch auf reicheren Standorten auftritt, reagiert auch die Kiefer auf die chemische Zusammensetzung der Böden (RIEK et al. 2016). Die Calcium- und Magnesiumgehalte in Kiefernadeln auf Kalkverwitterungsböden und auf Böden mit physiologisch günstigeren Humusformen sind in der bundesweiten BZE am höchsten.

8.5 Diskussion und Bewertung der Ernährungssituation

8.5.1 Stickstoffeutrophierung und Bodenversauerung

8.5.1.1 Stickstoffeutrophierung

Nicht nur die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern sind in der BZE 2007 substratgruppenübergreifend hoch, vielfach werden auch unharmonische N-Quotienten festgestellt. Abweichungen von harmonischen N-Quotienten ergeben sich allerdings nicht nur aufgrund hoher Stickstoffgehalte in Nadeln und Blättern. Vielmehr entstehen unharmonische Verhältnisse auch durch niedrige Blatt- und Nadelgehalte an Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium.

Die Überversorgung mit Stickstoff ist im Westniedersächsischen Tiefland für fast alle BZE-Punkte gegeben, während im Ostniedersächsischen Tiefland und im Niedersächsischen Bergland auch normale Stickstoffgehalte vorkommen. Besonders ausgeprägt ist die Stickstoffüberversorgung bei Kiefer und Eiche. 83 % der Stickstoffgehalte in den Kiefernadeln an den BZE-Punkten liegen 2007 im Luxusbereich, bei der Eiche sind es 74 %, bei der Fichte 50 % und bei der Buche 39 %. Die geringe Variabilität der Stickstoffgehalte in 2007 bei allen untersuchten Baumarten spricht für einen starken, nivellierenden Einfluss der erhöhten Stickstoffeinträge auf die verschiedenen Standorte der BZE. Wegen der hohen Relevanz der Witterung für die jährliche Stickstoffmineralisierung hatte die ausgeglichene Wasserversorgung im Blatt- und Nadelbeprobungsjahr 2007 an fast allen BZE-Punkten vermutlich ebenfalls einen synchronisierenden Einfluss auf die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern. Trotz verschiedener Bemühungen zur Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierender rückläufiger Einträge übersteigt der anorganische atmosphärische Stickstoffeintrag in die Wälder nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Im Mittel der Jahre 2011-2015 lag der jährliche Eintrag auf den niedersächsischen Intensivmonitoringflächen zwischen 13,5 (Ehrhorn Eiche) und 28,1 kg/ha (Solling Fichte) (SCHELER 2017).

Die Effekte hoher Stickstoffeinträge auf die Wälder sind vielfältig und variieren je nach Standort und Baumartenzusammensetzung: Anregung des Wachstums auf stickstofflimitierten Standorten, stickstoffinduzierte Nährstoffungleichgewichte, Verschiebungen im Verhältnis der Spross-/Wurzelbiomasse, Abnahme der Wurzelmykorrhiza, Abnahme der Frosthärte, Anfälligkeit für Pathogene, Veränderung der

Humusqualität, Bodenversauerung, Auswaschung von Nährstoffkationen, Nitratbelastung des Grundwassers (ABER et al. 1989, FLÜCKIGER u. BRAUN 1999, KÖLLING 1991, MELLERT u. KÖLLING 2006).

Einige Autoren gehen davon aus, dass Stickstoff als primär wachstumsregulierender Faktor von anderen Nährelementen wie Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium abgelöst wird (PRIETZEL et al. 2008, BRAUN et al. 2010). FLÜCKIGER et al. (2011) untersuchten in Stickstoffdüngungsversuchen in der Schweiz die Auswirkungen erhöhter Stickstoffbelastungen auf die Stabilität des Waldes. Durch die Stickstoffdüngung wurden für Fichte und Buche generelle Abnahmen der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern sowie eine Zunahme der N/P-Verhältnisse festgestellt. Die Stickstoffdüngung hemmte sowohl die Feinwurzelbildung als auch das Myzelwachstum von Mykorrhizapilzen, mit möglichen negativen Auswirkungen auf die Wasser- und Nährstoffversorgung der Bäume. Ein gehemmtes Triebwachstum trat auf, wenn die Stickstoffdüngung einen Mangel an Phosphor, Magnesium oder Kalium verursachte.

Für die Waldbäume in Niedersachsen ist die Stickstoffernährung von besonderer Bedeutung, da hier die Überversorgung mit Stickstoff im Vergleich zum BZE II-Bundesdurchschnitt (Kiefer, Eiche: 50 %, Fichte, Buche: 25 % Luxusernährung; RIEK et al. 2016) besonders hoch ist und sandige Böden mit eher geringer Basenausstattung vorherrschen.

8.5.1.2 Bodenversauerung

Bis in die 1990er-Jahre war die Schwefeldeposition in den Wäldern der Hauptfaktor der Bodenversauerung. In den 1970er-Jahren wurde der Gesamtsäureeintrag im Solling im Mittel zu 53 % (Buche) bzw. 61 % (Fichte) durch Schwefel und zu 43 % (Buche) bzw. 36 % (Fichte) durch anorganischen Stickstoff verursacht. Mit dem Rückgang der Schwefelemissionen haben sich seitdem die relativen Anteile deutlich verschoben, 2016 lag der Anteil des anorganischen Stickstoffs am Gesamtsäureeintrag auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen zwischen 81 und 91 % (SCHELER 2017).

Schwefel wird von Pflanzen über die Wurzel aus dem Boden und über die Blattorgane aus der Luft aufgenommen (FALLER et al. 1970). Die wirkungsvolle Reduzierung der Schwefeleinträge in die Wälder durch die Luftreinhaltspolitik zeigt sich in der Abnahme der Schwefelgehalte in den Blattorganen aller vier untersuchten Baumarten an den BZE-Punkten sowie in den Fichtennadeln des Intensiven Monitorings. Die bundesweite Auswertung der BZE-Blatt- und Nadelgehalte (RIEK et al. 2016) ergab ebenfalls einen deutlichen Rückgang der Schwefelgehalte zwischen der BZE I und der BZE II für Kiefer, Fichte und Buche. Auf europäischer Ebene (JONARD et al. 2014) zeigte sich eine Abnahme der Schwefelgehalte in Nadeln und Blättern im Zeitraum 1992-2009 für Kiefer, Fichte, Buche und Traubeneiche. Bei Kiefer und

Traubeneiche waren die Abnahmen auf den besser mit Schwefel versorgten Intensivmonitoringflächen höher als auf den Flächen mit Schwefeldefiziten.

Kiefer und Eiche sind 2007 gut mit Schwefel ernährt (95 % bzw. 100 % im Normalbereich). Dagegen zeigen nur 49 % der BZE-Buchenpunkte normale Schwefelblattgehalte, 13 % befinden sich im Mangelbereich. Die Fichten an den BZE-Punkten liegen zu 45 % im Bereich des latenten Schwefelmangels. Im Niedersächsischen Bergland sind für Buche und Fichte Schwefeldefizite häufiger als in den Waldregionen des Tieflandes.

In der Phase hoher Schwefeleinträge in die Wälder wurden die Schwefelgehalte in Nadeln und Blättern als Indikator für Immissionsbelastungen herangezogen. Zum Zeitpunkt der BZE I wurden bundesweit 44 % der Fichten- und 87 % der Kiefernstandorte als belastet (Schwefelgehalte im 1. Nadeljahrgang > 1,4 mg/g) eingestuft (RIEK u. DIETRICH 2000). Im BZE-Kollektiv Niedersachsens entfielen bei der BZE I entsprechend 28 % der Fichten und 58 % der Kiefern in diesen Bereich. 2007 kommen Schwefelgehalte über 1,4 mg/g in Fichten- und Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) nicht mehr vor.

Ein Rückgang der Schwefelgehalte von Fichte und Buche fand im Wesentlichen zwischen der BZE I und der Inventur 1996 statt, anschließend sind die Schwefelgehalte nicht weiter abgesunken. Bei Kiefer und Eiche dagegen verlief die Abnahme zwischen den Erhebungen gleichmäßig. Mit dem Rückgang der anthropogenen Schwefeleinträge in die Wälder sind die Bäume zunehmend auf die Schwefelvorräte im Boden angewiesen. Dies kann auf Böden mit geringen Schwefelvorräten zu einer Unterversorgung führen.

Ein ganz wesentliches Problem der Bodenversauerung stellt der Verlust von Nährstoffen dar, denn mit fortschreitender Bodenversauerung gehen Nährstoffkationen aus dem Boden mit dem Sickerwasser verloren (ULRICH 1982, MEESENBURG et al. 2016, DE VRIES et al. 2014). Damit reduziert sich das Nährstoffreservoir für die Waldbäume. Auf den Intensivmonitoringflächen im Solling (Buche und Fichte) kam es in der Bodentiefe 0-50 cm innerhalb von 40 Jahren zu einer Reduktion der Vorräte an austauschbaren Kationen um 60 % (MEESENBURG et al. 2016).

Die *Calcium- und Magnesiumernährung* der Waldbäume an den BZE-Punkten ist sehr heterogen. Die Variation ist ganz wesentlich durch die Ausstattung der bodenbildenden Gesteine mit Calcium und Magnesium bedingt. Zusätzlich spielen die Austräge von basischen Kationen im Prozess der Bodenversauerung – abhängig von den anthropogen verursachten Eintragsraten – eine Rolle. Weitere Unterschiede entstehen, wenn auf versauerten Standorten mit der Bodenschutzkalkung Calcium und Magnesium zugeführt werden. Während bei den Nadelbäumen und der Buche kaum Calciumdefizite im BZE-Kollektiv auftreten, sind bei der Eiche 21 % der BZE-Punkte im latenten Mangelbereich angesiedelt. Der N/Ca-Quotient ist an 45 % der BZE-Eichenpunkte unharmonisch. Dabei beschränken sich die Calciumdefizite der Eiche fast ausschließlich auf die Sandstandorte.

Zeitliche Veränderungen der Calciumgehalte sind im BZE-Kollektiv nur bei der Fichte im Vergleich zwischen der IWE und der BZE 2007 feststellbar. Die Calciumgehalte in den Fichtennadeln sind zwischen diesen beiden Inventuren angestiegen. Für die übrigen Baumarten sind Unterschiede in den Calciumgehalten weder zwischen den landesweiten Inventuren noch im Intensiven Monitoring aufgetreten. JONARD et al. (2014) stellten dagegen Abnahmen für Buche und Traubeneiche auf den von ihnen untersuchten Flächen fest. In Frankreich (DUQUESNAY et al. 2000) nahmen die Calciumblattgehalte der Buche zwischen 1969/71 und 1996/97 um 16 % ab.

Rund 30 % der Kiefern, Buchen und Eichen weisen 2007 Magnesiumdefizite in den Nadeln bzw. Blättern auf. Bei der Buche befinden sich die Magnesiumgehalte allerdings auch etwa zu einem Drittel im Luxusbereich, während für Kiefer und Eiche an keinem BZE-Punkt eine Luxusernährung mit Magnesium vorkommt. In der BZE-Stichprobe variieren die Magnesiumgehalte (außer bei der Kiefer) mit den Substratgruppen. Auf Grauwacke (Fichte, Buche) und Ton(stein) (Eiche) sind die Magnesiumgehalte in den Nadeln bzw. Blättern am höchsten. Fichten auf Kalkstein und Buchen auf schwach verlehmttem Sand sind schlechter mit Magnesium versorgt. Für Kiefer, Fichte und Eiche hat sich die Magnesiumversorgung auf gekalkten BZE-Punkten gegenüber ungekalkten BZE-Punkten signifikant verbessert.

Auf den Intensivmonitoringflächen und an den BZE-Punkten nehmen die Magnesiumgehalte in den Fichtennadeln zu. Waren bei der IWE noch rund die Hälfte der Fichten unzureichend mit Magnesium ernährt, trifft dies 2007 nur noch auf 5 % der Fichten zu. Diese Entwicklung ist vorrangig Folge der Bodenschutzkalkung. Da die (ungekalkten) Fichtenflächen im Intensiven Monitoring ebenfalls einen Anstieg der Magnesiumgehalte zeigen, kann allerdings zusätzlich auch eine allgemeine Verbesserung der Magnesiumversorgung angenommen werden. Dies deckt sich mit Untersuchungen von JONARD et al. (2014), die für europäische Intensivmessflächen einen Anstieg der Magnesiumgehalte zwischen 1992 und 2009 insbesondere auf Flächen mit niedrigen Magnesiumgehalten in den Fichtennadeln ermittelten. Die Trends der Magnesiumgehalte auf ungekalkten Buchenflächen sind widersprüchlich. In den Buchenbeständen des Intensiven Monitorings in Niedersachsen stiegen die Magnesiumgehalte im Zeitraum 1995-2008 an, auf den hessischen Flächen nahmen sie dagegen ab (DAMMANN et al. 2016). Auf europäischer Ebene gingen die Magnesiumgehalte in Buchenblättern im Zeitraum 1992-2009 vor allem auf Flächen mit guter Magnesiumversorgung zurück (JONARD et al. 2014). Eine Abnahme der Magnesiumgehalte in Buchenblättern ermittelten auch DUQUESNAY et al. (2000) in Frankreich. Zwischen den Erhebungen 1969-1971 und 1996-1997 verringerten sich die Magnesiumgehalte um 38 %.

Eine zusätzliche Bewertung der Magnesiumgehalte nach REEMTSMA (1986), unter Berücksichtigung der Magnesiumgehalte im dritten Nadeljahrgang, ergibt allerdings 2007 eine ungünstigere Einstufung der Magnesiumversorgung der Fichte als die Klassifikation ausschließlich anhand des ersten Nadeljahrgangs.

Da Magnesium ein wichtiger Baustein des Chlorophylls ist, sind Vergilbungen der Nadeln und Blätter ein charakteristisches Kennzeichen für Magnesiummangel. Die Vergilbungsschwelle der Fichte wird bei Magnesiumgehalten unter 0,3 mg/g (im 3. Nadeljahrgang) unterschritten (REEMTSMa 1986), bei der Buche sind sichtbare Mangelsymptome zu erwarten, wenn der Grenzwert von 0,7 mg/g unterschritten wird (GÖTTLEIN 2015). Magnesiumgehalte unterhalb dieser Schwellenwerte sind bei der Erhebung 2007 nur vereinzelt aufgetreten. Vergilbungen waren bis Mitte der 1990er-Jahre häufig („montane Fichtenvergilbung“). Inzwischen tritt diese Mangelerscheinung nur noch selten auf (DAMMANN u. PAAR 2017). Der Rückgang der Vergilbungen als Anzeichen für eine Stabilisierung der Magnesiumgehalte wird durch die waldernährungskundlichen Ergebnisse 2007 bestätigt.

Der Status der *Kaliumernährung* und die ermittelten Trends der Kaliumgehalte sind für die untersuchten Baumarten sehr unterschiedlich. Für Kiefer und Eiche ist die Kaliumernährung substratunabhängig gut (100 % bzw. 87 %). Fichte und Buche befinden sich zu 36 % bzw. 54 % im (latenten) Mangel. Für zwei Drittel der Fichten und Buchen werden außerdem unharmonische N/K-Quotienten festgestellt. Dabei sind die Fichten auf Lehm und schwach verlehmttem Sand besser mit Kalium versorgt als in anderen Substratgruppen. Bei den Buchen treten in allen Substratgruppen Kaliumdefizite auf.

Neben den Kaliumvorräten im Boden spielt bei der Kaliumernährung auch die Kaliumverfügbarkeit eine Rolle. So können auf aggregierten Böden auch bei hohen Kaliumvorräten durch die Prozesse der Bodenversauerung die wurzelerreichbaren Aggregatoberflächen an Kalium verarmt sein (VON WILPERT 2003). Da im Zuge der Bodenversauerung auch die biologische Aktivität nachlässt, können nicht in ausreichendem Maße neue Aggregatoberflächen mit wurzelerreichbarem Kalium gebildet werden, um den Bedarf der Bäume zu decken. Auch Trockenjahre führen zu einer angespannten Kaliumversorgung, wenn Kalium nur unzureichend aus dem Aggregatinnern nachgeliefert werden kann (MEINING et al. 2013). Zudem können antagonistische Effekte durch eine verstärkte Aufnahme an Calcium, Magnesium oder Ammonium eine Senkung der Kaliumgehalte nach sich ziehen (HEINZE u. FIEDLER 1992). Für Fichte und Buche sind die Kaliumgehalte auf den gekalkten Standorten tendenziell niedriger als auf den ungekalkten BZE-Punkten.

Die Kaliumgehalte in den Kiefernadeln sind seit der BZE I angestiegen. Für die Fichte ist sowohl im BZE-Kollektiv als auch im Intensiven Monitoring in Niedersachsen eine Abnahme der Kaliumgehalte signifikant. Für Buche und Eiche ergibt sich im BZE-Kollektiv keine zeitliche Veränderung. Im Intensiven Monitoring in Niedersachsen nehmen die Kaliumgehalte der Buche zwischen 1995 und 2008 zu, in Hessen sind dagegen im gleichen Zeitraum abnehmende Kaliumgehalte festzustellen (DAMMANN et al. 2016). Aus der Literatur ergibt sich kein einheitliches Bild der Veränderungen der Kaliumernährungssituation. In Rheinland-Pfalz (GREVE et al. 2016) nahmen – wie in Niedersachsen – die Kaliumgehalte der Fichtennadeln zwischen der BZE I und der BZE II ab, die der Kiefernadeln zu. In

der bundesweiten BZE verbesserte sich die Kaliumernährung der Fichte von der BZE I zur BZE II leicht, für Kiefer, Buche und Eiche ergab sich keine gerichtete Entwicklung (RIEK et al. 2016). JONARD et al. (2014) ermittelten auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Europa im Zeitraum 1992-2009 Abnahmen der Kaliumgehalte für Traubeneiche und Fichte, bei Buche und Kiefer gab es keine Veränderung.

Die eher angespannte Kaliumversorgung von Fichte und Buche birgt Risiken, denn unausgewogene N/K-Quotienten können die Widerstandsfähigkeit gegenüber Krankheitserregern vermindern (FLÜCKIGER u. BRAUN 2003) und Kaliummangel kann die Frostempfindlichkeit der Fichte erhöhen (HARTMANN et al. 2007). Da Kalium eine wichtige Funktion bei der Aufrechterhaltung des Turgors in den Nadeln und Blättern hat und damit eine wichtige Steuergröße für die Transpiration der Bäume ist, erscheint eine Abnahme der Kaliumgehalte vor dem Hintergrund steigender Temperaturen im Verlauf des Klimawandels kritisch.

Bei *Mangan* ist für alle vier Baumarten die Spannweite der Gehalte besonders groß. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Mangangehalte in den Nadeln und Blättern stark durch Bodeneigenschaften gesteuert werden. Im niedersächsischen BZE-Kollektiv ist allerdings auch die Spanne innerhalb einzelner Substratgruppen weit. Auf Buntsandstein sind die Mangangehalte von Buche und Fichte vergleichsweise hoch, auf Kalk (Buche) und unverlehmtem Sand (Fichte, Buche, Eiche) eher niedrig. Überschreitungen des Normalbereichs treten in Niedersachsen insgesamt selten auf, in Hessen dagegen sind für Kiefer und Eiche Mangangehalte im Luxusbereich die Regel (DAMMANN et al. 2016). Signifikante Unterschiede in den Mangangehalten zwischen gekalkten und ungekalkten BZE-Punkten oder zeitliche Trends werden für die niedersächsischen BZE-Punkte und Flächen des Intensiven Monitorings nicht festgestellt.

Die Verfügbarkeit von Mangan hängt vom Mangangehalt im Boden ab, wird aber vor allem über die pH-Werte im Boden bestimmt. Oberhalb von pH 5 ist Mangan weitgehend im Boden gebunden, zwischen pH 5 und pH 4 geht es verstärkt in Lösung, unterhalb von pH 4 lässt die Bindungsfähigkeit des Bodens für Mangan nach und es kann zu erheblichen Auswaschungsverlusten kommen (ULRICH 1981). Nach AUGUSTIN et al. (2005) wird Mangan unter etwa pH 4,5 verfügbar und ist unter pH 3,5 wegen der Auflösung der Manganoxide nicht mehr pflanzenverfügbar. Dieser nicht-lineare Prozess charakterisiert einen wichtigen Wendepunkt, an dem der Boden vom Austauscher-Pufferbereich in den stark sauren Aluminium-Pufferbereich übergeht. Daher wird Mangan auch als Indikator für Verwitterungsprozesse bzw. Bodenversauerungsprozesse bezeichnet (VON WILPERT 2003, AUGUSTIN et al. 2005). Klare Zusammenhänge zwischen Manganvorräten im Boden und Gehalten in den Nadeln und Blättern bestätigen auch die Untersuchungen von ASCHE (1997), GÄRTNER et al. (1990) und RUSS et al. (2011).

BRAUN u. FLÜCKIGER (2009) nennen Mangantoxizitätsbereiche für Buche (> 1,2-1,5 mg/g) und für Fichte (> 5 mg/g). Die Fichten im BZE-Kollektiv in

Niedersachsen erreichen 2007 diese toxischen Bereiche nicht. Bei der Buche liegen allerdings im BZE-Kollektiv 2007 29 der 69 Buchenproben über 1,2 mg/g, 24 Buchenproben überschreiten auch die Schwelle von 1,5 mg/g. Die Buchenblattproben der BZE 2007 wiesen jedoch keine sichtbaren Anzeichen für Mangantoxizität auf. Hohe Stickstoffeinträge, zunehmende Verarmung der Bäume an Phosphor und Magnesium sowie vermehrter Witterungsstress dürften das Auftreten von Mangantoxizität fördern (BRAUN u. FLÜCKIGER 2009).

Eisen wird wie Mangan im Prozess der Bodenversauerung mobil. Eine verstärkte Mobilisierung von Eisen in der Bodenlösung setzt unter pH-Werten von 3,8 ein (Eisen-Pufferbereich). Die vier untersuchten Baumarten sind weitgehend (88-100 %) gut mit Eisen versorgt, ein (latenter) Mangel oder eine Überversorgung sind 2007 im BZE-Kollektiv sehr selten. Für Kiefer, Fichte und Buche haben die Eisengehalte in den Nadeln bzw. Blättern seit der ersten Erhebung deutlich abgenommen.

Trotz der bereits erzielten Erfolge zur Minderung der Säureinträge in die Wälder ist zu erwarten, dass die Auswaschung von Nährstoffen weiter fortschreitet und die Bodenversauerung weiterhin einen starken negativen Einfluss auf die Nährstoffversorgung der Wälder hat.

8.5.2 Phosphorernährung

Defizite in der Phosphorernährung sind bei der BZE 2007 für alle vier untersuchten Baumarten festzustellen. Die Anteile an Phosphorgehalten im (latenten) Mangelbereich unterscheiden sich zwischen den Baumarten (Kiefer: 15 %, Fichte: 20 %, Eiche: 42 %, Buche: 77 %). Im Bereich unharmonischer N/P-Quotienten befinden sich 19 % der Kiefern, 45 % der Fichten, 53 % der Eichen und 99 % der Buchen.

In besonderem Maße ist die Buche betroffen, bei der sich die unzureichende Phosphorversorgung über alle Substratgruppen erstreckt. Dieser Befund überrascht, da zum einen der Eintrag von Phosphor auf dem Luftweg in die Wälder zu vernachlässigen ist (MOHREN et al. 1986) und zum anderen für die Verfügbarkeit von Phosphor, d. h. die Mobilisierung bzw. Fixierung von Phosphor, vor allem Bodeneigenschaften wie die Verwitterungsrate, der Versauerungsgrad und die biologische Aktivität des Bodens als bestimmende Faktoren genannt werden (RUMPF et al. 2008). Offenbar werden diese standörtlichen Faktoren durch überregional wirksame Einflüsse, wie z. B. die Stickstoffdeposition und den Klimawandel überlagert.

Hohe Stickstoffeinträge können eine angespannte Phosphorernährung zur Folge haben (MOHREN et al. 1986, BRAUN et al. 2010, JONARD et al. 2014). In Stickstoffdüngungsexperimenten auf Fichten- und Buchenflächen in der Schweiz bewirkte die Stickstoffzugabe eine Abnahme der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern, während die Stickstoffgehalte nur moderat anstiegen (BRAUN et al. 2010). Zusammen mit dem Anstieg der Temperatur in den letzten Jahrzehnten bewirken die anthropogenen Stickstoffeinträge ein gesteigertes Wachstum der Waldbäume und können dadurch Nährstoffungleichgewichte induzieren, die auch Phosphor

betreffen. Die Wirkungen eines Überangebots von Stickstoff auf die Phosphorversorgung der Bäume sind vielfältig. So wird u. a. das für die Phosphoraufnahme wichtige Mykorrhizawachstum gehemmt (NILSSON u. WALLANDER 2003), die Zusammensetzung der mikrobiellen Bodengemeinschaften verändert (WALDROP et al. 2004) und der Abbau der organischen Substanz gestört (PEÑUELAS et al. 2013).

Auch der Anstieg der Temperatur in den letzten Jahrzehnten könnte für die Phosphornahrung von Bedeutung sein. PEUKE u. RENNENBERG (2004) stellten an Buchensämlingen nach einer Trockenperiode eine Abnahme der Phosphorgehalte in allen Pflanzengeweben fest. Im Zusammenwirken mit der Verlängerung der Vegetationszeit (FABIAN u. MENZEL 1998), dem Anstieg der Temperatur (IPCC 2014) und erhöhten CO₂-Emissionen (CEULEMANS et al. 1999) haben hohe Stickstoffeinträge nicht nur eine Wachstumssteigerung (SOLBERG et al. 2009, LAUBHANN et al. 2009), sondern auch eine Intensivierung der Fruktifikation bewirkt. Nicht auszuschließen ist, dass die seit ca. 25 Jahren beobachtete intensive Fruchtbildung der Buche (PAAR et al. 2011, SCHMIDT 2006) zu einer Abnahme der Phosphorgehalte in den Buchenblättern beiträgt, denn in Jahren mit Fruchtbildung besteht erhöhter Phosphorbedarf. KHANNA et al. (2009) ermittelten für eine Buchenfläche im Solling Phosphorfrachten mit dem Streufall, die in Mastjahren 8,1 kg/ha betragen, in Jahren ohne Mast dagegen nur 2,7 kg/ha.

TALKNER et al. (2015) verweisen darauf, dass aufgrund des hohen Phosphorbedarfs der Bäume bei nur geringen Phosphoreinträgen in die Wälder dem internen Phosphorkreislauf besondere Bedeutung zur Erhaltung der Phosphorverfügbarkeit zukommt. Die Verfügbarkeit von Phosphor im Boden ist im Vergleich zu anderen Makronährelementen niedrig (PEUKE u. RENNENBERG 2004, BLUME et al. 2010). Deshalb spielt die Wiederverwertung von Phosphor aus dem Streufall durch Mineralisierung eine wichtige Rolle im Phosphorkreislauf (YANAI 1992). Außerdem wird ein Teil des Phosphors im Herbst aus den Blättern in den Baum zurückverlagert und kann bei Bedarf wiederverwertet werden. Hierzu passt die Beobachtung von KHANNA et al. (2009) auf Buchen-Intensivmessflächen, wo bei einer angespannten Phosphornahrungssituation im Solling und im Göttinger Wald 47-51 % des Phosphors aus den Buchenblättern in die Bäume zurückverlagert wurden, während es auf der Fläche Zierenberg mit hohen Phosphorblattgehalten nur 25 % waren.

Geringe Phosphorgehalte in den Blättern können ein verringertes Wachstum der Buche bewirken. Bei Untersuchungen in der Schweiz (FLÜCKIGER et al. 2011) war bei Phosphorgehalten unter 1,0 mg/g der Zuwachs der Buchen vermindert. In der gleichen Studie nahm das Triebwachstum bei steigenden Phosphorgehalten zu, bis ein Blattgehalt von ca. 1,0 mg P/g erreicht war. Der Großteil der Buchen (61 %) im BZE-Kollektiv befindet sich 2007 im Bereich latenten Mangels, wo noch keine Wachstumseinbußen zu erwarten sind.

Im BZE-Kollektiv und im Intensiven Monitoring in Niedersachsen wird kein zeitlicher Trend für die Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern festgestellt. In anderen Untersuchungen wird von abnehmenden Phosphorgehalten berichtet. Auf

hessischen Intensivmonitoringflächen nahmen die Phosphorgehalte in den Buchenblättern zwischen 1995 und 2008 ab (DAMMANN et al. 2016). In Frankreich wurden Abnahmen von 23 % zwischen 1969/1971 und 1996/1997 (DUQUESNAY et al. 2000) ermittelt. In der Schweiz nahmen die Phosphorgehalte zwischen 1984 und 2007 um 27 % ab (FLÜCKIGER et al. 2011). Die Auswertung von 79 Buchen-Intensivmonitoringflächen in Europa (TALKNER et al. 2015) ergab eine Abnahme der Phosphorgehalte von 13 % innerhalb von 20 Jahren (1991-2010). Diese Abnahme erfolgte unabhängig von der Höhe der Phosphorgehalte in den Buchenblättern. Weniger eindeutig sind die Trends zur Phosphorernährung der Fichte. Eine Abnahme der Phosphorgehalte in Fichtennadeln wurde z. B. in Rheinland-Pfalz (GREVE et al. 2016) und in der Schweiz (FLÜCKIGER et al. 2011) ermittelt, auf europäischer Ebene ergab sich kein Trend (JONARD et al. 2014).

Anhaltend hohe Stickstoffeinträge und klimatische Veränderungen könnten die angespannte Phosphorernährungssituation verschärfen. Weitere Untersuchungen zu den Regulierungsmechanismen der Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor und zu den Ursachen der abnehmenden Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern sind daher notwendig.

8.5.3 Bodenschutzkalkung

In Niedersachsen wird die Kalkungsbedürftigkeit von Waldbeständen auf der Basis des Standortstyps aus der Standortskartierung unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte festgelegt (NW-FVA 2010). Als kalkungsbedürftig werden Standorte mit Nährstoffzahlen zwischen 2 und 4 eingeschätzt. Sehr nährstoffreiche und ausgesprochen nährstoffarme Standorte, wasserbeeinflusste Standorte sowie Standorte mit Kalkstein oder Geschiebemergel sind von der Kalkung ausgeschlossen. Liegen keine Ergebnisse aus der Standortskartierung vor oder sind diese deutlich veraltet, so können in Zweifelsfällen der pH-Wert und die Humusform (typischer Moder oder schlechter) als Entscheidungskriterien für die Kalkungsbedürftigkeit herangezogen werden. Eine Kalkungsbedürftigkeit liegt bei einem pH(KCl)-Wert < 4,5 im Unterboden (30-60 cm Bodentiefe) vor.

Ziel der kompensatorischen Bodenschutzkalkung ist es, die im Folgenden genannte Wirkungskette zu unterstützen:

- Verringerung der Risiken aus bereits abgelaufener und aktueller Bodenversauerung
- Erhöhung der Speicherfähigkeit der Böden für Nähr- und Schadstoffe
- Stabilisierung des Ernährungszustandes
- Verbesserung der Vitalität der Bestände (Belaubungs- und Vergilbungsgrad)
- Förderung der Durchwurzelung des Mineralbodens
- Förderung der Bodenvegetation

- Förderung der bodenwühlenden Fauna und der Entwicklung hin zu Mineralboden-Humusformen

In der BZE-Stichprobe von Niedersachsen werden 2007 positive Kalkungseffekte auf die *Magnesiumgehalte* der Blätter und Nadeln für Fichte, Kiefer (auf unverlehmtem Sand) und Eiche ermittelt. Erhöhte Magnesiumgehalte an gekalkten BZE-Punkten wurden für alle vier Baumarten auch in der bundesweiten BZE und in Versuchen zur wissenschaftlichen Begleitung der Bodenschutzkalkung ermittelt (RIEK et al. 2016, EVERS et al. 2008, GUCKLAND et al. 2011, GREVE 2014). Ein Einfluss auf die *Calciumgehalte* wird im niedersächsischen BZE-Kollektiv nicht nachgewiesen, während die Auswertung der bundesweiten BZE-Daten für Buche und Eiche höhere Calciumgehalte in den Blättern der gekalkten gegenüber den ungekalkten BZE-Punkten ausweist (RIEK et al. 2016) und auch in Versuchen zur Bodenschutzkalkung solche Effekte beschrieben werden (EVERS et al. 2008, VON WILPERT 2003, HUBER et al. 2006, GREVE 2014). Eine Verbesserung der Calcium- und Magnesiumversorgung nach Kalkungsmaßnahmen erfolgt umso stärker, je schlechter die ursprüngliche Versorgung mit diesen Elementen ist (GUCKLAND et al. 2011), und steigt mit der Kalkungshäufigkeit (RIEK et al. 2016).

An den BZE-Punkten ist für die gekalkten Standorte 2007 keine signifikante Erhöhung der *Phosphorgehalte* festzustellen. Die in Niedersachsen z. T. erfolgte Zugabe von Phosphor mit der Kalkung auf Flächen im Tiefland hat zumindest im BZE-Kollektiv nicht zu einem signifikanten Unterschied zwischen gekalkten und nicht gekalkten Standorten geführt. In der Literatur finden sich Studien zu einer Erhöhung der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern im Anschluss an Kalkungsmaßnahmen (KULHAVÝ et al. 2009, DAMMANN et al. 2016). Häufiger wird kein Kalkungseffekt nachgewiesen (GUCKLAND et al. 2011, JONARD et al. 2010, VON WILPERT 2003). HAYNES (1982) geht davon aus, dass auf versauerten Standorten die Verfügbarkeit von Phosphor für die Pflanzen sehr komplex und schwer zu definieren ist. Bei der Kalkung von sauren Böden werden in Abhängigkeit von individuellen Bodeneigenschaften unterschiedliche Mechanismen wirksam, die sowohl eine Abnahme, ein Gleichbleiben als auch eine Zunahme der Phosphoraufnahme durch die Bäume hervorrufen können.

Effekte der Bodenschutzkalkung auf die Höhe der *Kaliumgehalte* in Blättern und Nadeln werden in der Literatur nicht einheitlich beschrieben. Von Abnahmen nach (wiederholten) Kalkungsmaßnahmen berichten EVERS et al. (2008), WEIS et al. (2009) und RIEK et al. (2016). Keine Veränderung beobachteten HUBER et al. (2006), KULHAVÝ et al. (2009) und JONARD et al. (2010). An den gekalkten BZE-Punkten in Niedersachsen waren für Fichte und Buche tendenziell niedrigere Kaliumgehalte als an den ungekalkten BZE-Punkten zu beobachten. Auf den Versuchsflächen zur Bodenschutzkalkung fanden GUCKLAND et al. (2011) abnehmende Kaliumgehalte bei Buche und Fichte nach Kalkungsmaßnahmen und führten diesen Effekt auf Ionenkonkurrenz zurück. Bei der Buche gab es einen Zusammenhang mit den Calciumgehalten, bei der Fichte mit den Magnesiumgehalten im Boden. GREVE (2014)

weist darauf hin, dass niedrigere Kaliumgehalte in Fichtennadeln gekalkter Standorte auch eine Folge reduzierten Bedarfs sein können. Möglicherweise übernimmt z. B. das mit der Kalkung zugeführte Magnesium pflanzenphysiologische Funktionen von Kalium.

Die *Schwefelernährung* der Buchen und Fichten ist an den gekalkten BZE-Punkten 2007 tendenziell anagespannter als an den ungekalkten. Im bundesweiten BZE-Datensatz waren die Schwefelgehalte von Fichten und Eichen an den gekalkten BZE-Punkten signifikant niedriger als an den ungekalkten (RIEK et al. 2016)

Ein Einfluss der Waldkalkung auf die *Stickstoffgehalte* in den Nadeln und Blättern lässt sich für die BZE-Stichprobe nicht nachweisen. Ebenfalls keinen oder nur geringe Kalkungseffekte auf die Stickstoffgehalte fanden HUBER et al. 2006, KULHAVÝ et al. 2009, JONARD et al. (2010) und RIEK et al. (2016).

Auch die *Eisen-, Mangan- und Zinkgehalte* der Nadeln und Blätter sind an den gekalkten und ungekalkten BZE-Punkten in Niedersachsen 2007 gleich hoch. In der bundesweiten BZE II-Auswertung zeigten sich dagegen höhere Zinkgehalte an gekalkten Fichten- und Buchenpunkten. Für Eisen (alle vier Baumarten) und Mangan (Fichte und Buche) wurden im bundesweiten Datensatz verringerte Nadel- und Blattgehalte nach (wiederholter) Kalkzufuhr beobachtet (RIEK et al. 2016).

Mit dem Beginn der Bodenschutzkalkung in Niedersachsen wurden Versuchsflächen angelegt, um die Auswirkungen der Bodenschutzkalkungen durch wissenschaftliche Studien zu begleiten. In faktoriellen Versuchsanordnungen sind die Randbedingungen für gekalkte Parzellen und Kontrollparzellen relativ einheitlich, sodass Kalkungseffekte statistisch absicherbar sind. Im Kollektiv der BZE ist ein paarweiser Vergleich von gekalkten und ungekalkten Punkten nicht möglich und die Varianz in den Daten aufgrund des sehr weiten Standortsspektrums, unterschiedlicher Eintragungssituationen, Kalkungszeitpunkten und -mengen sehr groß, sodass signifikante Unterschiede seltener sind. Die BZE ist notwendig, um die Flächenrelevanz der Versuchsergebnisse zu ermitteln, und ist damit eine zusätzliche Stütze für die weitere Planung der Bodenschutzkalkung. Die auf den Versuchsflächen zur Bodenschutzkalkung festgestellte Verbesserung der Calcium- und Magnesiumgehalte nach Kalkungen (EVERS et al. 2008, GUCKLAND et al. 2011) zeigt sich für Magnesium auch an den BZE-Punkten. Die geringeren Kaliumgehalte gekalkter Versuchsparzellen gegenüber der Kontrolle bestätigten sich im Kalkungsvergleich der BZE-Punkte hingegen nicht durch signifikante Unterschiede. Für Fichte und Buche wurde allerdings eine Tendenz zu geringeren Kaliumgehalten an den gekalkten Punkten festgestellt.

Obwohl die Säureeinträge in die Wälder durch Luftreinhaltemaßnahmen stark reduziert wurden, werden z. T. immer noch die kritischen Belastungsgrenzen für Säure überschritten (MEESENBURG 2016). Die Ergebnisse der BZE II zeigen, dass zur Kalkung empfohlene, aber bislang noch ungekalkte Standorte seit der BZE I weiter versauert sind (s. Kapitel 1.10.3). Auch die im Boden gespeicherten Säurelasten beeinträchtigen weiterhin die Bodenfunktionen. Daher wird sich auch die

Auswaschung von Nährstoffen aus dem Wurzelraum der Bäume voraussichtlich weiter fortsetzen. Zur Stabilisierung der Waldökosysteme ist in Niedersachsen die Fortführung standortsangepasster Kalkungsmaßnahmen vorgesehen. Bei der Kalkungsplanung sind aus Sicht der Waldernährung neben den Aspekten der Verminderung von Auswirkungen der Bodenversauerung auch die möglichen negativen Wirkungen der Kalkung auf die Kaliumernährung der Waldbäume zu berücksichtigen.

8.5.4 *Vollbaumnutzung*

Neben den standörtlichen Gegebenheiten können Informationen zum Ernährungszustand der Waldbäume auch zur Steuerung der Nutzung von Nichtderbholz herangezogen werden. Da die Nadel- und Blattprobennahme an den BZE-Punkten 2007 unter durchschnittlichen Rahmenbedingungen (Witterung, Insektenbefall, Fruchtbildung) stattfand, geben die BZE-Ernährungsdaten mittlere Verhältnisse der Ernährungssituation in Niedersachsen wieder. Die Nährstoffgehalte und Stickstoffquotienten der Momentaufnahme BZE 2007 sind daher geeignet, um Hinweise für betriebliche Fragestellungen, wie die Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung, abzuleiten.

Mit veränderten energiepolitischen Rahmenbedingungen und neuen Möglichkeiten der Aufarbeitung und Verwertung haben sich neue Märkte für forstliche Biomasse entwickelt (BLOCK u. MEIWES 2013, RASPE u. GÖTTLEIN 2008). Bei der konventionellen Derbholznutzung verbleiben die nährstoffreichen Äste (< 7 cm Durchmesser), Zweige, Nadeln und Blätter im Wald und damit dem Nährstoffkreislauf erhalten, während bei einer Vollbaumnutzung alle oberirdischen Baumkompartimente dem Nährstoffkreislauf der Wälder entzogen werden. Bei der Vollbaumnutzung werden daher im Vergleich zur Derbholznutzung überproportional mehr Nährstoffe entnommen. Für eine Intensivierung der Nutzung unterhalb der Derbholzgrenze sollte sich die Wahl der dafür geeigneten Baumarten und Standorte deshalb an den Standortspotenzialen und der Ernährungssituation ausrichten. Die Bewertung des Ernährungszustandes im Hinblick auf die Einschätzung unterschiedlicher Intensitäten der Nutzung wird hier wie folgt vorgenommen:

(1) Befinden sich die Mediane der Hauptnährelemente (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel) in den Nadeln und Blättern, d. h. die Hälfte der BZE-Punkte einer Substratgruppe, innerhalb bzw. oberhalb des Normalbereichs und die Stickstoffquotienten im Bereich harmonischer Elementverhältnisse, liegen aus waldernährungskundlicher Sicht keine Ausschlussgründe für eine Intensivierung der Nutzung vor.

(2) Befindet sich der Median eines Nährstoffs einer Substratgruppe im latenten Mangelbereich und/oder ein Stickstoffquotient außerhalb der harmonischen Elementverhältnisse, sollte eine Intensivierung der Nutzung nur eingeschränkt (nach Prüfung der örtlichen Verhältnisse) erfolgen.

(3) Befindet sich der Median eines Hauptnährelements im Mangelbereich, also unter der Symptommgrenze, so wird dies für die betroffene Substratgruppe aus waldernährungskundlicher Sicht als Ausschlussgrund für eine Intensivierung der Nutzung gewertet. Dies kam 2007 bei keiner der untersuchten Baumarten im BZE-Kollektiv vor.

Die flächendeckende, repräsentative Stichprobenerhebung der BZE deckt ein sehr weites Spektrum von Waldstandorten ab. Die Anzahl der verschiedenen Substratgruppen, auf denen die einzelnen Baumarten wachsen, ist hoch. Die Anzahl der Stichprobenpunkte pro Substratgruppe ist dagegen oftmals gering. Substratspezifische Aussagen zur Biomassenutzung beschränken sich hier deshalb auf die Hauptsubstrate der Baumarten.

Die Kiefer insgesamt und auch die Kiefer in den Hauptsubstratgruppen auf Sand erfüllen die unter (1) genannten Voraussetzungen für die Nutzung. Die bessere und ausgewogenere Ernährung der Kiefern an gekalkten BZE-Punkten spricht jedoch für eine Bevorzugung gekalkter Bestände bei der Vollbaumnutzung. Die bei der Kiefer festgestellten Phosphordefizite sind im Vergleich der Substratgruppen auf unverlehmtem Sand seltener als auf verlehmttem Sand. Magnesiumdefizite können z. T. durch Kalkungsmaßnahmen kompensiert werden.

Aus der Ernährungssituation der Fichte ergeben sich Einschränkungen für eine Vollbaumnutzung aufgrund von Defiziten in der Kaliumernährung. In fast allen Hauptsubstratgruppen befindet sich entweder der Median der Kaliumgehalte in den Fichtennadeln im latenten Mangelbereich und/oder die N/K-Quotienten zeigen unharmonische Verhältnisse an. Hinzu kommt, dass die Kaliumgehalte zwischen den landesweiten Inventuren abgenommen haben und auch die Trends aus dem Intensiven Monitoring eine Abnahme der Kaliumgehalte anzeigen. Einzige Ausnahme sind die Fichten auf schwach verlehmttem Sand; hier befindet sich der Median der Kaliumgehalte im Normalbereich und der Median der N/K-Quotienten im harmonischen Bereich, sodass hier aufgrund der Ernährungssituation keine Einschränkungen für die Nutzung bestehen.

Die bei allen drei landesweiten Inventuren und im Intensiven Monitoring feststellbare unzureichende Phosphorversorgung der Buche und ausgeprägte Kaliumdefizite lassen eine Ausweitung der Nutzung unterhalb der Derbhholzgrenze für die Buche aus waldernährungskundlicher Sicht nicht zu.

Nur die Eiche auf Lösslehm entspricht den unter (1) genannten Kriterien, sodass hier aus der Ernährungssituation keine Restriktionen für eine intensivere Nutzung der Eiche in dieser Substratgruppe abzuleiten sind. In den anderen Substratgruppen führen Phosphor- oder Calciumdefizite sowie unausgewogene Stickstoffquotienten zu der Einschätzung, dass eine Vollbaumnutzung nur nach vorheriger Prüfung der örtlichen Verhältnisse empfohlen werden kann.

8.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse von Blatt- und Nadelanalysen ermöglichen eine unmittelbare Einschätzung der Versorgung der Waldbäume mit Nährstoffen und der Belastung mit Schadstoffen. Diese waldernährungskundlichen Daten können zur Bewertung von Bodenveränderungen durch Versauerung und Eutrophierung, zur Erfolgskontrolle von Luftreinhaltemaßnahmen und Bodenschutzkalkungen sowie zur Waldbewirtschaftung (z. B. Energieholznutzung) beitragen. Im Beprobungsjahr 2007 waren die Rahmenbedingungen (Witterung, Insekten- und Pilzbefall, Fruchtbildung) für die Blatt- und Nadelanalyse durchschnittlich, sodass die BZE II-Ernährungsdaten mittlere Verhältnisse abbilden. Dies ergibt sich auch aus der guten Übereinstimmung der langjährigen Mediane der Elementgehalte und Stickstoffquotienten der Kiefernadeln des Intensiven Monitorings mit der Ernährungssituation der Kiefer im BZE-Kollektiv 2007. Die Nährstoffgehalte und Stickstoffquotienten der Momentaufnahme 2007 sind daher geeignet, die Ernährungssituation der Hauptbaumarten in Niedersachsen zu bewerten.

Relativ entspannt ist die Ernährungssituation der Kiefer. Als einzige der untersuchten Baumarten befinden sich bei der Kiefer im BZE-Kollektiv 2007 alle untersuchten Nährelemente (Median) mindestens im Normalbereich und auch die Mediane der Stickstoffquotienten liegen ausschließlich innerhalb der Grenzwerte harmonischer Ernährung. Fast die Hälfte der Kiefernpunkte weist 2007 keinen (latenten) Mangel an Hauptnährstoffen oder unharmonische Stickstoffquotienten auf. Bei Fichte, Buche und Eiche ist dagegen eine gute und ausgewogene Versorgung mit Hauptnährstoffen mit 5 %, 2 % bzw. 10 % selten.

Phosphordefizite sind weit verbreitet. Vor allem die Buche weist substratübergreifend (latenten) Phosphormangel auf (77 % der Buchenpunkte), bei der Eiche sind es 42 %. Kiefer und Fichte sind hingegen besser mit Phosphor versorgt, 15 % bzw. 20 % zeigen (latenten) Phosphormangel. Auch Kaliumdefizite sind häufig (36 % der Fichten, 54 % der Buchen und 13 % der Eichen). Calciumdefizite gibt es bei der Eiche (21 %). Knapp ein Drittel der Kiefern, Buchen und Eichen weisen Magnesiumdefizite auf. Eine unzureichende Schwefelversorgung wird für rund 50 % der Fichten und Buchen festgestellt.

Substratabhängige Muster für die Ernährungssituation zeigen sich bei den Kiefern 2007 kaum. In den Hauptsubstratgruppen (unverlehmte und schwach verlehmte Sande) sind die Kiefern überwiegend gut und ausgewogen ernährt. Die Nährstoffversorgung der Fichten ist auf schwach verlehmttem Sand (neben Kalk- und Lehmstandorten) und die der Eichen auf Lösslehm besser und ausgewogener als auf anderen Substraten. Die Ernährungssituation der Buchen ist aufgrund niedriger Phosphor-, Kalium- und Schwefelgehalte in allen Substratgruppen angespannt.

Die aus der Ernährungssituation abgeleiteten Empfehlungen zur Vollbaumnutzung ergeben für die Kiefer nach den hier verwendeten Kriterien keine Einschränkungen für die Vollbaumnutzung. Bei Fichte und Eiche sind nur wenige Standorte

geeignet und für die Buche kann eine Ausweitung der Nutzung unterhalb der Derbholtzgrenze nicht empfohlen werden.

In Niedersachsen wurden bisher drei (für die Fichte vier) landesweite Ernährungsinventuren durchgeführt. Seit der ersten Erhebung haben sich einige Faktoren, die die Ernährung der Waldbäume beeinflussen, verändert. Die starke Reduktion der Schwefelemissionen führte zu einer Abnahme der Schwefelgehalte in den Blättern und Nadeln aller vier Baumarten. Dass bislang nur eine geringe Verminderung der Stickstoffeinträge erreicht wurde, zeigt sich an den gleichbleibend hohen Stickstoffgehalten in den Blattorganen, besonders ausgeprägt bei Kiefer und Eiche sowie für alle vier Baumarten im Nordwestniedersächsischen Tiefland. Mit der systematischen Bodenschutzkalkung wurde in den 1980er-Jahren begonnen. Dies hat sich auf die Bodeneigenschaften und die Nährstoffverfügbarkeit für die Waldbäume ausgewirkt und führte insbesondere zu einer Erhöhung der Magnesiumgehalte. Mit der Bodenschutzkalkung lassen sich Defizite in den Magnesium- und Calciumgehalten und unharmonische Elementverhältnisse ausgleichen. Bei Fichte und Buche besteht nach Wiederholungskalkungen das Risiko verminderter Kaliumgehalte. Die mit der Bodenversauerung verbundene Nährstoffauswaschung aus dem Boden wird sich voraussichtlich fortsetzen, sodass die Bodenversauerung weiterhin ein wesentlicher Einflussfaktor für die Ernährungssituation der Waldbäume bleibt.

Insgesamt lassen sich die Maßnahmen zur Luftreinhaltung, zur Bodenschutzkalkung und die Situation zur Bodenversauerung anhand der Blatt- und Nadelinhaltsstoffe im Rahmen der BZE nachvollziehen. Es zeigt sich, dass landesweite Inventuren mit mehrjährigen Intervallen die Ernährungssituation und die Nährstoffverfügbarkeit über lange Zeiträume plausibel abbilden können. Allerdings machen die Ergebnisse der Inventur 1996 deutlich, dass bei diskontinuierlichen Erhebungen nicht auszuschließen ist, dass jährliche Schwankungen der Nadelinhaltsstoffe langfristige Trends überlagern. Zur Bewertung waldernährungskundlicher Ergebnisse hat sich die im Forstlichen Umweltmonitoring praktizierte Kombination aus landesweiten Inventuren mit einer hohen Anzahl an Beprobungspunkten im mehrjährigen Turnus (BZE) und Nadel- und Blattanalysen von regelmäßig im ein- bis zweijährigen Turnus beprobten, ausgewählten Flächen (Intensives Monitoring) und Experimentalflächen als sinnvoll erwiesen.

9 Vegetation

Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Uwe Paar, Jan Evers

9.1 Einführung

Im Zuge der Bodenzustandserhebung II wurde in den Bundesländern Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt erstmalig die Waldvegetation auf der Grundlage einer systematischen, repräsentativen Stichprobe erfasst. Die gemeinsame Auswertung der an denselben Stichprobenpunkten erfassten Vegetationsdaten und Umweltvariablen (insbesondere bodenchemische Kenngrößen) ermöglicht Aussagen zu den Zusammenhängen zwischen der Pflanzenartenzusammensetzung der Waldbestände und dem Bodenzustand. Nachfolgend sollen Ergebnisse zu den Kenngrößen pH(H₂O), Basensättigung und dem C/N-Verhältnis sowie zu den austauschbaren Vorräten der basischen Kationen Calcium, Magnesium und Kalium aus der Ake (effektive Kationenaustauschkapazität), jeweils bezogen auf den mineralischen Oberboden, vorgestellt werden.

Es ist ein Hauptziel der Darstellung dieser Ergebnisse, dass die Erkenntnisse über Zusammenhänge zwischen dem Vorkommen von weit verbreiteten Pflanzenarten und dem Auftreten bodenchemischer Kenngrößen direkt in der Praxis Anwendung finden können. Dabei wird in erster Linie die Identifizierung von Indikator- oder Zeigerarten(-gruppen) für die Forstliche Standortskartierung angestrebt. Diese können für eine Feldeinschätzung des chemischen Oberboden-zustandes sowie des Nährstoffhaushaltes (Trophie) von Waldböden herangezogen werden oder als zusätzliche Informationsquelle dienen.

9.2 Methodik

9.2.1 Datenerhebung

Für alle BZE-Punkte wurden in den Vegetationsperioden 2006 bis 2008 Vegetationsaufnahmen nach der gleichen Methodik durchgeführt. Dabei wurden innerhalb eines Radius von 30 m um den Mittelpunkt der BZE-Fläche nach einem einheitlichen Lageschema (s. Kap. 5) 400 m² (20 x 20 m) große Dauerbeobachtungsflächen eingerichtet, auf denen die Arten der Baum-, Strauch- und Krautschicht mit Deckungsgrad in Prozent und die Arten der Moosschicht (Moose, Flechten) ohne quantitative Angaben erfasst wurden (WELLBROCK et al. 2006, dort weitere methodische Details). Insgesamt wurden 388 Vegetationsaufnahmen in den Bundesländern Niedersachsen (169), Bremen (4), Hessen (139) und Sachsen-Anhalt (76) und an den Stichprobenpunkten der BZE II durchgeführt.

9.2.2 Datenauswertung

Um Zusammenhänge zwischen den an den BZE-Punkten erfassten Pflanzenarten und den gemessenen Umweltvariablen (v. a. Bodenchemie) herauszuarbeiten, wurden alle BZE-Punkte nach den Variablen klassifiziert. Dabei wurden (mit Ausnahme der Pufferbereiche) die Grenzen der Klassen an den Definitionsbereich (tatsächliches Vorkommen der Messwerte) angepasst. Bezugshorizont ist der Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe, da hier die Differenzierung der Trennartengruppen am eindeutigsten war.

Eine Kontingenztafel (Häufigkeitstabelle) mit den Vorkommen der Pflanzenarten (ohne Berücksichtigung von Deckungsgraden) und den jeweiligen Variablenausprägungen bildet die Grundlage für einen Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest. Bei dem Test wird davon ausgegangen, dass die Artvorkommen unabhängig verteilt sind. Wenn diese Hypothese zutrifft, sind die Residuen nahe Null, wenn nicht, geben sie die Höhe der Abweichung vom erwarteten Ergebnis (Erwartungswert) an. Voraussetzung für ein belastbares Testergebnis ist eine Mindesthäufigkeit der insgesamt 142 bis auf das Niveau von Arten oder Artengruppen bestimmbaren Pflanzensippen von 15 Vorkommen. Diese Voraussetzung erfüllten insgesamt 120 Gefäßpflanzen- und Moosarten bzw. -sippen. Bei den Baum- und Straucharten wurde nur das Vorkommen in der Krautschicht (Verjüngung) berücksichtigt. Da bei den Wirtschaftsbaumarten mit geringer Fähigkeit zur Fernausbreitung (Fichte, Rotbuche, Rot-, Stiel- und Trauben-Eiche) anders als bei ausbreitungsstarken Baumarten (z. B. Ahorn- oder Birken-Arten, Spätblühende Trauben-Kirsche) das Vorkommen von Verjüngung nicht unbedingt das natürliche ökologische Verhalten widerspiegelt, sondern die Bedingungen, unter denen diese Baumarten bevorzugt angebaut werden, wurden die Ergebnisse für diese Baumarten nicht berücksichtigt.

Die mithilfe des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests ermittelten Residuen fanden jeweils Eingang in eine Hauptkomponentenanalyse (PCA). Sie dient hier in erster Linie der graphischen Darstellung von Zusammenhängen zwischen Artvorkommen und Umweltvariablen bzw. der Darstellung von Korrelationen der Variablen untereinander (LEYER u. WESCHE 2007).

9.2.3 Darstellung und Anwendung der Ergebnisse

Eine positive Abweichung von dem normierten Erwartungswert von mindestens 0,5 wird hier als Beleg für einen Zusammenhang zwischen dem Vorkommen einer Pflanzenart und der Messwertklasse einer bodenchemischen Kenngröße interpretiert. Für die meisten der insgesamt 113 berücksichtigten Arten ergeben sich dabei ökologisch gut interpretierbare Muster ihres Auftretens bzw. Fehlens im Bereich bestimmter Messwertklassen (s. Abb. 169). Diese Muster wurden anschließend in ein sogenanntes Trennartenschema (s. Tab. 38) übertragen, das den Bereich des Vorkommens der an den BZE-Punkten gefundenen Pflanzenarten für die untersuchten bodenchemischen Kenngrößen veranschaulicht. Die einzelnen Kästen

decken einen oder mehrere Pufferbereiche ab, in denen die in ihnen aufgeführten Pflanzenarten nach den Ergebnissen der BZE II den Schwerpunkt ihres Vorkommens haben.

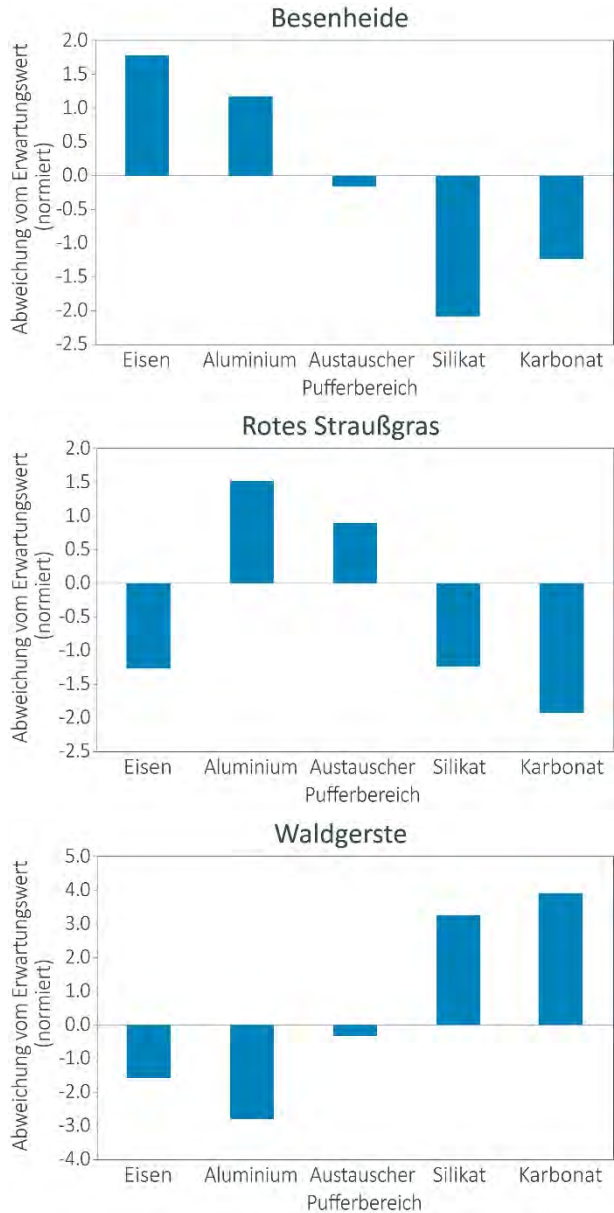


Abbildung 169: Graphische Darstellung der Abweichungen vom normierten Erwartungswert am Beispiel des Auftretens der Pflanzenarten Besenheide, Rotes Straußgras und Waldgerste in den verschiedenen Pufferbereichen

Die für die verschiedenen bodenchemischen Kenngrößen abgeleiteten Trennartenschemata können in der Forstlichen Standortskartierung Anwendung finden, indem die Trennarten(-gruppen) als Indikatoren für bestimmte bodenchemische Eigenschaften herangezogen werden. Dabei reicht in der Regel das Auftreten einer einzelnen Zeigerart für die Zuordnung des zu kartierenden Standorts zu einem bodenchemischen Kennwertbereich nicht aus. Vielmehr steigt die Aussagekraft mit zunehmender Anzahl der vorgefundenen Trenn- oder Zeigerarten. Um die Indikatoreigenschaften der Waldgefäßpflanzen und -moose im Rahmen eines Kartierverfahrens für die belastbare Ansprache eines bodenchemischen Kennwertbereichs nutzen zu können, ist eine möglichst große Zahl von Indikatorarten notwendig. Zusätzlich gibt auch das Fehlen anderer Arten(-gruppen) wichtige Hinweise. Den Bezugsraum der Ergebnisse bilden in erster Linie die Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt. Darüber hinaus können die Ergebnisse auch in angrenzenden Gebieten mit ähnlichen klimatischen und bodenökologischen Bedingungen Anwendung finden.

In das nachfolgende Trennartenschema (s. Tab. 38) wurden nur diejenigen Arten übernommen, für die sich ein ökologisch gut interpretierbares Muster ergibt. Dies gilt beispielsweise nicht für den Adlerfarn, dessen Schwerpunkt zwar eindeutig im Eisen-Pufferbereich liegt, der aber – möglicherweise bedingt durch Kalkungsmaßnahmen – auch im Silikat- und Carbonat-Pufferbereich eine positive Abweichung vom Erwartungswert zeigt.

Tabelle 38: Beispiel eines Trennartenschemas für das Vorkommen der in Abbildung 169 dargestellten Pflanzenarten in verschiedenen Pufferbereichen

Pufferbereich				
Eisen-	Aluminium-	Austauscher-	Silikat-	Carbonat-
Besenheide				
	Rotes Straußgras			
			Waldgerste	

9.3 Ergebnisse und Diskussion

9.3.1 $pH(H_2O)$

Der pH-Wert eines Bodens, auch als Bodenreaktion oder Säuregrad bezeichnet, ergibt sich aus der Wasserstoff-Ionen-Aktivität in der Bodenlösung. Er hat Einfluss auf zahlreiche chemische und biologische Prozesse im Boden und ist eine der wichtigsten bodenökologischen Kenngrößen, aus der sich viele für das Pflanzenwachstum bedeutsame Bodeneigenschaften, wie die Basen- und Nährstoffversorgung (Trophie) ableiten lassen (BLUME et al. 2010). So ergeben sich aus dem pH-Wert einerseits Hinweise auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen (z. B. Stickstoff, Magnesium oder Calcium) und andererseits auf toxisch wirkende Konzentrationen von Elementen wie Aluminium oder Mangan. Dementsprechend ist die Bindung vieler Pflanzenarten und Pflanzengesellschaften an bestimmte pH-Bereiche, auch als Pufferbereiche bezeichnet (ULRICH 1981), unter einheitlichen klimatischen Bedingungen sehr eng.

In der Forstlichen Standortskartierung geben Bodenmerkmale wie die Humusform (Mull, Moder, Rohhumus) oder Podsolierungserscheinungen (Bleichung im Oberboden infolge einer Versauerung) Hinweise auf den Pufferbereich, in dem sich ein Waldboden befindet (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Darüber hinaus können aber auch Pflanzenarten als Indikatoren für bestimmte pH-Bereiche dienen. Mit dem im Rahmen der Bodenzustandserhebung II erhobenen Vegetationsdatensatz liegt eine einzigartige Datengrundlage vor, aus der für die untersuchten Bundesländer das Vorkommen von Waldbodenpflanzen in bestimmten Pufferbereichen (pH-Wert gemessen in H_2O für 0-5 cm Bodentiefe) abgeleitet werden kann.

Bereits in der Hauptkomponentenanalyse (s. Abb. 170) wird deutlich, dass die wichtigste floristische Trennung entlang der ersten Achse (X-Achse) zwischen dem Eisen- und Aluminium-Pufferbereich auf der einen und dem Austauscher-, Silikat- und Carbonat-Pufferbereich auf der anderen Seite erfolgt. Diese relativ scharfe Grenze wird letztlich auch in dem Trennartenschema (s. Tab. 39) deutlich. Nur wenige Pflanzenarten kennzeichnen „grenzüberschreitend“ gleichzeitig den Aluminium- und den Austauscher-Pufferbereich.

Tabelle 39: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Pufferbereiche von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

Pufferbereich				
Eisen-	Aluminium-	Austauscher-	Silikat-	Carbonat-
Gewelltes Gabelzahnmoos, Schwanenhals-Sternmoos, Zweizähni- ges Kammkelchmoos				
Artengruppe Echte Brombeere, Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Breitblättriger Dornfarn, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Einseitwendiges Kleingabelzahn- moos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Heidelbeere, Langgestrecktes Schönschnabelmoos, Rankender Lerchensporn, Rotstengelmoos, Späte Trauben- Kirsche, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Vogelbeere, Wald- Frauenhaar				
	Artengruppe Hain-Greiskraut, Flatter-Binse, Gewelltes Schiefbüchsen- moos, Gewöhnlicher Hohlzahn, Himbeere, Kleiner Sauerampfer, Pillen-Segge, Schmalblättriges Weidenröschen, Wald-Ehrenpreis, Wald-Geißblatt, Wald-Greiskraut, Wolliges Honiggras			

(Fortsetzung Tabelle 39)

Pufferbereich				
Eisen-	Aluminium-	Austauscher-	Silikat-	Carbonat-
	Land-Reitgras, Roter Fingerhut, Roter Holunder, Rotes Straußgras, Salbei-Gamander, Wald-Reitgras			
		Behaarte Hainsimse, Bleiche Segge, Dreinervige Nabelmiere, Hasenfuß-Segge, Wald-Sauerklee, Weiches Honiggras, Weißliche Hainsimse		
		Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliches Flattergras, Großes Springkraut, Knotige Braunwurz, Rasen-Schmiele, Wald-Frauenfarn, Wald-Schaumkraut, Winkel-Segge, Zwiebel-Zahnwurz		
		Artengruppe Echte Goldnessel, Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Artengruppe Knäuelgras, Berg-Ahorn, Busch-Windröschen, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliches Scharbockskraut, Große Sternmiere, Hain-Rispengras, Kleines Springkraut, Schwarzer Holunder, Spitz-Ahorn, Vogel-Kirsche, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Veilchen, Wald-Ziest		
			Berg-Weidenröschen, Eichenfarn, Riesen-Schwingel	
			Blut-Ampfer, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnlicher Rainkohl, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Rispengras, Kleinblütiges Weidenröschen, Krückenförmiges Kurzbüchsenmoos, Samt-Kurzbüchsenmoos, Stink-Storchschnabel, Wald-Bingelkraut, Waldgerste, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke	
				Gewöhnliche Hasel, Gewöhnlicher Efeu

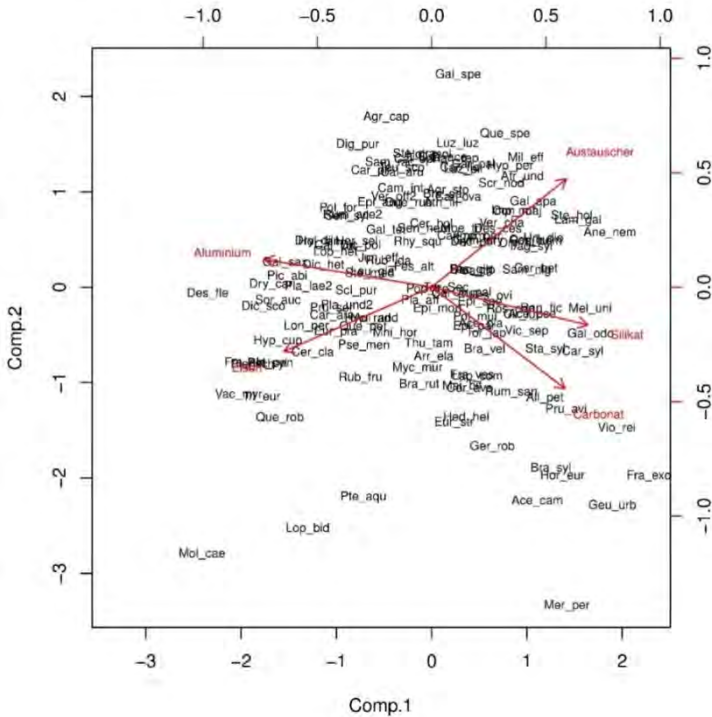


Abbildung 170: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und die fünf Pufferbereiche. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), zwischen dem Eisen- und Aluminium-Pufferbereich auf der einen und dem Silikat- und Carbonat-Pufferbereich auf der anderen Seite. Der Austauscher-Pufferbereich nimmt eine Zwischenstellung ein.

Die Grenze zwischen dem Aluminium- und dem Austauscher-Pufferbereich entspricht etwa der bodenökologischen Grenze zwischen den natürlichen Waldgesellschaften Hainsimsen-Buchenwald (Eisen- oder Aluminium-Pufferbereich) und Waldmeister-Buchenwald (Austauscher-Pufferbereich). Auf Böden mit höheren pH-Werten schließt sich ökologisch der Waldgersten-Buchenwald an, dessen kennzeichnende Arten ihren Schwerpunkt im Silikat- und/oder Carbonat-Pufferbereich haben.

9.3.2 Basensättigung

Als Basensättigung bezeichnet man den prozentualen Anteil der Summe der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium an der gesamten effektiven Kationenaustauschkapazität. Die Basensättigung ist somit eine wichtige Kenngröße in Bezug auf das Nährstoffangebot eines Waldbodens. Je höher der Anteil der basischen Kationen und je geringer der Anteil von Protonen und sauren Kationen (Aluminium, Eisen, Mangan), desto besser ist die Ernährung der Waldbäume. Voraussetzung ist allerdings die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe durch eine ausreichende Bodenfeuchte. In der Forstlichen Standortkartierung wird die Basensättigung oft zusätzlich zum pH-Wert bestimmt, da bei pH-Werten unter 5 keine enge Beziehung zwischen Basensättigung und pH-Wert bestehen muss (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Auf vielen Standorten mit einer geringen Basensättigung sind in der Vergangenheit ein- oder mehrmalig Kalkungsmaßnahmen durchgeführt worden, durch die die Basensättigung erhöht wurde. Von den in die Auswertung einbezogenen BZE-Punkten sind insgesamt 48 % ein- oder mehrmalig gekalkt worden.

Bei der Auswertung der Vegetationsdaten der BZE II wurden in Orientierung an dem Bewertungsrahmen der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) zunächst sieben Klassen der Basensättigung in 0-5 cm Bodentiefe gebildet. In der Auswertung zeichnete sich jedoch eine Dreigliederung ab, bei der sich zwei große Trennartengruppen von Gefäßpflanzen und Moosen gegenüberstehen, von denen die eine bei Basensättigungen unter 30 % und die andere bei Werten über 70 % gehäuft auftritt (s. Abb. 171, Tab. 40). Dazwischen steht eine kleine Gruppe von Pflanzenarten, deren Vorkommensschwerpunkt bei Basensättigungswerten zwischen 30 und 50 % liegt. Dies spiegelt auch das Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse (s. Abb. 171) wider. Hier wird deutlich, dass sich im Bereich der niedrigen Werte unter 30 % und der hohen Werte über 70 % eine Trennung der einzelnen Klassen über Pflanzenarten nicht vornehmen lässt.

Tabelle 40: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Basensättigung [%] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

Basensättigung [%]						
0-7	> 7-20	> 20-30	> 30-50	> 50-70	> 70-85	> 85-100
	Besenheide, Gewelltes Gabelzahnmoos, Harzer Labkraut, Hasenfuß-Segge, Pillen-Segge, Roter Holunder, Rotstengelmooos, Schmalblättriges Weidenröschen, Sparriger Runzelpeter, Wald-Frauenhaar					
	Besenförmiges Gabelzahnmoos, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Flatter-Binse, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Hänge-Birke, Heidelbeere, Vogelbeere					
	Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Kleiner Sauerampfer					
	Breitblättriger Dornfarn, Land-Reitgras, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos					
	Späte Trauben-Kirsche					
		Grünstengelmooos, Behaarte Hainsimse				
		Langgestrecktes Schönschnabelmoos, Himbeere, Wolliges Honiggras				
			Gewöhnlicher Hohlzahn, Rankender Lerchensporn, Salbei-Gamander			
			Wald-Schaumkraut			
			Busch-Windröschen, Großes Springkraut, Stink-Storchschnabel, Wald-Segge, Wald-Zwenke, Zwiebel-Zahnwurz			

(Fortsetzung Tabelle 40)

Basensättigung [%]						
0-7	> 7-20	> 20-30	> 30-50	> 50-70	> 70-85	> 85-100
				Artengruppe Echte Goldnessel, Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Hexen- kraut, Kleines Springkraut, Klet- ten-Labkraut, Riesen-Schwengel, Waldmeister, Wald-Ziest, Zaun- Wicke		
				Gewelltes Katha- rinenmoos, Große Sternmiere		
					Blut-Ampfer, Gewöhn- liche Knoblauchsrauke, Gewöhnliches Rispen- gras, Kleinblütiges Weidenröschen, Vogel- Kirsche, Waldgerste, Wald-Veilchen	
						Berg-Ahorn, Samt- Kurzbüchsen- moos, Spitz- Ahorn, Wald- Bingelkraut

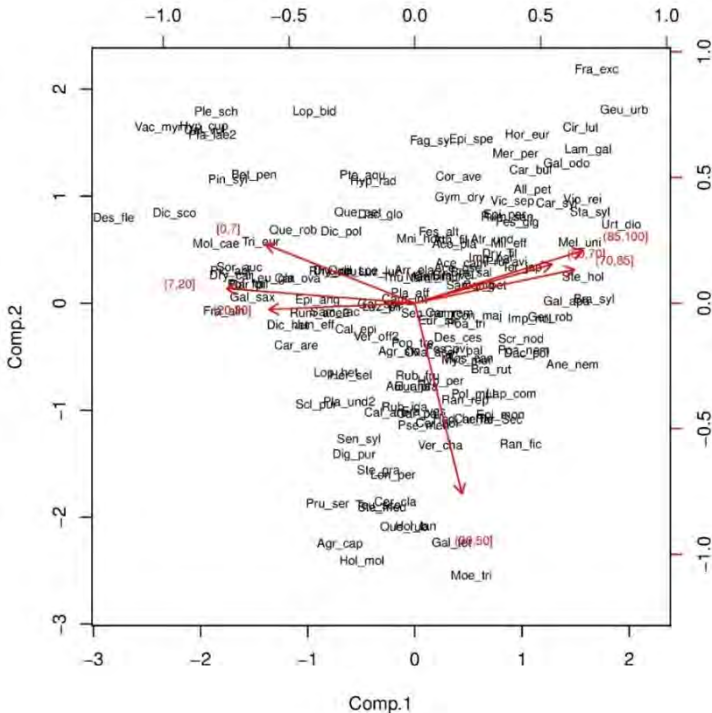


Abbildung 171: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sieben Klassen der Basensättigung. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 30 % (sehr gering und gering) und über 50 % Basensättigung (mittel hoch bis sehr hoch) gegenüberstehen.

Im Rahmen der Auswertung der Bodenzustandserhebung II erfolgte für Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt eine Zusammenfassung von Standorten mit ähnlicher Merkmalsausprägung im Mineralboden zu insgesamt 17 Substratgruppen. Es zeigte sich, dass ein Teil dieser Substratgruppen in Bezug auf die Basensättigung (hier berechnet bis 90 cm Bodentiefe) eine relativ enge Amplitude aufweist. So liegt die Basensättigung der Substratgruppen Quarzit, Granit, Buntsandstein (sandig), unverlehmte Sande und organisch geprägte Standorte überwiegend bei Werten unter 30 %, während in den Substratgruppen Lehm, Ton(stein), Basalt/Diabas, Kalk und Zechstein überwiegend Werte oberhalb von 50 % gemessen werden. Die Substratgruppe der verlehmtten Sande weist überwiegend eine Basensättigung zwischen 30 und 50 % auf (EVERS et al. 2013b).

9.3.3 C/N-Verhältnis

Das Verhältnis von Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) gibt wichtige Hinweise auf die Umsetzungsbedingungen in Böden und ihr Stickstoffangebot. Je enger das C/N-Verhältnis eines Bodens ist, desto besser ist die Stickstoffversorgung der in ihm wurzelnden Pflanzen. Neben den natürlichen Ausgangsbedingungen eines Waldbodens (Geologie, Klima, Exposition, Hangneigung usw.) beeinflussen menschliche Aktivitäten das Stickstoffangebot. Während in der Vergangenheit ein Stickstoffentzug durch Streunutzung besonders in siedlungsnahen Wäldern teilweise zu Stickstoffmangel führte, können heute Stickstoffeinträge aus der Luft (Verbrennungsprozesse und Landwirtschaft) eine Stickstoffübersättigung von Waldböden bewirken. Auch die Baumartenwahl hat Einfluss auf das Stickstoffangebot von Böden (ELLENBERG 1977). Die Hauptkomponentenanalyse zeigt hier, dass unter einem C/N-Verhältnis von 16 und über einem C/N-Verhältnis von 21 eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten kaum möglich ist (s. Abb. 172, Tab. 41).

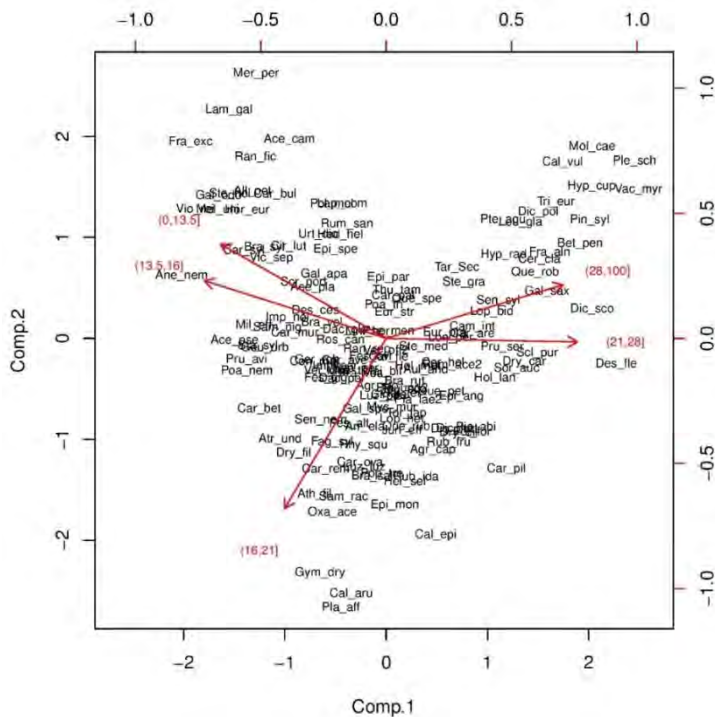


Abbildung 172: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und fünf Klassen des C/N-Verhältnisses. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 16 und über 21 gegenüberstehen. Unter einem C/N-Verhältnis von 16 und über einem C/N-Verhältnis von 21 ist eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten kaum möglich.

Tabelle 41: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache des C/N-Verhältnisses von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe). Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit allen weiteren Trennartenschemata erfolgt die Darstellung hier in der Reihenfolge absteigender C/N-Werteklassen.*

C/N-Verhältnis				
> 28-100	> 21-28	> 16-21	> 13,5-16	0-13,5
Adlerfarn, Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Heidelbeere, Rankender Lerchensporn, Rotstengelmoos, Schmalblättriges Weidenröschen, Späte Trauben-Kirsche, Vogelbeere, Wald-Greiskraut, Wolliges Honiggras, Zweizähliges Kammkelchmoos				
Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Wald-Frauenhaar				
	Artengruppe Echte Brombeere, Berg-Weidenröschen, Breitblättriger Dornfarn, Land-Reitgras, Pillen-Segge, Rotes Straußgras			
		Eichenfarn, Flatter-Binse, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Himbeere, Roter Holunder, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wald-Reitgras		
		Behaarte Hainsimse, Dreinervige Nabelmiere, Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnliche Hasel, Stink-Storchschnabel, Wald-Frauenfarn, Wald-Sauerklee, Weißliche Hainsimse		

(Fortsetzung Tabelle 41)

C/N-Verhältnis				
> 28-100	> 21-28	> 16-21	> 13,5-16	0-13,5
		Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Artengruppe Knäuelgras, Berg-Ahorn, Busch-Windröschen, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Hainbuche, Artengruppe Hain-Greiskraut, Hain-Rispengras, Kleines Springkraut, Schwarzer Holunder, Vogel-Kirsche, Wald-Ziest		
			Bleiche Segge	
			Artengruppe Echte Goldnessel, Blut-Ampfer, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnlicher Efeu, Gewöhnlicher Rainkohl, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Scharbockskraut, Große Sternmiere, Großes Springkraut, Kletten-Labkraut, Knotige Braunwurz, Rasenschmiele, Samt-Kurzbüchsenmoos, Vielblütige Weißwurz, Wald-Bingelkraut, Waldgerste, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Veilchen, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke, Zwiebel-Zahnwurz	
				Schwanenhals-Sternmoos

9.3.4 Basische Kationen (Ca, Mg, K)

Die basischen Kationen Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Kalium (K) sind wichtige Pflanzennährstoffe. Ihr Vorrat in Waldböden variiert – wie die Basensättigung – sehr stark in den einzelnen Substratgruppen. So wurden im Rahmen der BZE II allgemein in den Substratgruppen Basalt/Diabas, Lehm, Lösslehm, Kalk, Ton(stein) und Zechstein relativ hohe Vorräte basischer Kationen nachgewiesen. Dabei zeichnen sich Basalt/Diabas- und Kalk-Standorte eher durch mittlere Kaliumvorräte aus. Die Substratgruppen mit geringer Basensättigung (Quarzit, Granit, Buntsandstein (sandig), unverlehmte Sande und organisch geprägte Standorte) weisen auch geringe Vorräte basischer Kationen auf (EVERS et al. 2013b). Durch Säureeinträge können basische Kationen von den Austauschern verdrängt und anschließend ausgewaschen werden.

9.3.4.1 Calcium

Während bei Calciumvorräten unterhalb von 400 kg/ha (Bezug: Mineralbodentiefe in 0-5 cm) eine Trennung der gebildeten Werteklassen über Trennarten gut möglich ist, ist eine Differenzierung oberhalb von 400 kg/ha schwierig (s. Abb. 173, Tab. 42).

Tabelle 42: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Calciumvorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

Calciumvorrat [kg/ha]					
0-100	> 100-200	> 200-400	> 400-800	> 800-1.500	> 1.500
Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Echtes Schlafmoos, Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewelltes Schiefbüchsenmoos, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Kleiner Sauerampfer, Rotstengelmoos, Schmalblättriges Weidenröschen, Vogelbeere					
Draht-Schmiele, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Grünstengelmoos, Heidelbeere, Pillen-Segge, Sparriger Runzelpeter, Späte Trauben-Kirsche, Wald-Frauenhaar, Weiches Honiggras, Zweizähliges Kammkelchmoos					
Rotes Straußgras, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos					
	Bleiche Segge, Roter Holunder				
	Roter Fingerhut, Weißliche Hainsimse, Wolliges Honiggras				
	Gewöhnlicher Hohlzahn, Wald-Frauenfarn, Wald-Sauerklee, Wald-Schaumkraut				
	Gewelltes Katharinenmoos, Winkel-Segge				

(Fortsetzung Tabelle 42)

Calciumvorrat [kg/ha]					
0-100	> 100-200	> 200-400	> 400-800	> 800-1.500	> 1.500
		Himbeere			
		Artengruppe Hain-Greiskraut, Dreinervige Nabelmiere, Eichenfarn			
		Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Artengruppe Knäuelgras, Busch-Windröschen, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Scharbockskraut, Großes Springkraut, Kletten-Labkraut, Riesen-Schwingel, Stink-Storchschnabel			
			Knotige Braunwurz		
			Artengruppe Echte Goldnessel, Berg-Ahorn, Blut-Ampfer, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnlicher Rainkohl, Große Sternmiere, Hainbuche, Hain-Rispengras, Kleinblütiges Weidenröschen, Schwarzer Holunder, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Veilchen, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke, Zwiebel-Zahnwurz		
				Spitz-Ahorn, Vogel-Kirsche, Wald-Bingelkraut, Waldgerste	
					Gewöhnliche Hasel

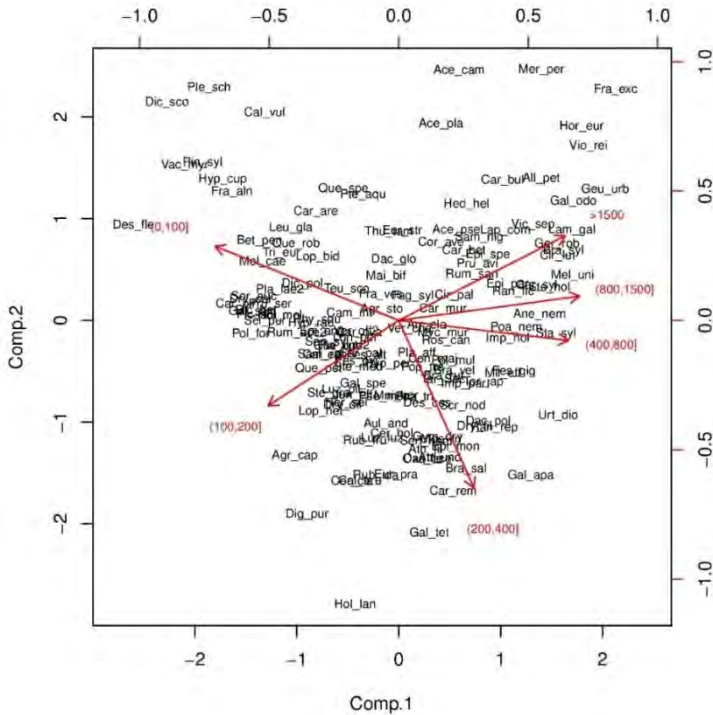


Abbildung 173: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sechs Klassen des Calciumvorrats. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 100 und über 400 kg/ha gegenüberstehen. Über einem Calciumvorrat von 400 kg/ha ist eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten weniger gut möglich.

9.3.4.2 Magnesium

Beim Magnesium ist eine ausgeprägte Dreigliederung bereits in der Hauptkomponentenanalyse (s. Abb. 174) erkennbar. Deutlich floristisch voneinander differenziert sind die Klassen 0-20, > 20-40 kg/ha sowie die vier untereinander nicht trennbaren Klassen > 40 kg/ha. Dies spiegelt sich auch in dem Trennartenschema (s. Tab. 43) wider.

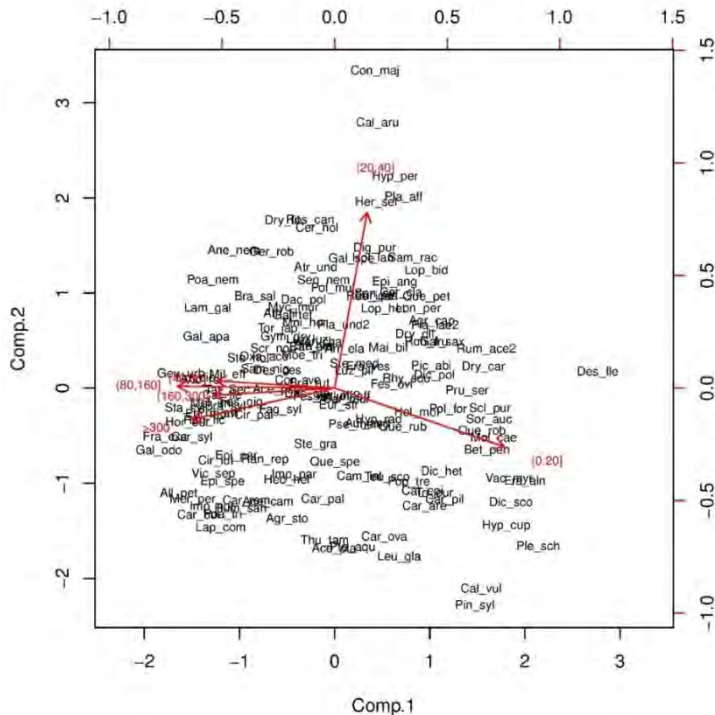


Abbildung 174: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sechs Klassen des Magnesiumvorrats. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 20 und über 40 kg/ha gegenüberstehen. Über einem Magnesiumvorrat von 40 kg/ha ist eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten kaum möglich.

Tabelle 43: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Magnesiumvorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

Magnesiumvorrat [kg/ha]					
0-20	> 20-40	> 40-80	> 80-160	> 160-300	> 300
Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Echtes Schlafmoos, Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewöhnliches Pfeifengras, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Hasenfuß-Segge, Heidelbeere, Land-Reitgras, Pillen-Segge, Rotstengelmoos, Salbei-Gamander, Sparriger Runzelpeter, Späte Trauben-Kirsche, Vogelbeere, Wald-Frauenhaar, Weiches Honiggras					
Artengruppe Echte Brombeere, Breitblättriger Dornfarn, Draht-Schmiele, Gewöhnlicher Dornfarn, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Harzer Labkraut, Kleiner Sauerampfer, Roter Holunder, Wald-Geißblatt, Zweizähnes Kammkelchmoos					
Rotes Straußgras					
	Rankender Lerchensporn, Wald-Greiskraut, Waldreitgras				
	Himbeere, Roter Fingerhut, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wolliges Honiggras				
	Gewelltes Katharinenmoos				
	Busch-Windröschen, Wald-Frauenfarn				
	Artengruppe Knäuelgras, Hain-Rispengras				

(Fortsetzung Tabelle 43)

Magnesiumvorrat [kg/ha]					
0-20	> 20-40	> 40-80	> 80-160	> 160-300	> 300
		Gewöhnlicher Efeu, Weißliche Hainsimse			
		Berg-Weidenröschen, Wald-Sauerklee, Winkel-Segge			
		Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Hexenkraut, Kletten-Labkraut, Schwarzer Holunder, Vogel- Kirsche, Wald-Bingelkraut, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Zwenke, Zwiebel-Zahnwurz			
			Berg-Ahorn		
			Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Riesen- Schwingel, Gewöhnliches Schar- bockskraut, Wald-Ziest, Waldgerste, Wald-Veilchen		
				Gewöhnliche Hasel	

9.3.4.3 Kalium

Auch beim Kalium ist eine Dreigliederung der Wertebereiche 0-20, > 20-40 und > 40 kg/ha erkennbar (s. Abb. 175). Anders als beim Magnesium ist jedoch die Differenzierung oberhalb von 40 kg/ha etwas deutlicher und es stehen einige Trennarten zur Verfügung (s. Tab. 44).

Tabelle 44: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Kaliumvorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

Kaliumvorrat [kg/ha]					
0-20	> 20-40	> 40-60	> 60-80	> 80-120	> 120
Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Einseitwendiges Kleingabelzahnmoos, Europäischer Siebenstern, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewelltes Schiefbüchsenmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Rankender Lerchensporn, Rotstengelmoos, Sparriger Runzelpeter, Späte Trauben-Kirsche, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wald-Greiskraut, Wolliges Honiggras, Zweizähliges Kammkelchmoos					
Berg-Weidenröschen, Breitblättriger Dornfarn, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Faulbaum, Gewöhnliches Pfeifengras, Grünstengelmoos, Heidelbeere, Himbeere, Pillen-Segge, Roter Fingerhut, Schmalblättriges Weidenröschen, Vogelbeere, Wald-Frauenhaar					
	Artengruppe Echte Brombeere, Bleiche Segge, Gewöhnlicher Dornfarn, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Krückenförmiges Kurzbüchsenmoos, Land-Reitgras, Rotes Straußgras, Wald-Ehrenpreis				
	Weiches Honiggras				
	Kleines Springkraut, Wald-Sauerklee				
	Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Gewöhnlicher Efeu				
	Berg-Ahorn				

(Fortsetzung Tabelle 44)

Kaliumvorrat [kg/ha]					
0-20	> 20-40	> 40-60	> 60-80	> 80-120	> 120
		Eichenfarn			
		Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnlicher Hohlzahn, Winkel-Segge			
		Große Sternmiere, Knotige Braunwurz			
		Artengruppe Knäuelgras, Blut-Ampfer, Busch-Windröschen, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Scharbockskraut, Hain- Rispengras, Schwarzer Holunder, Waldgerste, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Ziest			
		Artengruppe Echte Goldnessel, Gewöhnliche Brennnessel, Kletten- Labkraut, Vogel-Kirsche, Wald- Veilchen, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke, Zwiebel-Zahnwurz			
				Artengruppe Hain-Greis- kraut, Roter Holunder, Vielblütige Weißwurz	
				Gewöhnliche Hasel, Wald-Bingelkraut	

Beim Gebrauch des Schemas ergeben sich einige grundsätzliche Unterschiede zu dem in der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) beschriebenen und bisher üblichen Verfahren der Anwendung ökologischer Artengruppen. Die Ergebnisse der BZE II ermöglichen es, dieses Verfahren weiterzuentwickeln und ökologische Artengruppen auf zahlenmäßiger Basis bodenchemischen Kenngrößen zuzuordnen. So sind die in Tabelle 45 aufgeführten Arten durchweg weit verbreitete Gefäßpflanzen- und Moossippen, deren Verhalten gegenüber verschiedenen bodenchemischen Zuständen durch Messwerte untermauert ist. Dagegen listet die Forstliche Standortaufnahme neben weit verbreiteten auch viele sehr seltene Arten auf und die Zuordnung der Sippen zu ökologischen Artengruppen beruht in der Regel auf Erfahrungswissen. Den Bezugsraum der Ergebnisse (s. Tab. 45) bilden in erster Linie die Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt und damit den geographischen Raum, aus dem die Vegetationsaufnahmen und bodenchemischen Messwerte stammen. Dies bietet gegenüber den in der Forstlichen Standortaufnahme enthaltenen, bundesweit gültigen Artengruppen den Vorteil einer höheren Passgenauigkeit für Nordwestdeutschland. Schließlich liegt noch ein erheblicher Unterschied darin, dass die in der Forstlichen Standortaufnahme in der Regel vorgenommene Festlegung der Arten auf je eine Wasserhaushaltsstufe und eine Humusform zu einer starken Einengung ihrer ökologischen Amplitude führen muss, die dem tatsächlichen Verhalten der Pflanzenarten häufig nicht gerecht werden kann. So ist in der Forstlichen Standortaufnahme beispielsweise die Besenheide der Wasserhaushaltsstufe I (Schwergewicht auf trockenen und/oder warmen Standorten) zugeordnet, während sie tatsächlich hinsichtlich des Wasserhaushalts indifferent ist (vgl. ELLENBERG et al. 2001). Ein weiteres Beispiel ist die Heidelbeere, die nach der Forstlichen Standortaufnahme der Wasserhaushaltsstufe II (Schwergewicht auf mäßig trockenen bis mäßig frischen Standorten) angehört. Auch die Heidelbeere ist in Bezug auf den Wasserhaushalt indifferent (vgl. ELLENBERG et al. 2001). Aufgrund dieser und vieler ähnlicher Fälle wird in dem nachfolgenden Schema (s. Tab. 45) auf eine Differenzierung nach dem Wasserhaushalt verzichtet.

Tabelle 45: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Nährstoffversorgung von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

arm	mittel	reich
Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Heidelbeere, Rotstengelmoos, Schmalblättriges Weidenröschen, Vogelbeere, Wald-Greiskraut, Zweizähliges Kammkelchmoos		
Breitblättriger Dornfarn, Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Flatter-Binse, Gewöhnlicher Hohlzahn, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Hasenfuß-Segge, Himbeere, Kleiner Sauerampfer, Land-Reitgras, Langgestrecktes Schönschnabelmoos, Pillen-Segge, Roter Holunder, Rotes Straußgras, Salbei-Gamander, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wald-Frauenhaar, Wald-Reitgras		
	<p>Artengruppe Echte Goldnessel, Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Artengruppe Knäuelgras, Berg-Ahorn, Bleiche Segge, Busch-Windröschen, Dreinervige Nabelmiere, Eichenfarn, Einblütiges Perlgras, Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Hasel, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Scharbockskraut, Große Sternmiere, Großes Springkraut, Hain-Rispengras, Kleines Springkraut, Knotige Braunwurz, Rasen-Schmiele, Schwarzer Holunder, Spitz-Ahorn, Stink-Storchnabel, Vogel-Kirsche, Wald-Frauenfarn, Waldmeister, Wald-Sauerklee, Wald-Schaumkraut, Wald-Segge, Wald-Veilchen, Wald-Ziest, Wald-Zwenke, Weißliche Hainsimse, Zwiebel-Zahnwurz</p>	
		<p>Blut-Ampfer, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnlicher Efeu, Gewöhnlicher Rainkohl, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Rispengras, Kleinblütiges Weidenröschen, Riesenschwingel, Samt-Kurzbüchsenmoos, Wald-Bingelkraut, Waldgerste, Zaun-Wicke</p>

Folgende Wertebereiche liegen den Stufen zugrunde:

arm	= Eisen- bis Aluminium-Pufferbereich,	Basensättigung = 0-30 %, C/N = > 21-100
arm bis mittel	= Eisen- bis Austausch-Pufferbereich,	Basensättigung = 0-50 %, C/N = > 16-100
mittel bis reich	= Austauscher- bis Carbonat-Pufferbereich,	Basensättigung = > 30 %, C/N = 0-21
reich	= Silikat- bis Carbonat-Pufferbereich,	Basensättigung = > 50 %, C/N = 0-16

10 Hauptergebnisse und Folgerungen für die forstliche Praxis

Jan Evers, Uwe Paar, Inge Dammann, Bernd Abrends, Johannes Eichborn

10.1 Wie repräsentativ sind die Bodenzustandserhebungen? Sind die Ergebnisse für die wichtigsten Bodensubstrate in den Wäldern aussagekräftig?

Vergleicht man die prozentuale Verteilung der Substratgruppen der BZE II-Punkte in Niedersachsen mit der Verteilung dieser Substratgruppen, zugewiesen auf die Legendeneinheiten der BÜK 1000 N von Niedersachsen (BGR 2007), so werden die wichtigsten Bodeneinheiten im Wald durch die BZE II gut repräsentiert. Auch die Verteilung der Nährstoffgruppen aus der Forstlichen Standortskartierung im Landes- und Betreuungswald in Niedersachsen, aggregiert auf Nährstoffversorgungsklassen nach SCHMIDT et al. (2015) zeigt ein gut übereinstimmendes Muster. Mit den zusätzlichen Informationen zur Nährstoffversorgung aus der Laboranalyse kann die Trophieeinschätzung an den BZE II-Punkten insgesamt feiner differenziert werden. Entsprechend ist die prozentuale Belegung der Standorte mit Nährstoffzahl 5- und 4+, aber auch der schwach bis mäßig (Nährstoffzahlen 2+, 3-) versorgten Standorte zu Lasten der mäßig und ziemlich gut versorgten Standorte (Nährstoffzahl 3, 3+, 4, 4-) in der BZE II höher. Auch die Verteilung der Wasserhaushaltsstufen aus der niedersächsischen Standortskartierung für den Landes- und Betreuungswald stimmt sehr gut mit der Verteilung der Wasserhaushaltsstufen an den BZE-Punkten überein. Die BZE-Stichprobe bildet damit die Verhältnisse des Waldes in Niedersachsen insgesamt sehr gut ab. Im Gegensatz zur Standortskartierung stellt die BZE jedoch weder flächenbezogene Informationen bereit, noch deckt die BZE alle vorkommenden Standorte ab. Die BZE bietet aber für die typischen Waldstandorte Niedersachsens und Bremens, wie z. B. für den unverlehnten Sand, den Lösslehm oder Buntsandstein, eine breite Palette an bodenchemischen und – physikalischen Informationen für die Beurteilung des Bodenzustandes und seiner Veränderungen. Diese Informationen sind u. a. bedeutsam für die:

- Darstellung von Indikatoren zum Versauerungsstatus von Waldböden
- Abschätzung des Kohlenstoffvorrats in Waldböden, differenziert nach organischer Auflage und Mineralboden
- Herleitung kalkungsbedürftiger Waldflächen
- Darstellung der Nährstoffdynamik in Waldböden als Grundlage für eine Bewertung der Nachhaltigkeit
- Darstellung und Bewertung von Maßnahmen des Bodenschutzes in Niedersachsen

10.2 Welche Waldböden können unterschieden werden?

10.2.1 *Geologie, Boden und Bodenentwicklung*

Der Wald in Niedersachsen und Bremen wächst auf Böden, deren Vielfalt durch verschiedene geologische Ausgangsgesteine, Umlagerungen und Bodenentwicklungen, Spuren historischer Waldnutzungen und jüngerer Bodenbearbeitungen sowie Folgen v. a. der atmosphärischen Säure- und Stickstoffeinträge geprägt ist.

Großflächig wird zwischen dem mit eiszeitlichen Ablagerungen bedeckten nördlichen Tiefland (Nordniedersachsen und Bremen) und dem südlichen Bergland Niedersachsens aus Gesteinen des Erdaltertums unterschieden.

Das Tiefland lässt sich nach OTTO (1972) in das Höhen- und das Talpleistozän sowie das Holozän aufteilen. Das Höhenpleistozän besteht aus den Grundmoränen, Endmoränen und Sanderflächen. Hier finden sich als Hauptsubstrate vor allem Geschiebelehme, ärmere und mittlere, teilweise auch reichere Sande, Sandlöss und der Lauenburger Ton. Im Allgemeinen haben diese Standorte keinen Grundwasseranschluss, ein eventueller Wasserüberschuss ist allenfalls durch Stauwasser bedingt. Im Talpleistozän und Holozän sind Talsande und Auenstandorte, Moore und Brücher die wesentlichen standörtlichen Bodeneinheiten; diese Standorte sind mehr oder weniger stark durch Grundwasser beeinflusst. Im Übergang zum Bergland liegt die stark lössbeeinflusste, flachwellige Berglandschwelle, die überwiegend landwirtschaftlich genutzt wird. Das Bergland mit Gesteinen aus Trias, Jura und Kreide sowie dem Niedersächsischen Harz mit alten Gesteinen aus dem Paläozoikum ist bodenkundlich außerordentlich vielgestaltig und die Standorte wechseln – auch infolge des Reliefs – auf kleinstem Raum. Häufig finden sich Lössfließerden über Buntsandstein, auch Muschelkalk und mächtige Lössdecken sind verbreitet. Es überwiegen schluffig-lehmige bis sandige, basenarme Silikatverwitterungsböden.

10.2.2 *Substratgruppen und Substrat-Lagerung*

Das Ausgangsgestein der Bodenbildung bestimmt wesentlich die Zuordnung zu den Substratgruppen. Der unverlehmt Sand ist mit 37 % im BZE-Kollektiv Niedersachsens und Bremens das häufigste Ausgangssubstrat, gefolgt vom schwach verlehmt Sand mit 13 %. Beide Substratgruppen sind typisch für das Tiefland. Im BZE-Kollektiv in Bremen ist nur der unverlehmt Sand vertreten. Relativ häufig im Vergleich zu den Bundesländern Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein sind in Niedersachsen mit 9 % die organisch geprägten Standorte – mit ehemaligen Hoch- und Niedermooren im Tiefland, aber auch Anmooren im Bergland – vertreten. Die Lösslehm-Standorte (10 %) kommen häufig im Weserbergland, aber auch vereinzelt im Tiefland vor. Die Standorte auf Festgestein finden sich im niedersächsischen Bergland, häufig vorkommend ist der Kalkstein (8 %) und Buntsandstein (6 %), oft auch überlagert mit Lössdecken und Fließerden.

Der Begriff „Substrat-Lagerung“ umfasst die Angaben zur Bodenart (wie Sand, Schluff oder Ton) und zu den Lagerungsverhältnissen und differenziert die Standorte deutlich feiner als die Substratgruppen.

Im Tiefland bilden die unverlehnten Sandsubstrate die häufigste Einheit mit Schmelzwassersanden, Sandern oder auch silikatarmen Geschiebesanden sowie Flugsanden unterschiedlicher Mächtigkeit (21 %). Talsande mit schluffigen Einlagerungen, Geschiebelehmen, auch oft mit Flugsand überlagert, kommen an 15 % aller BZE-Standorte vor. Schwach verlehnte Sande über unverlehntem Sand sind mit 11 % ebenfalls typisch für das Tiefland. Deutlich seltener stehen Geschiebelehme unter Geschiebedecksanden bzw. fluviatile Lehme mit lehmigen Sandüberlagerungen an (4 %).

Im Bergland überwiegen die basenarmen Silikatgesteine wie Buntsandstein, Tonschiefer und Grauwacke, aber auch Granit, Quarzit und Kieselschiefer. Häufig sind diese Ausgangsgesteine mit schluffig-lehmigen Decken aus Lösslehm und Verwitterungsmaterial des jeweiligen Ausgangsgesteins überlagert (12 %). Lösslehmstandorte treten im Bergland mit 7 % relativ oft auf. Hier bestimmt Lösslehm mit über 70 cm Mächtigkeit den Wurzelraum. Kalksteinverwitterungsböden, auch mit Fließerdeneinfluss, sind mit 6 % ebenfalls typisch im Bergland.

10.2.3 Bodentypen

Auf den niedersächsischen Waldstandorten treten vor allem zwei Bodentypen auf: 33 % der BZE II-Standorte sind als Braunerden und 24 % als Podsole klassifiziert. Auf 8 % der BZE II-Punkte sind Pseudogleye, auf 6 % Parabraunerden ausgewiesen. Treposole, also relativ tief, einmalig umgebrochene Böden sowie Gleye sind mit jeweils 6 % in Niedersachsens Tiefland anzutreffen. Diese Hauptbodentypen kommen somit auf insgesamt ca. 80 % der BZE II-Punkte vor. Auf den restlichen BZE-Standorten finden sich Moore, Pelosole, Ranker, Kolluvisole, Regosole, Rendzinen und Terrae fuscae sowie Plaggeneschböden mit geringen prozentualen Anteilen.

10.2.4 Auflagehumus

Die durchschnittliche Trockenmasse im Auflagehumus für alle BZE II-Punkte in Niedersachsen (inkl. Bremen) hat sich bezogen auf den Vorrat der BZE I um 5 % verringert. Diese Abnahme war jedoch nicht signifikant. Bei den gekalkten Waldflächen betrug die Abnahme 12 %, diese Abnahme ließ sich statistisch absichern. Bei den ungekalkten BZE II-Punkten nahm die durchschnittliche Trockenmasse im Auflagehumus um gut 20 % zu, jedoch ist diese Zunahme nicht statistisch abgesichert. Damit zeigt sich, wie bei Hessens Waldböden, ein Abbau im Auflagehumus nach Waldkalkung (PAAR et al. 2016), allerdings weniger deutlich. In den einzelnen

Substratgruppen nahm die Trockenmasse im Auflagehumus mit Ausnahme des unverlehmten Sandes ab, signifikant jedoch nur für den Lösslehm.

Niedersächsische Wälder decken ein weites standörtliches Spektrum und damit eine weite Spanne an Humusformen ab. Mit Mull und Mullartigem Moder sind knapp 30 % der Waldböden im niedersächsischen Wald durch eine rasche Zersetzung durch Mikroorganismen und gute Bodendurchmischung durch Bodenwühler geprägt. Beide Humusformen zeigen eine zügige Stoffumsetzung im Boden an. Dieser Anteil hat sich von der BZE I zur BZE II nicht verändert. Deutlich verringert hat sich dagegen der Anteil von Standorten mit Rohhumus von 14 % in der BZE I auf 5 % in der BZE II. Neben diesem moderaten Abbau der Auflagehumusdecken zwischen den beiden Inventuren ist damit auch eine qualitative Verbesserung der Humusformen vom Rohhumus zu besseren Humusformen im Moder verbunden. Die Tendenz zum Abbau des Auflagehumus kann zum einen mit den langjährig hohen Stickstoffeinträgen, zum anderen auch mit insgesamt höheren Temperaturen bei ähnlichem Niederschlag, stärker durchforsteten Beständen mit mehr Laubholzanteilen und Waldkalkungsmaßnahmen in Zusammenhang stehen.

10.2.5 Trockenrohdichten und Skelettanteile

Im Vergleich der Substrate finden sich auf organisch geprägten Standorten, Tonschiefer, Grauwacke, Granit und dem Kreidesandstein im Oberboden mit Werten unter $0,8 \text{ g/cm}^3$ die geringsten Trockenrohdichten des Feinbodens. Mit deutlich höheren Trockenrohdichten im Oberboden folgen Kalkstein, Buntsandstein, Ton(stein) und die Lehme. Die unverlehmten und schwach verlehmten Sande erreichen bereits im Oberboden Werte um $1,1 \text{ g/cm}^3$. Die Trockenrohdichten steigen mit zunehmender Bodentiefe auf Werte von $1,2 \text{ g/cm}^3$ (Grauwacke und Tonschiefer) bis $1,6 \text{ g/cm}^3$ (schwach- und unverlehmter Sand, Granit) in 60 bis 90 cm an. Grundsätzlich sind die Trockenrohdichten in Waldböden, vor allem im Oberboden, aufgrund der relativ höheren Humusgehalte und weniger intensiven Befahrung geringer als auf landwirtschaftlichen Ackerflächen.

Geringe Skelettgehalte in allen Bodentiefen ergaben sich erwartungsgemäß bei den Sanden, Lösslehmen und Lehmen sowie Tonen. Bei den Festgesteinen im Bergland lagen die Anteile zwischen 10 und 30 Vol.-% im Oberboden sowie 40 bis 70 Vol.-% im Unterboden.

Die sich daraus ergebenden Feinbodenvorräte bis 90 cm Bodentiefe reichen von 5.000 (Grauwacke) bis über 12.000 t/ha (Lehme und Sande). Bei gleicher Konzentration würden sich damit, schon durch die unterschiedlichen Feinbodenvorräte bedingt, deutliche Unterschiede bei den Elementvorräten ergeben, was die genaue und aufwändige Bestimmung der Trockenrohdichten und Skelettgehalte rechtfertigt.

10.3 Wie sauer sind die Waldböden?

Versauern sie trotz geringerer luftbürtiger Säurebelastungen weiter?

Der Status einer Bodenversauerung kann u. a. anhand der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - und $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte beurteilt werden. Bei durchschnittlichen Werten zwischen 4,2 und 5,1 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ befinden sich zum Zeitpunkt der BZE II die meisten Waldböden in Niedersachsen und Bremen im Austauscher- und teilweise sogar im ökologisch besser zu beurteilenden Silikat-Pufferbereich. Die Spanne der pH -Werte in Niedersachsen (inkl. Bremen) gleicht derjenigen der hessischen Waldböden (PAAR et al. 2016). In Niedersachsen sind die mittleren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe jedoch deutlich geringer als in Hessen. Im Unterschied zu Hessens Waldböden befinden sich in Niedersachsen die schwach- und unverlehmten Sande, die organisch geprägten Standorte und auch der Buntsandstein im Bergland mit $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten von unter 4,2 im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe bereits im Aluminium-Pufferbereich. Vereinzelt trifft dies auch auf Oberböden von verlehmtten Sanden, Lösslehmen, Grauwacken und Tonen zu. In diesem Pufferbereich ist mit einer Auflösung sekundärer Tonminerale, Tonzerstörung, Freisetzung von Aluminium-Ionen und Protonen in der Bodenlösung zu rechnen (ULRICH 1981). Damit sind die Waldböden Niedersachsens als relativ sauer einzuschätzen, mit Ausnahme der reicheren Lehme, Tone (im Unterboden) und Kalkstein sowie Mergel beeinflussten Standorte. Grundsätzlich liegen die durchschnittlichen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in den Unterböden (60-90 cm Bodentiefe und tiefer) im oberen Austauscher- bis Kohlensäure-Silikat-Pufferbereich, für die genannten besseren Standorte auch im Carbonat-Pufferbereich, und sind damit deutlich besser zu beurteilen. Im Vergleich zum Bundesmittel der BZE II (WELLBROCK et al. 2016) sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in Niedersachsen wesentlich niedriger, was mit den hohen Anteilen der relativ sauren Sandstandorte erklärt werden kann.

Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte, die auch die am Austauscher gebundenen Protonen mit erfassen und damit abgelaufene Pufferreaktionen kennzeichnen, liegen mit einer Spanne zwischen 3,4 und 4,4 deutlich unter den $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten in Niedersachsen, der entsprechenden Spanne in Hessen (3,8-4,2) (PAAR et al. 2016) und der im Bundesmittel (3,9-4,6) (WELLBROCK et al. 2016). Die bereits bei den $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten beschriebene Differenzierung nach Substraten gilt gleichermaßen für die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte. Die teilweise bis weit in den Eisen-Pufferbereich hineinreichenden $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte belegen eine historisch hohe Säurebelastung und erschöpfte Pufferreserven des Mineralbodens, vor allem in den Oberböden.

Der pH -Wert tritt in seiner Bedeutung als integrierender Parameter für den chemischen Bodenzustand von Waldböden gegenüber der Basensättigung zurück. Die Basensättigung kennzeichnet den Nährstoffstatus der Waldböden. Bei identischem pH -Wert kann eine sehr unterschiedliche Basenversorgung gegeben sein. Dies trifft insbesondere auf den Austauscher-Pufferbereich zwischen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 4,2 und 5,0 zu, in dem sich bezüglich der Nährstoffversorgung die flächenbezogen große Gruppe der mesotrophen Waldstandorte (nieders. Nährstoffzahlen 3, 3+, 4-, 4) überwiegend

befindet. Infolge der Bodenversauerung werden die M_b -Kationen vom Austauscher verdrängt und mit dem Sickerwasser ausgewaschen, die Basensättigung sinkt. Sie kann daher als ein Indikator der Bodenversauerung bzw. ihrer Folgen angesehen werden (REUSS u. JOHNSON 1985).

Die mittlere Spanne der durchschnittlichen Basensättigung je Tiefenstufe beträgt in Niedersachsen in der BZE II 23 bis 41 % und liegt damit im geringen bis mittleren Bewertungsbereich. Sie ist geringer als die Spanne in Hessen (PAAR et al. 2016) und im Bundesmittel (WELLBROCK et al. 2016). Noch deutlicher als bei den pH-Werten differiert die Basensättigung nach den Substratgruppen: Sowohl die unverlehmten Sande und organisch geprägten Standorte im Tiefland als auch die Buntsandstein- und Tonschiefer-Standorte im Bergland weisen nur noch Basensättigungen von durchschnittlich unter 20 %, teilweise sogar von unter 10 % auf Profilebene auf. Diese Werte werden in den am stärksten versauerten Waldböden erreicht. Die schwach verlehmtten Sande, Lösslehme und Grauwacken weisen zwar auch Mineralbodenbereiche von unter 20 % Basensättigung auf, es kommen aber auch Basensättigungen im mittleren Bereich und höher vor. Die Tone, Lehme und Kalksteine sind i. d. R. gut bis sehr gut mit Basen versorgt.

Wie bereits bei den pH-Werten zeigen sich an der niedrigen durchschnittlichen Basensättigung im Mineralboden die Folgen einer langjährigen Versauerung, vor allem im Oberboden.

Die seit Mitte der 1980er-Jahre in Deutschland ergriffenen Maßnahmen zur Luftreinhaltung verringerten vor allem die Emissionen von Schwefeldioxid erheblich. Die Ergebnisse des Intensiven Monitorings zum Stoffeintrag belegen seitdem einen deutlichen Rückgang der Gesamtsäureeinträge auch in niedersächsische Wälder. Unter Buche und Fichte im Solling z. B. reduzierte sich der Schwefeleintrag im Vergleich zu den 1970er-Jahren um 90 %, der Gesamtsäureeintrag unter Buche um 70 % und unter Fichte um 75 % bezogen jeweils auf die höchsten Einträge seit 1975. Gleichzeitig ging aber auch die Deposition der basisch wirkenden Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium aus den Luftstäuben zurück. Auf der Intensivmonitoringfläche Fichte im Solling z. B. verminderte sich der Calciumeintrag ebenfalls um rund 90 %. Auch die Stickstoffeinträge haben sich verringert, bei Fichte im Harz beispielsweise zwischen 38 und 60 %, bei Buche im Göttinger Wald um 40 % und unter Eiche in der Heide (Ehrhorn) um 35 %, jeweils bezogen auf das Mittel der 1980er-Jahre. Dennoch verbleiben die Stickstoffeinträge auf einem hohen Niveau und sind mit 13 bis 28 kg/ha und Jahr höher als der durchschnittliche Bedarf niedersächsischer Waldbestände. Dies kann zu Bodenversauerung, Nährelementverlusten mit dem Sickerwasser, Änderungen des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Waldbäumen, der Waldbodenvegetation und im Gefüge der Bodenorganismen führen (vgl. Kap. 3.4 in diesem Band und MEESENBURG et al. 2016). 80 % des Gesamtsäureeintrags wird heute durch anorganische Stickstoffeinträge verursacht. Insgesamt werden die Critical Loads für Säure- und Stickstoffeinträge nach wie vor

an vielen Standorten in Nordwestdeutschland überschritten (MEESENBURG et al. 2015, SCHAAP et al. 2018).

Seit der BZE I ist ein Anstieg der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte festzustellen. Begründet ist dieser Anstieg mit den auf vielen Waldstandorten durchgeführten Waldkalkungen, denn nur im gekalkten Kollektiv verbesserten sich – mit Ausnahme der Tiefenstufe 5-10 cm – die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte signifikant. Im ungekalkten Kollektiv kam es zu keinen signifikanten Veränderungen, tendenziell jedoch im Auflagehumus zu geringeren, im oberen Mineralboden zu etwas höheren und im Unterboden zu geringeren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werten.

Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass sich zwischen der BZE I und BZE II in Niedersachsen die Gesamtsäurebelastung nicht gravierend geändert hat, denn bei deutlich geringeren Säureeinträgen hätte mit einem Anstieg der mittleren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in der Bodenlösung und der $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte gerechnet werden können. Neben dem Säureeintrag über Luftschadstoffe sind jedoch weitere Säurequellen zu beachten, die die pH -Werte mit beeinflussen: Entkopplungen des Stickstoffkreislaufes, rückläufige Pufferreaktionen bei Aluminiumsulfaten, Basenverluste über Nitrat- und Sulfatausträge sowie Entzüge mit der Biomasse führen zu einer weiteren Versauerung (ULRICH 1983, 1994, KHANNA et al. 1987, PRIETZEL u. KÖLLING 1999).

Ein ähnlicher Sachverhalt zeigt sich auf den niedersächsischen Intensivmonitoringflächen: auch hier veränderten sich die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte bei Folgeinventuren nur auf den gekalkten, nicht jedoch auf den ungekalkten Flächen (FORTMANN et al. 2012). Dies ergab sich auch im Mittel rheinland-pfälzischer Waldböden (BLOCK u. GAUER 2012). Im Unterschied dazu erhöhte sich in Hessens Waldböden sowohl bei den ungekalkten als auch bei den gekalkten Flächen der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert im oberen Mineralboden. Dies fiel bei den gekalkten Flächen deutlicher aus als bei den ungekalkten (PAAR et al. 2016). Auf Bundesebene war das Ergebnis für die versauerungsempfindlichen Standorte ähnlich (WELLBROCK et al. 2016).

Für die Kalkung empfohlene, aber bislang noch ungekalkte Standorte werden zur Beantwortung der Frage herangezogen, wie sich die Säurebelastung seit 1990 auf den Basenzustand der Waldböden ausgewirkt hat. Zu der Gruppe mit Kalkungsempfehlung (die sogenannte „Kalkungskulisse“) zählen die Substratgruppen der Sande, ärmere Lösslehme, Buntsandstein, Grauwacke, Tonschiefer und Quarzit, also überwiegend Böden aus saurem Ausgangsgestein, die vor allem im Hauptwurzelraum stark versauert sind. Reichere Standorte, wie Kalkstein, Mergel, reicherer Lösslehm oder Tone, sind von der Kalkung ausgenommen. Anhand der Entwicklung der Basensättigung zwischen den beiden BZE-Erhebungen in Niedersachsen zeigen sich die Folgen weiterer Versauerung noch klarer als bei den pH -Werten: Auf ungekalkten Standorten kalkungsbedürftiger Standorte verringerte sich die Basensättigung deutlich und signifikant, vor allem unter 30 cm Bodentiefe. Damit sind die Waldböden dieser Gruppe seit der BZE I weiter an Basen verarmt und versauert. Die Basensättigung erreicht für den Mineralboden (5 bis 90 cm) mit

unter 15 % kritische Werte. Dies zeigt sich deutlich am Beispiel des ungekalkten, unverlehnten Sandes, der nur sehr geringe Anteile an Calcium und Magnesium aufweist und weiter verarmt. Es ist zu vermuten, dass auf ähnlich sauren, ungekalkten Standorten, wie z. B. auf Buntsandstein, Quarzit, Grauwacke oder Ton-schiefer, die Entwicklung vergleichbar ist. Allerdings kann dies an den Ergebnissen der BZE aufgrund der geringen Stichprobenzahl ungekalkter BZE-Punkte in Nie-dersachsen nicht abgesichert werden. In Hessen wiesen ungekalkte Buntsandstein-Standorte erhebliche Verluste an Calcium und Magnesium auf (PAAR et al. 2016), genau wie viele Intensivmonitoringflächen (vgl. Kap. 3.4).

Die Zunahmen von Protonen, Eisen und Mangan am Austauschereisen weisen eben-falls auf weiter ablaufende Versauerungs- und Pufferungsprozesse im Mineralboden hin. Die Zunahme der Protonen am Austauschereisen kann auch mit der Auflösung von Hydroxy-Sulfaten im Boden im Zusammenhang stehen. Durch die Abnahme der Sulfateinträge haben sich die Lösungsgleichgewichte in der Bodenlösung verändert. Aluminiumsalze können sich lösen, Sulfat gelangt in die Bodenlösung. Mit dem daraus resultierenden Sulfataustrag werden verstärkt Calcium, Magnesium und Kali-um ausgewaschen und gehen dem intensiv durchwurzelten Bodenbereich verloren. Eine Abnahme der Schwefelkonzentrationen ist sowohl in Fichten- und Kiefern-nadeln als auch in Buchen- und Eichenblättern im zeitlichen Vergleich der BZE I und BZE II in Niedersachsen statistisch signifikant nachweisbar und spiegelt die veränderten Konzentrationen in der Bodenlösung (vgl. Kap. 8) wider. Über längere Zeiträume war Sulfat das dominierende Anion in der Bodenlösung (KLINCK et al. 2012) und ist es noch für den Zeitraum zwischen der BZE I und II (z. B. NAGEL et al. 2014). Dies verstärkt die säurebedingte Basenabnahme und stellt eine Spätfolge jahrzehntelanger hoher Schwefeleinträge mit teilweise erheblichen Schwefelakku-mulationen im Boden dar. Die Schwefelanreicherung kann als ein „Memory-Effekt“ des Bodens angesehen werden.

10.3.1 Bewertung

Trotz des Rückgangs des Gesamtsäureeintrages überstieg der Säureeintrag zwischen der BZE I und II das nachhaltige Puffervermögen basenarmer Waldböden. Obwohl sich anhand des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wertes eine gewisse Verbesserung des Säurezustandes gekalkter Standorte ablesen lässt, zeigt die Basensättigung und damit vor allem die Abnahme der Kationen Calcium und Magnesium eine weitere Nährstoffverarmung der Gruppe der kalkungsempfohlenen, aber bislang ungekalkten Standorte. Diese Waldböden verarmen in Folge der Säureinträge in Teilbereichen weiter.

Die Ergebnisse belegen eindrücklich, dass die Themen Säureeintrag und Boden-versauerung bei einer Betrachtung der Stabilität niedersächsischer Wälder auch heute noch aktuell sind. Eine weitere politisch unterstützte Verminderung der Säure-einträge ist geboten.

10.4 Wie hat sich die Bodenschutzkalkung ausgewirkt? Brauchen wir sie auch in Zukunft?

Entscheidender Parameter zur Beurteilung der Kalkungswirkung im Mineralboden ist die Entwicklung der Basensättigung, aber auch die der austauschbaren Vorräte an Calcium und Magnesium sowie der pH-Werte (vgl. Kap. 6.5 und 10.3). Die Wiederholungsinventur der BZE konnte im Vergleich zur BZE I zeigen, dass sich bei den gekalkten Standorten innerhalb des Kollektivs der kalkungsbedürftigen Waldböden die Basensättigung im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe signifikant erhöht hat. Im gekalkten Kollektiv liegen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung nunmehr über 20 % Basensättigung und sind damit nicht mehr in dem besonders kritisch angesehenen Bereich. Weiterhin hat sich im Unterboden (30-90 cm Bodentiefe) die durchschnittliche Basensättigung nicht signifikant verringert. Damit sind die Ziele der Waldkalkung für diese Standorte zunächst erreicht: die bodenchemische Verbesserung des Wurzelraumes, Pufferung aktueller Säureeinträge und die Verhinderung einer weiteren Versauerung bzw. weiterer Basenverluste im Unterboden. Im ungekalkten Kollektiv dagegen verringerte sich die Basensättigung im Mineralboden unterhalb von 5 cm weiter, im Unterboden ab 30 cm Bodentiefe signifikant und deutlich. Damit traten hier stärkere Basenverluste zwischen der BZE I und II auf. Die durchschnittliche Basensättigung nahm auf kritisch zu beurteilende Werte von unter 20 % zwischen 10 und 60 cm Bodentiefe ab. Damit zeigt sich durch die BZE II, dass sich der bodenchemische Zustand empfindlicher Waldstandorte ohne eine Waldkalkung weiter verschlechtert.

Hinsichtlich der Calcium- und Magnesiumvorräte ergaben sich im gekalkten Kollektiv Abnahmen im Auflagehumus, aber entsprechende Zunahmen im oberen Mineralboden und kaum Veränderungen auf Profilebene. Im ungekalkten Kollektiv dagegen kam es zu Abnahmen von rund 30 % Calcium und 25 % Magnesium bezogen auf den Vorrat der BZE I, allerdings waren diese Abnahmen auf Landesebene in Niedersachsen nicht signifikant.

Über diese bezüglich der Waldkalkung stratifizierte Auswertung der BZE lässt sich der Kalkungseinfluss durch erhöhte Werte der Basensättigung im gekalkten und verringerte Werte im ungekalkten Kollektiv bereits auf Ebene des Landes Niedersachsen nachweisen. In der BZE Hessen ergaben sich vergleichbare Muster, vor allem für die Substratgruppe Buntsandstein (PAAR et al. 2016). Damit werden für Niedersachsen und Hessen die Ergebnisse aus verschiedenen Kalkungsversuchen in Niedersachsen, Hessen und Schleswig-Holstein bestätigt (GUCKLAND et al. 2012).

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auf Bundesebene. Auch hier wurden auf versauerungsempfindlichen Standorten nach Kalkung signifikant höhere Basensättigungen festgestellt (WELLBROCK et al. 2016). Auch in Rheinland-Pfalz (BLOCK u. GAUER 2012), Baden-Württemberg (HARTMANN et al. 2016) oder Sachsen (JACOB

u. ANDREAE 2017) zeigten sich signifikante Anstiege der Basensättigung nach Kalkung. Ungekalkte Waldstandorte verarmten dagegen signifikant weiter, so z. B. im nördlichen Brandenburg (RIEK et al. 2015).

Das Ziel der Bodenschutzkalkung, für definierte Standorte das Unterschreiten von 20 % Basensättigung zu verhindern oder das Absinken dahin zu verlangsamen und die durch Säure ausgewaschenen Nährstoffe Calcium und Magnesium zu ergänzen, bleibt auch unter den heutigen Gegebenheiten und Ergebnissen der BZE II relevant. Dies gilt vor allem für alle versauerungsempfindlichen Standorte, die noch nicht gekalkt wurden. Nach dem Kalkungsmerkblatt für Niedersachsen und Sachsen-Anhalt ist die Waldkalkung generell auf Standorten erforderlich, deren Böden im Hauptwurzelraum (30-60 cm Bodentiefe) eine Basensättigung von unter 15 % aufweisen und bei denen kein Ausschlussgrund für eine Kalkung vorliegt (NW-FVA 2010). Je nach standörtlichen Bedingungen können auch Wiederholungskalkungen erforderlich sein. Hier spielen neben standörtlichen Faktoren wie der Substrat-Lagerung, Humusform und Trophie die aktuelle Säurebelastung, Verwitterungsraten, Basenausträge mit dem Sickerwasser, die Entsauerung durch erfolgte Kalkungen, der Biomasseexport und die Säurelast im Boden eine Rolle.

Zum Zeitpunkt der BZE II ist in Niedersachsen etwa die Hälfte des Waldes mindestens einmal gekalkt worden (JACOB u. ANDREAE 2013). Dies entspricht zwei Drittel der versauerungsempfindlichen Standorte.

10.4.1 Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf die Waldernährung

Die Wirkung der Bodenschutzkalkung auf die Waldernährung wurde für die BZE-Punkte der Kalkungskulisse (zur Kalkung empfohlene Standorte) analysiert. Zur Kalkungskulisse in Niedersachsen gehören 189 der 227 Stichprobenpunkte der waldernährungskundlichen Erhebung 2007. Davon sind an 117 Punkten eine oder mehrere Kalkungen dokumentiert, 70 Punkte waren zum Zeitpunkt der Beprobung ungekalkt, an zwei Punkten konnte nicht geklärt werden, ob Kalkungsmaßnahmen stattgefunden haben. Die Calciumgehalte in den Kiefern- und Fichtennadeln befinden sich sowohl an den gekalkten als auch an den ungekalkten BZE-Punkten im Normalbereich. Auch die N/Ca-Quotienten zeigen für beide Kollektive überwiegend ausgewogene Verhältnisse an. An den ungekalkten BZE-Buchenpunkten weisen rund zwei Drittel unausgewogene N/Ca-Quotienten auf und bei einem Drittel der ungekalkten Eichen liegen die Calciumgehalte im latenten Mangelbereich. Bodenschutzkalkungen führen hier zu einer Stabilisierung der Calciumernährung.

Mit der Kalkung verbessert sich die Magnesiumernährungssituation bei Kiefer (unverlehmte Sande), Fichte und Eiche. Die Verringerung der Kaliumgehalte nach Bodenschutzkalkungen, die auf Versuchsflächen teilweise nachgewiesen wurde, im BZE-Kollektiv jedoch nur tendenziell auftritt, erfordert weitere Untersuchungen, um detailliertere Aussagen zu verschiedenen Standorten und Baumarten machen zu können.

10.4.2 *Bewertung aus bodenchemischer Sicht*

Eine Bodenschutzkalkung puffert Säure ab. Basenverluste, vor allem infolge hoher Säureeinträge, aber auch durch Sulfatausträge, Biomasseentzug und verringerte basische Einträge aus der Luft, werden durch die Kalkung ausgeglichen. Auf den gekalkten Standorten zeigt sich eine Verbesserung der durchschnittlichen Basensättigung bis 30 cm Mineralbodentiefe. Die Bodenschutzkalkung hat einen langfristig positiven Einfluss auf den chemischen Bodenzustand und auf die Stabilisierung des Nährstoffhaushalts. Außerdem zeigen die Ergebnisse der BZE II deutliche Risiken für schwach nährstoffversorgte Standorte, die bislang nicht gekalkt wurden, auf.

Für das Kollektiv der ungekalkten – aber kalkungsempfohlenen – Standorte und insbesondere für unverlehmte Sande zeigt sich sehr deutlich, dass sich der schon kritische bodenchemische Zustand im Hauptwurzelraum ohne eine Bodenschutzkalkung weiter verschlechtert. Eine Kalkung dieser Standorte erscheint deshalb weiter von besonderer Dringlichkeit.

Das bisherige Konzept der Bodenschutzkalkung in Niedersachsen hat sich bewährt. Insbesondere bei wiederkehrenden Kalkungen sollte es standorts- und bedarfsangepasst weitergeführt werden.

10.5 Wie entwickeln sich die Stickstoffvorräte in Waldböden?

Parallel zur Trockenmasse verringerte sich zwischen der BZE I und II auch der Stickstoffvorrat im Auflagehumus um 16 %. Dies wird aber durch signifikante Zunahmen von Stickstoff im oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe ausgeglichen. Trotz eines mittleren modellierten Gesamtstickstoffeintrages von 22 kg je Hektar und Jahr für die BZE-Punkte (Periode 1992-2006, s. Kap. 7) haben sich die Stickstoffvorräte auf Profilebene für diesen Zeitraum nicht signifikant verändert. Sie sind aber tendenziell angestiegen. Messdaten des Intensiven Monitorings in Niedersachsen ergeben Nitratausträge mit dem Sickerwasser von durchschnittlich 8,4 kg je Hektar und Jahr für den Zeitraum 1992-2006, wobei die Austragsraten stark variieren. So zeigen sich unter Buche Nitratausträge mit dem Sickerwasser von unter 5 kg, auf Fichtenflächen dagegen von knapp 9 kg je Hektar im Jahr (KLINCK et al. 2014). Die aus dem 1:2-Extrakt der BZE II bestimmten Nitratkonzentrationen mit modellierten Wasserfrachten an den BZE II-Punkten ergaben ebenfalls mittlere Austragsraten für Niedersachsen von 8 kg je Hektar und Jahr (ohne organische Standorte). Diese Bilanzierungsansätze sind von großen Unsicherheiten und Variabilitäten beeinflusst. Sie geben allerdings Hinweise darauf, dass in den meisten niedersächsischen Waldökosystemen Stickstoff im System gespeichert wird und die Nitratausträge mit dem Sickerwasser gering sind. Andererseits belegen teilweise hohe Stickstoffausträge, dass in Teilbereichen, insbesondere unter Kiefer und Fichte, Stickstoff nicht mehr vollständig im System gespeichert, sondern mit dem Sickerwasser in Form von Nitrat ausgewaschen wird. Diese Waldbestände können als stickstoff-

gesättigt angesehen werden. Im Schwerpunkt sind hiervon Gebiete mit hoher Stickstoffdeposition, wie das Westniedersächsische Tiefland, betroffen. Aber auch im Bergland, vor allem nach Sturmwurfereignissen, können Entkopplungen des Stickstoffkreislaufes auftreten, die Nitratausträge mit dem Sickerwasser zur Folge haben können.

10.6 Tragen Waldböden als Kohlenstoffsенke zum Klimaschutz bei?

Niedersächsische Waldböden stellen eine wichtige Kohlenstoffsенke dar und dienen damit direkt dem Klimaschutz. Die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in Niedersachsens Waldböden von durchschnittlich 180 t/ha (mit organisch geprägten Standorten) zeugen von einer langfristigen Nettospeicherung. Der Auflagehumus hat dabei einen Anteil von 14 %. Die höchsten Kohlenstoffvorräte enthalten ehemalige Moorböden, auf denen aktuell Wald stockt. Hier betragen die Kohlenstoffvorräte je nach Mächtigkeit und Zusammensetzung der Moordecke zwischen 200 und über 600 t Kohlenstoff je Hektar.

Weiterhin haben die Kohlenstoffvorräte in niedersächsischen Waldböden im Zeitraum von 1991 (BZE I) bis 2007 (BZE II) um insgesamt 21,7 t je ha zugenommen (+16 %). Dies entspricht einer jährlichen Rate von 1,35 t je ha (ohne Moorstandorte). Diese jährliche Speicherrate von Kohlenstoff resultiert aus Zunahmen im Mineralboden, vorwiegend bis 30 cm Bodentiefe. Die Kohlenstoffvorräte in der Auflage haben dagegen um 3 t je ha abgenommen (-10 %). Diese Abnahme wurde aber bei Weitem durch die Zunahme im Mineralboden ausgeglichen.

Die Speicherraten für Kohlenstoff im Waldboden sind bundesweit sehr unterschiedlich. Auf Bundesebene ergaben sich mittlere signifikante Zunahmen auf Profilebene um 0,75 t je Hektar und Jahr, die auch vor allem auf deutlichen Zunahmen im Mineralboden bis 30 cm basieren (GRÜNEBERG et al. 2016).

Die Ergebnisse der BZE für Niedersachsen (inkl. Bremen) geben Hinweise auf einen positiven Einfluss der Kalkung auf den Kohlenstoffhaushalt: Zwar wird durch die Waldkalkung der Kohlenstoffvorratsabbau im Auflagehumus deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch diese Kohlenstoffverluste über Vorratsaufbau im Mineralbodenhumus des Oberbodens mehr als kompensiert. Die Kalkung hat somit die Senkenfunktion für Kohlenstoff in niedersächsischen Waldböden verbessert.

10.7 Auf welchen Standorten ist Trockenstress bei Waldbäumen zu erwarten?

Die Auswertungen der BZE II-Profile zeigen, dass die Verteilungen der nutzbaren Feldkapazität auf Profilebene in den in Niedersachsen (inkl. Bremen) vorkommenden Substratgruppen weitgehend im hohen Bewertungsbereich zwischen 120 und 180 mm bis 90 cm Bodentiefe liegen. Bei den unverlehmten Sanden kommen auch Profile mit geringer bis sehr geringer nutzbarer Feldkapazität vor. In Abhängigkeit

vom regionalen Klima sind auf diesen Standorten zahlreiche Baumarten einer erhöhten Trockenstressgefährdung ausgesetzt. Es ist geplant, anhand von Wasserhaushaltsmodellierungen für sämtliche BZE II-Punkte die Wahrscheinlichkeiten der Trockenstressgefährdung für die Hauptbaumarten zu generieren.

10.8 Welche Folgerungen ergeben sich für die Energieholznutzung in Wäldern?

Die Energieholznutzung von Schwachholz und Kronenmaterial in Wäldern kann das Risiko unzureichender Nährstoffversorgung erhöhen, da die Nährelementexporte gegenüber der Stammholznutzung überproportional ansteigen (PUHLMANN et al. 2018). Das zukünftige Risiko durch den Nährstoffentzug bei verschiedenen Nutzungsintensitäten lässt sich mit Hilfe von Nährstoffbilanzen (AK STANDORTSKARTIERUNG 2016) oder mit dem Nährstoffentzugsindex (BLOCK u. MEIWES 2013) abschätzen. Kurz- bis mittelfristig verfügbare Bodenvorräte im Hauptwurzelraum und Kennwerte der Waldernährung (Blatt- und Nadelanalysen) liefern Hinweise, auf welchen Standorten die Nährstoffsituation schon bei der gegenwärtigen Nutzungsintensität als kritisch anzusehen ist und entsprechend von einer Energieholznutzung von Schwachholz und Kronenmaterial abzusehen ist. Außerdem sollten Standorte mit geringen Nährstoffvorräten (z. B. Nährstoffzahl ≤ 3 -) aufgrund historischer Übernutzung auch bei positiven Nährstoffbilanzen nicht für eine Nutzungsintensivierung vorgesehen werden, um das Standortspotenzial wiederherzustellen.

Die Substratgruppe der unverlehmten Sande weist nur gering-mittlere Magnesiumvorräte im Hauptwurzelraum auf und kann daher als kritisch hinsichtlich intensiver Energieholznutzung eingestuft werden. Bei den anderen Substratgruppen bewegen sich die mittleren Calcium- und Magnesiumvorräte überwiegend im mittleren Bewertungsbereich. Eine geringe bis sehr geringe Versorgung findet sich vereinzelt bei den schwach verlehnten Sanden, organisch geprägten Standorten, Buntsandstein, Lösslehm und Grauwacken.

Mit Ausnahme des Tonsteins sind die Kaliumvorräte im sehr geringen (unverlehmter Sand, organisch geprägte Standorte, Kalkstein), geringen (schwach verlehmter Sand, Grauwacke, Tonschiefer, Lehm) und gering-mittleren Bewertungsbereich (verlehmter Sand, Buntsandstein, Lösslehm). Die mittleren Kaliumvorräte nahmen im Vergleich zur BZE I um rund 25 % ab. Eine eindeutige Bewertung der geringen Kaliumvorräte im Boden ist schwierig, da Kalium im System sehr mobil ist, eher im Nährstoffkreislauf zirkuliert und die Versorgung nicht nur von den Bodenvorräten abhängt. Bei Nutzungsintensivierungen sollte berücksichtigt werden, dass geringe Vorräte und Bilanzdefizite für Kalium gravierender zu bewerten sind als für Calcium und Magnesium. Nach WILPERT et al. (2018) werden negative Kaliumbilanzen in erster Linie durch den Entzug mit der Holzernte generiert. Hinzu kommt, dass eine effiziente Kaliumdüngung schwierig ist.

Diese Einschätzung wird auch durch die Blattspiegelwerte für die Baumart Buche bestätigt. Diese Baumart weist die höchsten Kaliumentzüge aller Hauptbaumarten auf, weil sie relativ zu den anderen Hauptbaumarten am meisten Kalium im Derbholz speichert (BLOCK u. MEIWES 2013, AK STANDORTSKARTIERUNG 2016). Bei der BZE II zeigen sich Ernährungsdefizite bei Phosphor und Kalium schon bei der gegenwärtigen Nutzungsintensität, sodass eine Intensivierung der Nutzung durch eine zusätzliche Entnahme von Nichtderbholz im Zuge der Energieholznutzung nicht zu empfehlen ist. Für Fichten bestehen ebenfalls Einschränkungen aus ernährungskundlicher Sicht hinsichtlich Kalium. Am ehesten bestehen Potenziale für eine Vollbaumnutzung in Fichtenbeständen auf schwach verlehnten Sanden, weil hier Kaliumdefizite seltener sind. Auch wenn die Kiefer grundsätzlich durch eine deutlich bessere Ernährungssituation gekennzeichnet ist, sollte beachtet werden, dass sie sich häufig auf Standorten befindet, die infolge von Säureinträgen und/oder historischer Übernutzung verarmt sind, sodass hier eher eine Wiederherstellung des Standortpotenzials anzustreben ist. Aus der Ernährungssituation der Eiche ergeben sich nur für Lösslehm-Standorte keine Restriktionen hinsichtlich einer Vollbaumnutzung, auf Standorten anderer Substratgruppen sollten aufgrund von Phosphor- und Calciumdefiziten sowie unharmonischen Nährelementverhältnissen Vollbaumnutzungen nur nach sorgfältiger Prüfung der standörtlichen Gegebenheiten durchgeführt werden.

Generell wird vor einer Nutzungsintensivierung in Niedersachsen empfohlen, eine intensive Prüfung und Abwägung der regionalen und standörtlichen Ernährungssituation in Kombination mit Nährstoffbilanzen und Bodenvorräten vorzunehmen.

10.9 Welche Folgerungen ergeben sich aus den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung II für die Standortskartierung?

Bodenchemische Analysen sind von besonderer Bedeutung für eine differenzierte Standortdiagnostik. Die Analysen der Bodenzustandserhebungen ermöglichen eine Überprüfung der Trophiebewertungsstufen, die im Rahmen der Standortskartierung vergeben werden (EVERS et al. 2013a). Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Datenbasis zur bodenchemischen Einordnung von Substratgruppen, die große Variabilitäten aufweisen (z. B. Lösslehm) bzw. bei der BZE II-Stichprobe nur in relativ geringer Anzahl vertreten sind (z. B. Granit, Quarzit, Tonschiefer, Grauwacke), durch weitere bodenchemische Untersuchungen verbessert werden sollte. Dies könnte die Nährstoffeinschätzung der Standortskartierung präzisieren und helfen, das standörtliche Potenzial, die standörtliche Dynamik sowie z. B. die Folgen von Bodenversauerung, hohen Stickstoffeinträgen und einer Klimaveränderung einzelner Standorte besser abschätzen zu können. Dadurch werden forstliche Maßnahmen (u. a. Baumartenwahl, Waldkalkungen und Vollbaumnutzungen) verlässlicher

am Standortspotenzial orientiert, ihre Wirkung quantifiziert und nachhaltiger ausgerichtet.

Die direkte Gegenüberstellung der BZE II-Vegetationsdaten und der auf den Stichprobenpunkten erhobenen bodenchemischen Kenngrößen ermöglichte Analysen der Zusammenhänge zwischen der Pflanzenartenzusammensetzung in Wäldern und dem chemischen Bodenzustand. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse konnten Zeigerarten identifiziert werden, die operationale Hilfestellungen für die Trophieeinschätzung von Waldstandorten bieten. Dabei handelt es sich um indikative Kennarten, die – im Unterschied zu einigen Arten in der Liste der ökologischen Artengruppen der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) – relativ häufig in den Waldökosystemen Niedersachsens und Bremens vorkommen.

10.10 Wer nutzt die Informationen der Bodenzustandserhebung (BZE als Informationsplattform)? Braucht die forstliche Umweltbeobachtung (Monitoring) eine Bodenzustandserhebung?

10.10.1 Informationen aus der Bodenzustandserhebung als Teil des Forstlichen Umweltmonitorings

Informationen aus den Bodenzustandserhebungen sind eine zentrale Säule des Forstlichen Umweltmonitorings. Waldböden stellen die Grundlage für das Wachstum und die Vitalität der Waldbäume dar. Waldböden zeigen Veränderungen durch anthropogene Einflüsse und Waldmanagement an. Der Schutz der Waldböden ist eine Grundvoraussetzung für nachhaltiges Waldmanagement. Mit den Daten und Auswertungen der Bodenzustandserhebungen I und II ist eine flächenrepräsentative und qualitätsgeprüfte fachliche Grundlage geschaffen worden, die den Zustand und die Veränderungen von Waldböden in Niedersachsen und Bremen belegt. Die Informationen der Bodenzustandserhebung werden ergänzt durch Daten der Waldzustandserhebung, des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings und durch Ergebnisse aus experimentellen Versuchen. Die Vernetzung dieser Daten ermöglicht die bei der BZE vorgefundenen Ergebnisse zu bewerten und Schlussfolgerungen daraus zu entwickeln. Die Informationen zu den Waldböden bieten für die Daseinsvorsorge und Forschung eine äußerst wertvolle Planungsgrundlage.

10.10.2 Nationale/Internationale Partner

Die Methodik der BZE erlaubt vergleichende Auswertungen zwischen den Bundesländern. Die BZE trägt somit zur Erfüllung nationaler und internationaler Berichtspflichten bei. Die BZE Wald steht in enger Kooperation mit anderen bundes- und europaweiten Programmen. Dazu zählen insbesondere das BioSoil-Programm der UN/ECE (International Cooperative Programme), die BZE Landwirtschaft sowie

das bundesweite Bodendauerbeobachtungsflächen-Programm. Partner sind insbesondere das Umweltbundesamt mit der Umweltprobenbank des Bundes sowie das Bundesamt für Naturschutz.

10.10.3 Gesellschaft, Politik und Verwaltung

Für die Menschen in Deutschland sollen Wälder eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen (Waldfunktionen). Insbesondere sind an dieser Stelle die Produktion des nachwachsenden Rohstoffs Holz, die Trinkwasserspende und die Luftreinhaltung zu nennen. Daneben schützen Wälder vor Bodenerosion und bieten Schutz und Lebensraum für Tiere und Pflanzen. Nicht zuletzt sind Funktionen des Waldes zu nennen, die eine Grundlage für Erholung, Tourismus und Kultur darstellen. Die BZE trägt wesentlich zu einer Bewertung der Stabilität, Resilienz und Nutzungsfähigkeit von Waldökosystemen als Voraussetzung für die Erfüllung der Waldfunktionen bei. Mit der zwischen BZE I und BZE II deutlich gewordenen Dynamik der Bodeneigenschaften stellt die BZE ein Warnsystem für Belastungen der Wälder dar. Damit liefern die Ergebnisse der BZE auch Informationen zur Kontrolle von Maßnahmen der Umweltpolitik und des Waldbodenschutzes. Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt berät Verwaltungen, Waldbesitzer und die Politik in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Sie erstellt vielfältige Beiträge, die der nachhaltigen Forstwirtschaft und der Daseinsvorsorge dienen. Eine wichtige Forschungs- und Planungsgrundlage stellen dabei die Ergebnisse der BZE I und II dar.

10.10.4 Forstliche Betriebe verschiedener Waldbesitzarten

Die Ergebnisse der BZE I und II sind nach Bodensubstraten und weiteren Standortmerkmalen aufgliedert. Anhand von Regionalisierungsmodellen lassen sich die Ergebnisse in die Fläche übertragen, sodass Karten erstellt werden, die die Forstbetriebe sowie die Einrichtungen der forstlichen Planung in ihrer praktischen Arbeit unterstützen können.

Dies betrifft insbesondere eine verbesserte Ansprache und Bewertung der forstlichen Standorte, eine Darstellung von Chancen und Risiken – etwa in Bezug auf Fragen der Nährstoffnachhaltigkeit und Energieholznutzung sowie zu Optionen des Schutzes von Waldböden im Zuge der waldbaulichen Steuerung. Wie die BZE II deutlich zeigt, ist in der Bodenschutzkalkung ein wesentlicher Beitrag zu einer Stabilisierung der niedersächsischen Waldböden und damit der niedersächsischen Wälder sowie der Wälder in Bremen zu sehen. Die BZE liefert Informationen zur besseren Differenzierung der Maßnahmen, zur Bedeutung und Bewertung von Nebenwirkungen und zur Erfolgskontrolle. Wie die Ergebnisse von BZE I und BZE II weiterhin deutlich zeigen, verändern sich die Eigenschaften der niedersächsischen Waldböden in vergleichsweise kurzen Zeitabschnitten. Eine forstliche Standortserkundung als Grundlage für die Baumartenwahl und das Waldmanagement sollte

in der Lage sein, dynamische Veränderungen des Waldbodenzustandes abzubilden. Dazu können die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung beitragen. Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung liefern zudem für Forstbetriebe aller Besitzarten Entscheidungshilfen für die betriebliche Planung und Umsetzung von Bewirtschaftungsmaßnahmen.

10.10.5 Wissenschaft

Schließlich werden die Daten und Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen für wissenschaftliche Auswertungen sowie fachliche und methodische Weiterentwicklungen genutzt. Wissenschaftliche Auswertungen erfolgen sowohl innerhalb der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt als auch in Kooperation mit anderen länder- oder bundesbezogenen Einrichtungen und Universitäten. Die Daten der BZE stellen eine wertvolle Grundlage für Forschungsvorhaben und für Kooperationen mit wissenschaftlichen Einrichtungen dar.

11 Qualitätssicherung

Nils König

11.1 Probenvorbereitung und -analyse

Die im Rahmen der BZE I und BZE II genommenen Humus-, Boden- und Pflanzenproben wurden in unterschiedlichen Laboren der im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA liegenden Bundesländer analysiert. In der folgenden Tabelle 46 sind die jeweiligen Labore aufgelistet:

Tabelle 46: Übersicht der an der BZE I und BZE II beteiligten Labore der im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA liegenden Bundesländer

Land	BZE I	BZE II
Niedersachsen (inkl. Bremen)	Umweltlabor der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Göttingen Ab 2006: Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen	Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen und: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (teilweise)
Hessen	bis 2000: Hessische Landwirtschaftliche Versuchsanstalt (HLVA)*, Kassel ab 2000: Hessisches Dienstleistungszentrum für Landwirtschaft, Gartenbau und Naturschutz (HDLGN)*, Kassel Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA)*, Kassel	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL)*, Kassel und: Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen (teilweise) sowie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (teilweise)
Sachsen-Anhalt	Landesanstalt für Forstplanung Brandenburg, Labor Eberswalde	Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) Göttingen und: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (teilweise)

* HLVA, HDLGN, LUFA und LHL sind unterschiedliche Organisationsformen der gleichen Einrichtung

Die in den jeweiligen Laboren angewandten Methoden zur Vorbereitung, Untersuchung und Messung der Proben im Rahmen der BZE I und II in Niedersachsen sind in den folgenden Tabellen 47a bis 47f zusammenfassend dargestellt. Wo möglich, wird auf die entsprechende Methode im Handbuch Forstliche Analytik (HFA) (GAFA 2005 u. 2014) verwiesen. Methoden, die nicht den Vorgaben der BZE-Arbeitsanleitungen (WELLBROCK et al. 2006) entsprechen, sind entsprechend nach HFA codiert, soweit Informationen dazu vorlagen. Die HFA-Codes (GAFA 2014) sind in den Tabellen 48a bis 48f aufgelistet. Eine Zusammenstellung der angewandten Labormethoden für die BZE I und II in Hessen und Sachsen-Anhalt ist in PAAR et al. 2016 zu finden.

Erläuterungen zu den Tabellen:

In den Spalten „Methode“ ist jeweils das Kürzel der verwendeten Methode der NW-FVA eingetragen. Die Methoden sind veröffentlicht in den Berichten des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bände 46-49, 58-60 und 75-81 (KÖNIG u. FORTMANN 1996, 1999, 2012, KÖNIG et al. 2009). Bei Analysen anderer Labore (Eberswalde, Kassel, Hannover) sind folgende Kürzel verwendet worden:

AAS	=	Atomabsorptionsspektroskopie mit Flammentechnik
AAS-G	=	Atomabsorptionsspektroskopie mit Graphitrohrtechnik
AKE	=	effektive Austauschkapazitätsbestimmung
CFC	=	Continuous-Flow-Colorimetrie
DA	=	Druckaufschluss mit Salpetersäure
DA-PCI	=	Druckaufschluss mit Salpetersäure und Perchlorsäure
EA	=	Elementaranalyse
IC	=	Ionenchromatographie
ICP	=	Induktiv gekoppelte Plasmaspektroskopie
ICP-MS	=	Induktiv gekoppelte Plasmaspektroskopie gekoppelt mit einem Massenspektrometer
pH	=	pH-Messung
GA	=	Gesamtaufschluss mit Flußsäure

Legende der Farbmarkierungen:

Felder weiß unterlegt	=	Daten im Labor der NW-FVA erhoben
Felder orange unterlegt	=	Daten im Labor Kassel erhoben
Felder gelb unterlegt	=	Daten im Labor der BGR erhoben
Felder pink unterlegt	=	Daten der BZE II für die BZE I verwendet
x	=	entfällt

Tabelle 47a: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA
Effektiv austauschbare Kationen												
Al	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	AlAgcsAAS2.1	D1.1.5.1		
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	CaCagesAAS2.1	D11.1.5.1		
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	FeFegcsAAS2.1	D17.1.5.1		
K	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	KKgcsAAS2.1	D30.1.5.2		
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	MgMggcsAAS2.1	D36.1.5.1		
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	MnMngcsAAS2.1	D37.1.5.1		
Na	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	NaNagcsAAS2.1	D39.1.5.2		
pH	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	HH+2PHMI.1	D76.1.5.1		
Potentiell austauschbare Kationen												
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	CaCagesAAS2.1	D11.1.5.1		
K	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	KKgcsAAS2.1	D30.1.5.2		
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	MgMggcsAAS2.1	D36.1.5.1		
Na	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	NaNagcsAAS2.1	D39.1.5.2		
Ba-Rücktausch	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	BaBagesICP1.1	D4.1.5.2		
Wässriger Extrakt												
Al	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	AlAgcsAAS1.1	D1.1.4.1		
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	CaCagesAAS1.1	D11.1.4.1		
									CaCagesICP1.1	D11.1.4.2		

(Fortsetzung Tabelle 47a)

Cl	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	ClCFC1.1	D13.2.4.3
Cges	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	CgesTOC1.1	D31.1.4.1
Canorg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	CCanorgTOC1.1	D31.3.4.3
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	FeFegesAAS1.1	D17.1.4.1
									FeFegesICP1.1	D17.1.4.2
K	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	KKgesAAS1.1	D30.1.4.2
									KKgesICP1.1	D30.1.4.4
Leitfähigkeit	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	LFLFLMI.1	D77.1.4.2
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	MgMggesAAS1.1	D36.1.4.1
									MgMggesICP1.1	D36.1.4.2
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	MnMngesAAS1.1	D37.1.4.1
									MnMngesICP1.1	D37.1.4.3
Na	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NaNagesAAS1.1	D39.1.4.2
									NaNagesICP1.1	D39.1.4.4
Nges	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNgesCFC1.1	D58.1.4.2
NH4-N	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNH4CFC1.1	D58.3.4.3
NO3-N	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNO2+3CFC2.1	D58.4.4.2
Pges	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	PPgesICP1.1	D44.1.4.1
PO4-P	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	PPO4CFC1.2	D44.2.4.3
pH	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	HH+PHMI.1	D76.1.4.1
SO4-S	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	SSO4CFC1.1	D54.2.4.3

(Fortsetzung Tabelle 47a)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	Methode	
Säureextrakt Salpetersäure										
P	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN1.1	A.3.3.4	PPO4CFC2.1	D44.2.6.1
									PPO4CFC2.2	D44.2.6.1
Säureextrakt Königswasser										
Al	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	AlAlgesICP16.1	D11.1.6.2
									AlAlgesICP19.1	D11.6.2
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
									CaCagesICP19.1	D11.1.6.3
Cd	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CdCdgesICP16.1	D9.1.6.4
									CdCdgesAAS8.1	D9.1.6.3
Co	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CoCogesICP16.1	D15.1.6.6
									CoCogesICP19.1	D15.1.6.6
Cr	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CrCgesICP16.1	D14.1.6.5
									CrCgesICP19.1	D14.1.6.5
Cu	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CuCugesICP16.1	D32.1.6.6
									CuCugesICP19.1	D32.1.6.6
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	FeFegesICP16.1	D17.1.6.2
									FeFegesICP19.1	D17.1.6.2
K	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKgesICP16.1	D30.1.6.4
									KKgesICP19.1	D30.1.6.4
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgMggesICP16.1	D36.1.6.2
									MgMggesICP19.1	D36.1.6.2
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP16.1	D37.1.6.3
									MnMngesICP19.1	D37.1.6.3

(Fortsetzung Tabelle 47a)

Na	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNagesICP16.1	D39.1.6.4
									NaNagesICP19.1	D39.1.6.4
Ni	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNagesICP16.1	D42.1.6.6
									NiNagesICP16.2	D42.1.6.6
P	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.1	D44.1.6.1
									PPgesICP16.2	D44.1.6.1
Pb	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PbPbgesICP16.1	D6.1.6.6
									PbPbgesICP19.1	D6.1.6.6
S	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP16.1	D54.1.6.1
									SSgesICP19.1	D54.1.6.1
Zn	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
									ZnZngesICP19.1	D73.1.6.4
Gesamtgehalte										
Al	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Ca	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Cd	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Co	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Cr	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Cu	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Fe	x	x	x	x	x	x		x	x	x
K	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Mg	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Mn	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Na	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Ni	x	x	x	x	x	x		x	x	x
P	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Pb	x	x	x	x	x	x		x	x	x
S	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Zn	x	x	x	x	x	x		x	x	x

(Fortsetzung Tabelle 47a)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode
Elementaranalyse										
C	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	C _{Ges} CNS1.1	D31.1.1.1
N	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	NN _{Ges} CNS1.1	D58.1.1.1
Carbonat-Gehalt										
CO ₃ -C	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	CO ₃ Ges1.1	x	CCO ₃ SCH1.1	D31.1.1.1
pH-Wert (H₂O)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	pHH ₂ O1.1	A3.1.1.1	HH+PHM1.1	D76.1.4.1
							pHH ₂ O1.2	A3.1.1.1	HH+PHM1.1	D76.1.4.1
pH-Wert (CaCl₂)										
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (KCl)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	pHKCl1.1	A3.1.1.3	HH+PHM1.1	D76.1.5.1
							pHKCl1.2	A3.1.1.3	HH+PHM1.1	D76.1.5.1
Trockenrohichte des Feinbodens										
TRDF	T5.1	x	x	x	x	x	TRD1.1	A2.2	x	x
Skelettanteil										
SKA	T5.1	x	x	x	x	x	TRD1.2.1	A2.8	x	x
							TRD1.1	A2.2	x	x

Tabelle 47b: Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA
Effektiv austauschbare Kationen												
Al	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKE1.1	A3.2.1.1	AlAlgesICP10.1	D1.1.5.2		
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKE1.1	A3.2.1.1	CaCagesICP10.1	D1.1.5.2		
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKE1.1	A3.2.1.1	FeFegesICP10.1	D17.1.5.3		
K	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKE1.1	A3.2.1.1	KKgesICP10.1	D30.1.5.4		
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKE1.1	A3.2.1.1	MgMggesICP10.1	D36.1.5.2		
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKE1.1	A3.2.1.1	MnMngesICP10.1	D37.1.5.3		
Na	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKE1.1	A3.2.1.1	NaNagesICP10.1	D39.1.5.4		
pH	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKE1.1	A3.2.1.1	HH+2PHM4.1	D76.1.5.1		
Potenitiell austauschbare Kationen												
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKT2.1	A3.2.1.2	CaCagesICP13.1	D11.1.5.2		
K	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKT2.1	A3.2.1.2	KKgesICP13.1	D30.1.5.4		
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKT2.1	A3.2.1.2	MgMggesICP13.1	D36.1.5.2		
Na	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKT2.1	A3.2.1.2	NaNagesICP13.1	D39.1.5.4		
Ba-Rücktausch	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		AKT2.1	A3.2.1.2	BaBagesICP10.1	D4.1.5.3		
Wässriger Extrakt												
Al	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		EXTH2O1.1	A3.2.2.1	AlAlgesICP7.2	D1.1.4.2		
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		EXTH2O1.1	A3.2.2.1	CaCagesICP7.2	D11.1.4.2		
Cl	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		EXTH2O1.1	A3.2.2.1	ClClCFE3.2	D13.2.4.2		
Cges	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x		EXTH2O1.1	A3.2.2.1	CCgesTOC3.2	D31.1.4.1		
									CCgesTOC3.3	D31.1.4.1		

(Fortsetzung Tabelle 47b)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	Methode	Methode	Methode	Methode	Methode	Methode
Canorg	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	HFA A1.3.2	x	EXTH2O1.1	HFA A3.2.2.1	EXTH2O1.1	EXTH2O1.1	CCanorgTOC3.1 D31.3.4.3
Fe	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	FeFegesICP7.2 D17.1.4.2	
K	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	KKgesICP7.2 D30.1.4.4	
Leitfähigkeit	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	LFLFLFM2.1 D77.1.4.2	
Mg	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	MgNagesICP7.2 D36.1.4.2	
Mn	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	MnMngesICP7.2 D37.1.4.3	
Na	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	NaNagesICP7.2 D39.1.4.4	
Nges	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	NNgesTOC2.1 D58.1.4.4	
NH4-N	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	NNH4CFC6.1 D58.3.4.3	
NO3-N	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	NNO2+3CFC5.4 D58.4.4.2	
Pges	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	PPgesICP7.2 D44.1.4.1	
PO4-P	x	x	x	x	x	x	x	x	
pH	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	IHH+PHM6.1 D76.1.4.3	
SO4-S	x	x	x	x	x	x	x	x	
Sges	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	EXTH2O1.1	SSgesICP10.2 D54.1.4.1	
Säureextrakt Salpetersäure									
P	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Säureextrakt Königswasser									
Al	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1 OAKW1.1	A3.3.3	A1.4.1 OAKW1.1	AlAlgesICP16.1	D1.1.6.2
Ca	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1 OAKW1.1	A3.3.3	A1.4.1 OAKW1.1	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
Ca					A1.4.1 KW	A3.3.3	A1.4.1 KW		D11.1.6.3

(Fortsetzung Tabelle 47b)

Cd	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CdCdggesICP16.1	D9.1.6.4
Cd						A1.4.1	KW	A3.3.3		D9.1.6.5
Co	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CoCogesICP16.1	D15.1.6.6
Cr	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CrCgesICP16.1	D14.1.6.5
Cr						A1.4.1	KW	A3.3.3		D14.1.6.6
Cu	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CuCuogesICP16.1	D32.1.6.6
Cu						A1.4.1	KW	A3.3.3		D32.1.6.8
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	FeFegesICP16.1	D17.1.6.2
Fe						A1.4.1	KW	A3.3.3		D17.1.6.4
K	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKggesICP16.1	D30.1.6.4
K						A1.4.1	KW	A3.3.3		D30.1.6.4
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgMggesICP16.1	D36.1.6.2
Mg						A1.4.1	KW	A3.3.3		D36.1.6.2
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP16.1	D37.1.6.3
Mn						A1.4.1	KW	A3.3.3		D37.1.6.3
Na	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNagesICP16.1	D39.1.6.4
Na						A1.4.1	KW	A3.3.3		D39.1.6.4
Ni	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNiggesICP16.1	D42.1.6.6
Ni						A1.4.1	KW	A3.3.3		D42.1.6.8
P	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.1	D44.1.6.1
P						A1.4.1	KW	A3.3.3		D44.1.6.1
Pb	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PbPbggesICP16.1	D6.1.6.6
Pb						A1.4.1	KW	A3.3.3		D6.1.6.7
S	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP16.1	D54.1.6.1
S						A1.4.1	KW	A3.3.3		D54.1.6.1

(Fortsetzung Tabelle 47b)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	Methode	HFA
Zn	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
Zn					A1.4.1	KW	A3.3.3		D73.1.6.6
Gesamtgehalte									
Al	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	AlAlgesICP16.1	D11.1.6.2
Ca	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	CaCaGesICP16.1	D11.1.6.3
Cd	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	CdCdGesAAS8.1	D9.1.6.3
Co	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	CoCoGesICP16.1	D15.1.6.6
Cr	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	CrCrGesICP16.1	D14.1.6.5
Cu	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	CuCuGesICP16.1	D32.1.6.6
Fe	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	FeFeGesICP16.1	D17.1.6.2
K	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	KKGesICP16.1	D30.1.6.4
Mg	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	MgMgGesICP16.1	D36.1.6.2
Mn	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	MnMnGesICP16.1	D37.1.6.3
Na	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	NaNagesICP16.1	D39.1.6.4
Ni	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	NiNiGesICP16.1	D42.1.6.6
P	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	PPGesICP16.1	D44.1.6.1
Pb	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	PbPbGesICP16.1	D6.1.6.6
S	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	SSGesICP16.1	D54.1.6.1
Zn	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	A3.3.1	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
Elementaranalyse									
C	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	CCgesCNS5.1	D31.1.1.1
N	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	NNgesCNS5.1	D58.1.1.1

(Fortsetzung Tabelle 47b)

Carbonat-Gehalt										
CO ₃ -C	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULLCO3	x	CCO3C1.1	D31.3.1.3
pH-Wert (H₂O)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	x	pHH2O6.1	A3.1.1.2	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
pH									HH+PHM7.1	D76.1.5.1
pH-Wert (CaCl₂)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	x	pHCaCl26.1	A3.1.1.7	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
pH									HH+PHM7.1	D76.1.5.1
pH-Wert (KCl)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	x	pHKCl6.1	A3.1.1.4	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
Trockenrohichte des Feinbodens										
x	T5.1	x	x	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x	x
Skelettanteil										
x	T5.1	x	x	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x	x

Tabelle 47c: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	Methode
Austauschbare Kationen									
Al	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ca	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Fe	x	x	x	x	x	x	x	x	x
K	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mg	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mn	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Na	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Säureextrakt Salpetersäure									
Al	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	AlAggesICP1.1 D1.1.6.2			
Ca	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	CaCagesICP1.1 D11.1.6.2			
Cd	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	CdCdAAS3.1 D9.1.6.3			
Cu	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	CuCuAAS3.1 D32.1.6.4			
Fe	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	FeFeGesICP1.1 D17.1.6.2			
K	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	KKGesICP1.1 D30.1.6.4			
Mg	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	MgMggesICP1.1 D36.1.6.2			
Mn	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	MnMngesICP1.1 D37.1.6.3			
P	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	PPgesICP1.1 D44.1.6.1			
Pb	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	PbPbAAS3.1 D6.1.6.3			
Zn	T4.1 A1.2.1	SBP2.1 A1.3.1	MBP1.1 A1.4.1	DAN2.1 A3.3.4	DAN2.1 A3.3.4	ZnZngesICP1.1 D73.1.6.4			

(Fortsetzung Tabelle 47c)

Säureextrakt Königswasser										
Al	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	AlAggesICP16.1	D1.1.6.2
Al							KW	A3.3.3	ICP	D1.1.6.2
Ca	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
Ca							KW	A3.3.3	ICP	D11.1.6.2
Cd	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CdCdgesAAS8.1	D9.1.6.3
Cd							KW	A3.3.3	ICP-MS	D9.1.6.5
Co	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CoCogesICP16.1	D15.1.6.6
Cr	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CrCragesICP16.1	D14.1.6.5
Cr							KW	A3.3.3	ICP	D14.1.6.5
Cu	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CuCuagesICP16.1	D32.1.6.6
Cu							KW	A3.3.3	ICP-MS	D32.1.6.8
Fe	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	FeFeagesICP16.1	D17.1.6.2
Fe							KW	A3.3.3	ICP	D17.1.6.2
K	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKagesICP16.1	D30.1.6.4
K							KW	A3.3.3	ICP	D30.1.6.4
Mg	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgMggesICP16.1	D36.1.6.2
Mg							KW	A3.3.3	ICP	D36.1.6.2
Mn	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP16.1	D37.1.6.3
Mn							KW	A3.3.3	ICP	D37.1.6.3
Na	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNagesICP16.1	D39.1.6.4
Ni	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNigesICP16.1	D42.1.6.6
Ni							KW	A3.3.3	ICP	D42.1.6.6
P	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.1	D44.1.6.1
P							KW	A3.3.3	ICP	D44.1.6.1

(Fortsetzung Tabelle 47c)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	Methode
Pb	T4.1	A1.2.1	MBP1.1	A1.3.1	A1.4.1	A3.3.3	OAKW1.1	PbPbgesICP16.1	D6.1.6.6
Pb						A3.3.3	KW	ICP-MS	D6.1.6.7
S	T4.1	A1.2.1	MBP1.1	A1.3.1	A1.4.1	A3.3.3	OAKW1.1	SSgesICP16.1	D54.1.6.1
S						A3.3.3	KW	ICP	D54.1.6.1
Zn	T4.1	A1.2.1	MBP1.1	A1.3.1	A1.4.1	A3.3.3	OAKW1.1	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
Zn						A3.3.3	KW	ICP	D73.1.6.4
Elementaranalyse									
C	T4.1	A1.2.1	MBP1.1	A1.3.1	A1.4.1		ATNULL	CCgesCNS1.1	D31.1.2.1
N	T4.1	A1.2.1	MBP1.1	A1.3.1	A1.4.1		ATNULL	NNgesCNS1.1	D58.1.2.1
Carbonat-Gehalt									
C-CO ₃	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (H₂O)									
pH	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	x		pHH2O2.1	HH+PHM1.1	D76.1.4.1
pH-Wert (CaCl₂)									
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (KCl)									
pH	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	x		pHKCl2.1	HH+PHM1.1	D76.1.5.1
Humusvorrat									
HV	T4.1	A1.2.1	x	x	x		HV1.1	A2.4	x

Tabelle 47d: Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden		Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode		Methode		Methode		
Austauschbare Kationen									
Al	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	AlAlgesICP10.1	D1.1.5.2
Ca	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	CaCagesICP10.1	D11.1.5.2
Fe	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	FeFegesICP10.1	D17.1.5.3
K	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	KKgesICP10.1	D30.1.5.4
Mg	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	MgMggesICP10.1	D36.1.5.2
Mn	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	MnMngesICP10.1	D37.1.5.3
Na	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	NaNagesICP10.1	D39.1.5.4
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	HH+2PHM4.1	D76.1.5.1
Säureextrakt Salpetersäure									
Al	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ca	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cd	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cu	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Fe	x	x	x	x	x	x	x	x	x
K	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mg	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mn	x	x	x	x	x	x	x	x	x
P	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Pb	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Zn	x	x	x	x	x	x	x	x	x

(Fortsetzung Tabelle 47d)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode							
Säureextrakt Königswasser										
Al	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	AlAlgesICP16.1	D11.1.6.2
Ca	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
Cd	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CdCdgesAAS8.1	D9.1.6.3
Co	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CoCogesICP16.1	D15.1.6.6
Cr	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CrCagesICP16.1	D14.1.6.5
Cu	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CuCuGesICP16.1	D32.1.6.6
Fe	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	FeFegesICP16.1	D17.1.6.2
K	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKgesICP16.1	D30.1.6.4
Mg	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgMggesICP16.1	D36.1.6.2
Mn	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP16.1	D37.1.6.3
Na	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNaGesICP16.1	D39.1.6.4
Ni	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNiGesICP16.1	D42.1.6.6
P	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.1	D44.1.6.1
Pb	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PbPbgesICP16.1	D6.1.6.6
S	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP16.1	D54.1.6.1
Zn	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
Elementaranalyse										
C	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CCgesCNS5.1	D31.1.2.1
N	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NNgesCNS5.1	D58.1.2.1
Carbonat-Gehalt										
CO3-C	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	CCO3C1.1	D31.3.2.3

(Fortsetzung Tabelle 47d)

pH-Wert (H₂O)										
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHH2O6.1	A3.1.1.2	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
pH-Wert (CaCl₂)										
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHCaCl26.1	A3.1.1.7	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
pH-Wert (KCl)										
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHKCl6.1	A3.1.1.4	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
Humusvorrat										
HV	T4.1	A1.2.1	x	x	x	x	HV4.1	A2.6	x	x

Tabelle 47e: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode
Säureextrakt Salpetersäure									
Al	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	AlAgcsICP1.1	D1.1.6.2
Ca	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	CaCagesICP1.1	D1.1.6.2
Cd	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	CdCdAAS3.1	D9.1.6.3
Co	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cr	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cu	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	CuCuAAS3.1	D32.1.6.4
Fe	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	FeFegcsICP1.1	D17.1.6.2
K	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	KKgcsICP1.1	D30.1.6.4
Mg	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	MgMgcsICP1.1	D36.1.6.2
Mn	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	MnMngcsICP1.1	D37.1.6.3
Na	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ni	x	x	x	x	x	x	x	x	x
P	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	PPgcsICP1.1	D44.1.6.1
Pb	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	PbPbAAS3.1	D6.1.6.3
S	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Zn	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	ZnZngcsICP1.1	D73.1.6.4
Elementaranalyse									
C	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	ATNULL	x	CCgesCNS1.1	D31.3.2.1
N	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	ATNULL	x	NNgesCNS1.1	D58.1.3.1
S	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	ATNULL	x	SSgesCNS1.1	D54.1.3.1
Cl	T4.1	B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	Clges1.1	B3.2.2	ClClCF1.2	D13.2.4.3
Blattgewichte									
X	T4.1	B1.2.1	x	x	x	BGW1.1	B2.3	x	x
Nadelgewichte									
X	T4.1	B1.2.1	x	x	x	NWG1.1	B2.2	x	x

Tabelle 47f: Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	HFA
Säureextrakt Salpetersäure										
Al	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	AlAgelICP15.1	D1.1.6.2
Ca	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CaCagesICP15.1	D11.1.6.3
Cd	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CdCdgesICP15.1	D9.1.6.4
Co	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CoCogesICP15.1	D15.1.6.6
Cr	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CrCragesICP15.1	D14.1.6.5
Cu	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CuCuagesICP15.1	D32.1.6.6
Fe	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	FeFegesICP15.1	D17.1.6.2
K	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	KKgesICP15.1	D30.1.6.4
Mg	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	MgMggesICP15.1	D36.1.6.2
Mn	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	MnMngesICP15.1	D37.1.6.4
Na	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	NaNagesICP15.1	D39.1.6.4
Ni	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	NiNigesICP15.1	D42.1.6.6
P	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	PPgesICP15.1	D44.1.6.1
Pb	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	PbPbgesICP15.1	D6.1.6.6
S	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	SSgesICP15.1	D54.1.6.1
Zn	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	ZnZngesICP15.1	D73.1.6.4
Elementaranalyse										
C	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	ATNUILL	x	CCgesCNS5.1	D31.1.3.1
N	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	ATNUILL	x	NNgesCNS5.1	D58.1.3.1
Blattgewichte										
x	T4.1	B1.2.1	x	x	x	x	BGW1.1	B2.3	x	x
Nadelgewichte										
x	T4.1	B1.2.1	x	x	x	x	NWG1.2	B2.2	x	x

Tabelle 48a: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Effektiv austauschbare Kationen			
Al	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;2;2;-1;1;0;
Ca	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;2;0;
Fe	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;-1;0;
K	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
Mg	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;2;0;
Mn	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;-1;0;
Na	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
pH	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;11;0;0;2;2;-3;
Potentiell austauschbare Kationen			
Ca	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;2;0;
K	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
Mg	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;2;0;
Na	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
Ba-Rücktausch	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;1;
Wässriger Extrakt			
Al	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;2;2;-1;1;0;
			D;4;1;1;-1;-1;1;
Ca	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;2;2;-1;3;0;
			D;4;1;1;-1;-1;2;
Cl	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;1;1;2;0;
Cges	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;8;2;1;4;2;-1;
Canorg	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;8;2;1;3;-1;-1;
Fe	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;0;
			D;4;1;1;-1;-1;0;
K	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
			D;4;1;1;-1;-1;0;
Leitfähigkeit	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;12;1;3;2;-3;-3;
Mg	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;2;2;-1;1;0;
			D;4;1;1;-1;-1;1;
Mn	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;-1;0;
			D;4;1;1;-1;-1;0;
Na	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
			D;4;1;1;-1;-1;0;
Nges	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;3;3;-1;3;
NH4-N	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;-1;1;2;1;
NO3-N	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;-1;5;2;2;

(Fortsetzung Tabelle 48a)

Wässriger Extrakt

P _{ges}	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
PO ₄ -P	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;	D;9;2;-1;5;2;5;
pH	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
SO ₄ -S	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;	D;9;2;4;1;-1;2;

Säureextrakt Salpetersäure

P	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;9;2;-1;1;2;3;
			D;9;2;-1;1;2;3;

Säureextrakt Königswasser

Al	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
Ca	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
			D;4;1;2;-1;-1;0;
Cd	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;2;2;
			D;2;1;4;2;7;0;
Co	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
			D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
Fe	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
			D;4;1;2;-1;-1;1;
K	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
			D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
			D;4;1;2;-1;-1;0;
Mn	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;3;
			D;4;1;2;-1;-1;9;
Na	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
			D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
P	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1
			D;4;2;2;-1;-1;1;
Pb	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
			D;4;2;2;-1;1;0;
S	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
Zn	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
			D;4;2;2;-1;4;1;

(Fortsetzung Tabelle 48a)

Gesamtgehalte			
Al	x	x	x
Ca	x	x	x
Cd	x	x	x
Co	x	x	x
Cr	x	x	x
Cu	x	x	x
Fe	x	x	x
K	x	x	x
Mg	x	x	x
Mn	x	x	x
Na	x	x	x
Ni	x	x	x
P	x	x	x
Pb	x	x	x
S	x	x	x
Zn	x	x	x
Elementaranalyse			
C	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
N	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
Carbonat-Gehalt			
CO3-C	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1;	D;14;1;1;2;2;0;
pH-Wert (H2O)			
pH	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;1;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
		C1;1;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (CaCl2)			
pH	x	x	x
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;3;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
		C1;3;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Trockenrohichte des Feinbodens			
TRDF	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;112;6;2;-3	x
Skelettanteil			
SKA	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0;1;1-5;-3	x
		C3;112;6;5;-3	x

Tabelle 48b: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Boden*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Effektiv austauschbare Kationen			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;2;-1;1;
Fe	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;2;-1;1;
K	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;2;-1;1;
Na	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Potentiell austauschbare Kationen			
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;12;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
K	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;12;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;12;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Na	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;12;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
Ba-Rücktausch	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;12;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;6;
Wässriger Extrakt			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
Cl	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;22;4;1;4;-1;1;
Cges	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;8;2;1;4;7;-1;
			D;8;2;1;4;7;-1;
Canorg	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;8;2;1;3;-1;-1;
			D;8;2;1;3;-1;-1;
Fe	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
K	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Leitfähigkeit	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;12;1;3;2;-3;-3;
Mg	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;3;
Na	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Nges	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;8;2;3;4;7;-1;
			D;8;2;3;4;7;-1;
NH4-N	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;9;2;1;1;-1;1;
NO3-N	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;9;2;1;1;-1;0;
Pges	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
PO4-P	x	x	x
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
SO4-S	x	x	x
Sges	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;

(Fortsetzung Tabelle 48b)

Säureextrakt Salpetersäure			
P	x	x	x
Säureextrakt Königswasser			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;5
Cd	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;2;1;4;2;7;0;
Cd	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;5;1;1;-1;-1;0
Co	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cr	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;5;1;1;-1;-1;0
Cu	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;5;1;1;-1;-1;8
Fe	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
Fe	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;9
K	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
K	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0
Mg	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mg	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;2
Mn	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;3;
Mn	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0
Na	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Na	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0
Ni	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Ni	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;5;1;1;-1;-1;0
P	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
P	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1
Pb	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Pb	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;5;1;1;-1;-1;2
S	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
S	B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0
Zn	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;2;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;4;1;
Gesamtgehalte			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;0;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;0;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Cd	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;0;-3;-3;-3;	D;2;1;4;2;7;0;
Co	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;0;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;0;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;5;0;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;

(Fortsetzung Tabelle 48b)

Gesamtgehalte			
Fe	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
K	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;3;
Na	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
P	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
Pb	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
S	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Zn	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;50;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;4;1;
Elementaranalyse			
C	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1-1	D;8;1;2;4;-2;-1;
N	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1-1	D;8;1;2;5;-2;-1;
Carbonat-Gehalt			
CO ₃ -C	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1-1	D;8;1;1;1;-1;-1;
pH-Wert (H₂O)			
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;2;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
			D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (CaCl₂)			
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;7;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
			D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;4;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Trockenrohichte des Feinbodens			
TRDF	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x
Skelettanteil			
SKA	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x

Tabelle 48c: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Austauschbare Kationen			
Al	x	x	x
Ca	x	x	x
Fe	x	x	x
K	x	x	x
Mg	x	x	x
Mn	x	x	x
Na	x	x	x
pH	x	x	x
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Ca	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;2;
Cd	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;2;1;4;1;6;0;
Cu	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;2;1;2;1;-1;0;
Fe	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
K	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Mg	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Mn	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
P	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Pb	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;2;1;4;1;6;0;
Zn	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Säureextrakt Königswasser			
Al	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Al		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;
Ca	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Ca		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;
Cd	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;2;1;4;2;7;0;
Cd		C1;52;-3;-3;-3;	D5;1;1;1;-1;1;
Co	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cr		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;1;
Cu	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu		C1;52;-3;-3;-3;	D5;1;1;-1;-1;0;
Fe	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
Fe		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;0;
K	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
K		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;0;
Mg	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mg		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;0;

(Fortsetzung Tabelle 48c)

Säureextrakt Königswasser			
Mn	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;3;
Mn		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;1
Na	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Ni		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;1
P	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1
P		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;2
Pb	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Pb		C1;52;-3;-3;-3;	D5;1;1;1;-1;6
S	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
S		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;3
Zn	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Zn		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;1
Elementaranalyse			
C	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
N	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
Carbonat-Gehalt			
C-CO ₃	x	x	x
pH-Wert (H₂O)			
pH	B1;1;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;1;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (CaCl₂)			
pH	x	x	x
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;1;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Humusvorrat			
HV	B1;1;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;114;-3;-3;-3	x

Tabelle 48d: Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Austauschbare Kationen			
Al	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;19;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ca	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;19;-3;-3;-3;	D;4;1;2;2;-1;1;
Fe	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;19;-3;-3;-3;	D;4;1;2;2;-1;1;
K	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;19;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;19;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;19;-3;-3;-3;	D;4;1;2;2;-1;1;
Na	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;19;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;19;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	x	x	x
Ca	x	x	x
Cd	x	x	x
Cu	x	x	x
Fe	x	x	x
K	x	x	x
Mg	x	x	x
Mn	x	x	x
P	x	x	x
Pb	x	x	x
Zn	x	x	x
Säureextrakt Königswasser			
Al	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Ca	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Cd	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;2;1;4;2;7;0;
Co	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Fe	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
K	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;3;
Na	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
P	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
Pb	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
S	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Zn	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;4;1;

(Fortsetzung Tabelle 48d)

Elementaranalyse			
C	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;-2;-1;
N	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;5;-2;-1;
Carbonat-Gehalt			
CO ₃ -C	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;1;1;-1;-1;
pH-Wert (H₂O)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;2;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (CaCl₂)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;7;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;4;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Humusvorrat			
HV	B1;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;116;-3;-3;-3	x

Tabelle 48e: *Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Ca	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;2;
Cd	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;2;1;4;1;6;0;
Co	x	x	x
Cr	x	x	x
Cu	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;2;1;2;1;-1;0;
Fe	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
K	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Mg	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Mn	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Na	x	x	x
Ni	x	x	x
P	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Pb	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;2;1;4;1;6;0;
S	x	x	x
Zn	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Elementaranalyse			
C	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
N	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
S	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;1;5;-1;-1;
Cl	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;71;-3;-3;-3;	D;9;2;1;5;2;0;
Blattgewichte			
BGW	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;213;1;1;-3;	x
Nadelgewichte			
NGW	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;212;1;2;-3;	x

Tabelle 48f: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;2;2;
Ca	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Cd	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Co	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Fe	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
K	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;9;
Na	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
P	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
Pb	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
S	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Zn	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;4;1;
Elementaranalyse			
C	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;-2;-1;
N	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;5;-2;-1;
Blattgewichte			
X	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;213;1;1;-3;	x
Nadelgewichte			
X	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;212;1;2;-3;	x

Über die Vergleichbarkeit der bei der BZE I und BZE II angewandten Methoden gibt Tabelle 49 Auskunft.

Tabelle 49: Vergleichbarkeit der in den drei Bundesländern angewandten Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden (Boden, Humus, Pflanze) (x = nicht durchgeführt)

Boden: Vergleichbarkeit der Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden				
	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Niedersachsen	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Hessen	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Sachsen-Anhalt	Vergleichbarkeit zwischen allen drei Ländern
<i>Probenvor- bereitung</i>				
Trocknung	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar
Siebung	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar
Mahlung	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar
<i>Untersu- chungsmethode</i>				
Eff. Austausch- kapazität	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar
Pot. Austausch- kapazität	vergleichbar	vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich die pot. Austausch- kapazität durchge- führt	vergleichbar	vergleichbar
Wässriger 1:2 Extrakt	vergleichbar	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vergleichbar
Gesamtauf- schluss (Ca, Mg, Mn, Na, K, Al, Fe, P)	x	x	liegt nur von BZE I vor; vergleichbar mit Königs- wasseraufschluss für Ca, Fe, Mn, P	x
Druckauf- schluss Sal- petersäure (P)	liegt nur von BZE I vor; vergleichbar mit Königswasser- aufschluss für P	x	x	x
Druckauf- schluss Sal- petersäure (Cd, Cu, Pb, Zn)	x	x	liegt nur für BZE I vor; vergleichbar mit Königswasser- aufschluss für Zn, Cu, Pb	x

(Fortsetzung Tabelle 49)

Königswasseraufschluss	vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt	vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt	vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt	vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt
Königswasseraufschluss (P)	x	vergleichbar	x	x
Elementaranalyse	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar
pH-Werte	nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar	nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar	nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar	nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar
Trockenrohichte des Feinbodens	im Wesentlichen vergleichbar; allerdings wurde bei der BZE I mit einer Standard-Steindichte von 2,65 gerechnet, während bei der BZE II die jeweilige Steindichte bestimmt wurde	liegt nur von der BZE II vor; für BZE I verwendet	liegt nur von der BZE II vor; für BZE I verwendet	im wesentlichen vergleichbar
Skelettanteil	nur Schätzungen bei der BZE I; liegt von der BZE II vor; für Punkte, die nur bei der BZE I beprobt wurden, wurden die Schätzungen der BZE I verwendet; für alle übrigen Punkte wurden die Messdaten der BZE II verwendet	nur Schätzungen bei der BZE I; liegt von der BZE II vor; für BZE I verwendet	nur Schätzungen bei der BZE I; liegt von der BZE II vor; für BZE I verwendet	Messdaten der BZE II wurden für BZE I und II verwendet; Ausnahme: Punkte der BZE I in Niedersachsen, die nur bei der BZE I beprobt wurden

(Fortsetzung Tabelle 49)

<i>Elementbestimmungen</i>				
Einzelelementbestimmungen	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden
Humus: Vergleichbarkeit der Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden				
	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Niedersachsen	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Hessen	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Sachsen-Anhalt	Vergleichbarkeit zwischen allen drei Ländern
<i>Probenvorbereitung</i>				
Trocknung	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar
Siebung	nicht vergleichbar; bei der BZE I wurden die getrockneten Humusproben direkt durch ein 2 mm-Sieb gesiebt und der Rückstand verworfen; bei der BZE II wurde die	nicht vergleichbar; bei der BZE I wurden die getrockneten Humusproben direkt durch ein 2 mm-Sieb gesiebt und der Rückstand verworfen; bei der BZE II wurde die	nicht vergleichbar; bei der BZE I wurden die getrockneten Humusproben direkt durch ein 2 mm-Sieb gesiebt und der Rückstand verworfen; bei der BZE II wurde die	vergleichbar jeweils für BZE I und BZE II zwischen den Ländern; Vergleich zwischen BZE I und BZE II siehe Anmerkungen bei den Ländern

(Fortsetzung Tabelle 49)

	Fraktion 2-20 mm geschreddert und vor dem Mahlen mit der Fraktion > 2 mm vereint. Dies führt zu einer „Verdünnung“ der Gehalte an Nährstoffen und Schwermetallen wegen des größeren Holzanteils der Fraktion 2-20 mm. Eine Untersuchung von Fortmann u. König (HFA, Methode A1.2.3, Anhang 1) dazu hat ergeben, dass dadurch die Vorräte der jeweiligen Elemente um bis zu 10 % bezogen auf den Gesamtvorrat der Humusaufgabe bei der BZE I überschätzt werden	Fraktion 2-20 mm geschreddert und vor dem Mahlen mit der Fraktion > 2 mm vereint. Dies führt zu einer „Verdünnung“ der Gehalte an Nährstoffen und Schwermetallen wegen des größeren Holzanteils der Fraktion 2-20 mm. Eine Untersuchung von Fortmann u. König (HFA, Methode A1.2.3, Anhang 1) dazu hat ergeben, dass dadurch die Vorräte der jeweiligen Elemente um bis zu 10 % bezogen auf den Gesamtvorrat der Humusaufgabe bei der BZE I überschätzt werden	Fraktion 2-20 mm geschreddert und vor dem Mahlen mit der Fraktion > 2 mm vereint. Dies führt zu einer „Verdünnung“ der Gehalte an Nährstoffen und Schwermetallen wegen des größeren Holzanteils der Fraktion 2-20 mm. Eine Untersuchung von Fortmann u. König (HFA, Methode A1.2.3, Anhang 1) dazu hat ergeben, dass dadurch die Vorräte der jeweiligen Elemente um bis zu 10 % bezogen auf den Gesamtvorrat der Humusaufgabe bei der BZE I überschätzt werden	
Mahlung	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar
<i>Untersuchungsmethode</i>				
Austauschkapazität Humus	liegt nur von der BZE II vor	liegt nur von der BZE II vor	liegt nur von der BZE II vor	vergleichbar für BZE II zwischen den Ländern
Gesamtaufschluss (Ca, Mg, Mn, Na, K, Al, Fe, P)	x	x	liegt nur von der BZE I vor; vergleichbar mit Königswasseraufschluss für Ca, Mg, Fe, Mn, P	x
Druckaufschluss Salpetersäure	liegt nur von der BZE I vor; prinzipiell vergleichbar mit Königswasseraufschluss für die Elemente Ca, Mn, Fe, P, S, Cu, Co, Cd, Pb, Zn;	x	x	x

(Fortsetzung Tabelle 49)

	allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung)			
Druckaufschluss Salpetersäure (Cd, Cu, Pb, Zn)	x	x	liegt nur von der BZE I vor; vergleichbar mit Königswasseraufschluss	x
Königswasseraufschluss	prinzipiell vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung)	prinzipiell vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung)	prinzipiell vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung)	prinzipiell zwischen den 3 Ländern vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung)
Elementaranalyse	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar	vergleichbar
pH-Werte	nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A.3.1.1.1, Anhang 1; Methode A.3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar	nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A.3.1.1.1, Anhang 1; Methode A.3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar	nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A.3.1.1.1, Anhang 1; Methode A.3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar	nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A.3.1.1.1, Anhang 1; Methode A.3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar
Humusvorrat	vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus	vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus	vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus	vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus

(Fortsetzung Tabelle 49)

	der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird	der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird	der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird	der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird
<i>Elementbestimmungen</i>				
Einzelelementbestimmungen	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden

Pflanze: Vergleichbarkeit der Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden

	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Niedersachsen	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Hessen	Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Sachsen-Anhalt	Vergleichbarkeit zwischen allen drei Ländern
<i>Probenvorbereitung</i>				
Trocknung	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vermutlich vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar
Siebung	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vermutlich vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar
Mahlung	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vermutlich vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar

(Fortsetzung Tabelle 49)

<i>Untersuchungsmethode</i>				
Druckaufschluss Salpetersäure	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar
Elementaranalyse	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar
Nadel-/Blattgewichte	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	liegt nur von der BZE II vor	soweit vorhanden vergleichbar
<i>Elementbestimmungen</i>				
Einzelelementbestimmungen	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden	liegt nur von der BZE II vor	vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden	soweit vorhanden vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden

11.2 Methodendokumentation und Qualitätssicherung in den beteiligten Laboren

Die Dokumentation der verwendeten Methoden und die Qualitätssicherung erfolgten in den Laboren auf unterschiedliche Weise.

11.2.1 *Umweltlabor der Nordwestdeutschen (früher: Niedersächsischen) Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen*

Das Labor verfügt über ein Labor-Informations- und Management-System (LIMS) der Firma Analytik Jena (LabBase), dem ein im Hause entwickeltes Datenprüf- und Übertragungsprogramm RELAQS vorgeschaltet ist, das die Messdaten von den Analysegeräten nach verschiedenen Kriterien überprüft und dann an das LIMS überträgt. Beide Programme arbeiten auf einer Oracle-Datenbank.

Mit RELAQS werden Nachweis- und Bestimmungsgrenzen, negative Ergebnisse, Blindwerte, Kontrollstandards zur Eichungskontrolle, Standardmaterialien und doppelte Probennummern geprüft, um sofort durch Nachmessungen auf mögliche Fehler reagieren zu können. Das LIMS dient nicht nur der gesamten Datenspeicherung, sondern organisiert und dokumentiert auch den Durchlauf der Proben durch das Labor. Dabei muss jeder Arbeitsschritt und die jeweils angewandte Methode von der Probenvorbereitung bis zur Messung von den Labormitarbeitern dokumentiert werden. Alle Methoden sind in den Berichten des Forschungszentrums Waldökosysteme veröffentlicht (KÖNIG u. FORTMANN 1996, 1999, 2012, KÖNIG et al. 2009). Das LIMS erzeugt für jeden Messwert automatisch den sogenannten HFA-Code entsprechend der Vorschriften des Handbuchs Forstliche Analytik, eine 20-teilige Zeichenfolge, aus der die gesamte Analysenfolge ablesbar ist. Im LIMS werden weitere methodenübergreifende Qualitätsprüfungen durchgeführt. Neben den Standardmaterial-Prüfungen und der dazugehörigen Führung von Blindwert- und Mittelwert-Kontrollkarten erfolgen diverse Bilanzprüfungen (N-Bilanz, C-Bilanz, Na/Cl-Verhältnis, Ionen- und Leitfähigkeitsbilanz bei Wasserproben), pH-Plausibilitätsprüfungen und eine Kontrolle der Wiederholungsproben. Im Falle der Nichteinhaltung vorgegebener Kriterien werden automatisch Nachmessungen vom System angestoßen.

Die externe Qualitätssicherung des Labors ist durch die regelmäßige Teilnahme an zahlreichen Ringanalysen sichergestellt, an denen das Labor jedes Jahr teilnimmt. Neben den Boden-, Pflanzen- und Wasser-Ringanalysen im Rahmen des europäischen ICP Forests-Programms beteiligt sich das Labor an den europäischen ISE- und EMEP-Ringanalysenprogrammen für Boden- bzw. Wasser-Ringanalysen.

Da zum Zeitpunkt der BZE I noch mit dem hausintern entwickelten LIMS-Vorläufer LAPIS gearbeitet wurde, in dem die Methodendokumentation noch nicht auf Einzelproben-Basis organisiert war, wurden sämtliche Labordaten der BZE I

nachträglich in das LIMS überführt, die Methodendokumentation dabei vervollständigt und damit auf das gleiche Qualitätsniveau wie bei der BZE II gehoben.

Zur weiteren Auswertung wurden alle Labordaten der BZE I und BZE II in das forstökologische Datenbanksystem ECO (s. Kap. 12) übertragen, wo sie mit allen Metainformationen zur Probennahme, zum Probennahme-Punkt und den übrigen Erhebungen verknüpft wurden. Aus ECO erfolgte auch die Datenlieferung an das Institut für Waldökologie und Waldinventuren des Thünen-Instituts in Eberswalde für die bundesweite Auswertung der BZE-Daten.

11.2.2 Landesanstalt für Forstplanung Brandenburg, Labor Eberswalde

Frank Gutwasser

Die Durchführung der BZE I fiel in die Nachwendezeit, die auch in Eberswalde durch gravierende Einschnitte und Veränderungen in der Wissenschaftslandschaft geprägt war. Eine Infrastruktur zur Datenspeicherung stand i. d. R. nicht zur Verfügung; Aufzeichnungen zur Analysemethodik und den Analysegeräten erfolgten nicht. Kontrollstandards, Kontrollproben und Wiederholungsproben wurden in jeder Labor-Serie mitgeführt; es wurden jedoch keine Blind- oder Mittelwertkontrollkarten geführt. Das Labor nahm auch an Ringversuchen teil, die sich jedoch auf andere Methoden bezogen.

11.2.3 Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL), Standort Kassel (und Vorläufer-Einrichtungen)

Rolf Ellinghaus

Die HLVA Kassel, spätere LUFA Kassel im HDLGN und heutige LHL ist seit 1998 nach DIN 45001 und in der Folge ab 2000 nach der die DIN 45001 ablösenden DIN EN ISO 17025 akkreditiert. Sie organisiert und organisierte ihre Laborabläufe (über Prüfpläne, Standardarbeitsanweisungen, Prüfmethode etc.), ihre Dokumentenlenkung (über Qualitätsmanagement (QM), Intranet, Zuständigkeitspläne, Fortbildungsmanagement, QM-Reviews etc.), ihre Aufzeichnungs- und Messdatendokumentation (über Messgerätesoftware, Laborinformationsmanagementsysteme (LIMS), Rückverfolgbarkeitsaufzeichnungen, Gerätehandbücher etc.) und ihre Validierungen und Kalibrierungen (über Standardreferenzmaterialien, Standards und Blindproben, Ringuntersuchungen, Interne und Externe Audits, Kontrollkarten, Parameterbilanzen etc.) streng nach den Vorgaben der Internationalen Norm und wurde mehrfach erfolgreich reakkreditiert.

Datenhaltung, Plausibilitätskontrollen und Erstellung von Prüfberichten erfolgten bei der BZE I mit einem selbst entwickelten System „Labormanager“, bei der BZE II mit dem kommerziellen „WinLIMS“ der Fa. QSI. Beide LIMS-Systeme waren bzw. sind mit den wesentlichen Messsystemen der anorganischen Element- und Spurenanalytik über automatisierte Schnittstellen gekoppelt.

Alle Messungen erfolgten mindestens als Doppelbestimmungen, im Falle von nach Plausibilitätskontrollen (Wiederholbarkeiten, Wiederfindungen, Linearitäten, Messunsicherheiten, Analysenspielräume, Parameterbilanzen etc.) oder Fehlerfeststellungen (Referenzmaterialien, Standards, Blindwerte, Geräteunregelmäßigkeiten etc.) notwendigen Wiederholungsmessungen als weitere Doppelbestimmungen ggf. mit Ausreißertestung (Kalibrierungs-, Validierungs- und statistische Auswertesoftware SQS, Fa. PerkinElmer).

An Ringanalysen mit Forstböden-Matrix sind für die Untersuchungszeiträume der BZE I und BZE II insbesondere die internationalen ISE-, IPE-, ICP-Forests-, EMEP- und nationalen VDLUFA-Ringanalysen zu nennen, bei der BZE II zusätzlich das die BZE begleitende Ringanalysenprogramm des Gutachterausschusses Forstliche Analytik (GAFA). Eine gegenüber der BZE I bei der BZE II zusätzliche Validierung erfolgte durch Einsatz von durch den GAFA nach dem Ringversuchskriterium „Vergleichbarkeit“ ausgewählten Standards aus den Ringanalyseproben der GAFA-Ringanalysen begleitend zu den Probenaufarbeitungen und -messungen.

Weitere Ergebnisplausibilitätskontrollen erfolgten nach der Berichterstattung bei der BZE I bis 2000 bei der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt (HFV), später Hessische Landesanstalt für Forsteinrichtung, Waldforschung und Waldökologie (HLFWW), Hann. Münden, ab 2000 bei der Folgeeinrichtung Hessen-Forst, Forsteinrichtung, Information, Versuchswesen (FIV), Hann. Münden und für die BZE II bei der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen.

11.2.4 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Levke Godbersen

Die Datenspeicherung erfolgt in der BGR in einem hausweiten LIMS sowie in der bodenkundlichen Labor- und Profildatenbank der BGR. Diese Datenbank ist neben der Flächen- und der Methodendatenbank eine der drei tragenden Säulen des Fachinformationssystems FISBo BGR. Hier werden Ergebnisse der Bodenanalytik zusammen mit den dazugehörigen Profilbeschreibungen gespeichert. Dazu zählen neben bodenchemischen und bodenphysikalischen Informationen auch Daten zu organischen und anorganischen Stoffgehalten von Böden.

Die Qualitätssicherung (QS) der Messungen der mit Königswasser extrahierbaren Stoffgehalte erfolgt laborintern zusätzlich zu den gerätespezifischen QS-Maßnahmen (z. B. Blank-Checks) über das Mitführen von Kontroll- und Blindwertproben, deren Monitoring eine zeitnahe Korrektur von Unregelmäßigkeiten ermöglicht. Zur externen Qualitätssicherung nimmt das Labor in regelmäßigen Abständen an internationalen Ringversuchen teil.

Vor der Auslieferung werden die Ergebnisse des Weiteren einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Dazu werden die Ergebnisse der zwei obersten Mineralbodenproben (0-5 und 5-10 cm) gegenübergestellt. Es wird die Differenz der Ergebnisse

desselben Elements in Proben des gleichen Profils gebildet. Weichen die Ergebnisse > 100 % voneinander ab, werden die Daten einer manuellen Plausibilitätsprüfung (Sichtung) unterzogen. Bei niedrigen Konzentrationen ist eine Differenz von > 100 % nicht immer außergewöhnlich. Daher werden mittels Regressionsanalyse die kleinsten quadratischen Abweichungen der Datenpaare ($y = „0-5 \text{ cm}“$, $x = „5-10 \text{ cm}“$) bestimmt. Überschreiten die Residuen der Regressionsfunktion die Ausreißergrenze, werden die Daten einer weiteren Sichtung unterzogen.

Neben der statistischen Plausibilität wird anhand einer Zuordnung der Daten zu ihren jeweiligen Bodenausgangsgesteinsgruppen (BAG) und Klimaregionen die geochemische Plausibilität geprüft. Werte, die das 90. Perzentil der Hintergrundgehalte überschreiten, werden einer manuellen Sichtung unterzogen. Die Zuordnung zu BAG und Klimaregionen erfolgte mangels Vollständigkeit der Begleitinformation anhand der geographischen Koordinaten und auf Grundlage der Übersichtskarte der Bodenausgangsgesteinsgruppen im Maßstab 1:1.000.000 (BAG 1000). Kleinräumige Fehlzuordnungen und daraus folgende Fehlinterpretationen können aufgrund des kleinmaßstäbigen Kartenwerkes nicht ausgeschlossen werden.

Die Bewertung innerhalb der Sichtkontrolle erfolgte unter Berücksichtigung folgender Kriterien:

Vergleich von Analyseergebnissen aus ICP-MS und ICP-OES. Passen die Ergebnisse nicht zusammen, liegt eventuell eine Verwechslung, ein Verdünnungsfehler oder Eingabe- bzw. Übertragungsfehler vor.

Bewertung im Zusammenhang mit „Schwesterelementen“, also Elementen, die typischerweise eine hohe Korrelation aufweisen (z. B. Al, Mn und Fe). Unähnliche Konzentrationsverläufe werden als unplausibel bewertet, und die Proben werden einer Wiederholungsmessung unterzogen.

Vergleich der Kohlenstoff-Gehalte (C-Gehalt). Die C-Gehalte sollten im Allgemeinen in der 0-5 cm-Probe höher als in der 5-10 cm-Probe sein. Ist dies nicht der Fall, liegt eventuell eine Verwechslung vor.

Konzentrationsverlauf von Elementen, die üblicherweise einen atmosphärischen Eintragspfad haben (z. B. Pb). Die Konzentration sollte mit zunehmender Tiefe abnehmen.

Bei starken Gradienten von Elementen, die üblicherweise keine graduelle Konzentrationsabnahme mit der Tiefe zeigen, wurde zusätzlich der C-Gehalt in Betracht gezogen. Hohe C-Gehalte bedingen meist eine geringe spezifische Dichte des Materials und somit ein höheres Volumen bei gleicher Einwaage. Dies kann Konzentrationsunterschiede bewirken.

Durchschnittlich war bei 16 % aller Werte eine Sichtkontrolle notwendig. Bei der Sichtkontrolle der Ergebnisse wurden ca. 25 % der statistischen und/oder geochemisch fragwürdigen Ergebnisse als de facto nicht plausibel eingestuft. D. h. 4 % aller Ergebnisse wurden einer Wiederholungsmessung unterzogen.

11.3 Bundesweites BZE II-Qualitätssicherungsprogramm

1988 wurde vom Bundeslandwirtschaftsministerium die Arbeitsgruppe Bodenanalyse gegründet, um durch Methodenvergleiche und -weiterentwicklungen und durch die Durchführung von Ringanalysen eine Methodenvereinheitlichung und -auswahl für die BZE I zu erreichen. Zur Qualitätssicherung wurden drei die BZE I begleitende Ringanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse zur Ermittlung der Vergleichbarkeit der Daten aus den beteiligten Laboren herangezogen wurden (KÖNIG u. WOLFF 1993). Eine Zusammenfassung findet sich im Deutschen Waldbodenbericht 1996 (WOLFF u. RIEK 1997). Ein Ergebnis der Vergleichbarkeitsprüfung war, dass die Nährelementgehalte in den Humusproben wegen der unterschiedlichen zugelassenen Aufschlussmethoden nicht vergleichbar sind. Deshalb wurden – soweit wie möglich – die Humusproben aus der BZE I, die nicht mit dem Königswasseraufschluss aufgeschlossen worden waren, erneut aufgeschlossen und gemessen. Somit sind nun diese Daten vergleichbar mit denen der BZE II.

Zur Vorbereitung der BZE II wurde 2002 vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz der Gutachterausschuss Forstliche Analytik (GAFA) eingesetzt, um zum einen die Analysemethoden zu vereinheitlichen, festzulegen und zu dokumentieren und zum anderen ein Qualitätskontrollprogramm für die BZE II zu entwickeln und festzulegen. Sämtliche Analysemethoden der BZE I und II sowie des deutschen und des europäischen Forstlichen Umweltmonitoring-Programms und die Methoden der Bundesländer wurden daraufhin dokumentiert und im Handbuch Forstliche Analytik (HFA) erstmalig 2005 vom GAFA veröffentlicht (GAFA 2005). Das HFA wurde mehrfach ergänzt und liegt in der neusten Version von 2014 vor (GAFA 2014).

Das beschlossene Qualitätssicherungsprogramm umfasste 5 die BZE II begleitende Ringanalysen (3 Boden- und 2 Humusringanalysen mit je 6 Proben) und die Mitführung von regelmäßig in die Probeserien integriertem Standardmaterial für jeden Erhebungsparameter. Dafür wurden große Mengen von 6 Standardmaterialien hergestellt und festgelegt, welches Material für welchen Parameter mitgemessen werden musste. Die Auswertung der Ringanalysen (zusammenfassende Darstellung in BLUM u. HEINBACH 2010) und der Untersuchungen der Standardmaterialien ergab, dass mit wenigen Ausnahmen die Analysedaten der Länder/Labore vergleichbar ausgewertet werden können (KÖNIG et al. 2014).

Ausgewertet und verglichen wurden zum einen die Streuungen innerhalb eines Labors und zum anderen die Mittelwerte aller Standardmessergebnisse pro Labor und Parameter (von 2005 bis 2012), und ob ein signifikanter zeitlicher linearer Trend bei den Messergebnissen festzustellen ist.

Darüber hinaus wurden aus den Daten der die BZE II begleitenden Ringversuche die Mittelwerte der Z-Scores aller Mittelwerte aus allen Ringversuchen für jede Einzelprobe für jedes Labor ermittelt und verglichen. Der Z-Score wird berechnet

aus dem Quotienten der Differenz des jeweiligen Labormittelwertes (MW_{Lab}) zum Mittelwert aller Labore (MW_{ges}) und der Standardabweichung aller Labore:

$$Z\text{-Score} = (MW_{\text{Lab}} - MW_{\text{ges}}) / SD_{\text{ges}}$$

Er ist ein Maß für die Abweichung des Labormittelwertes vom Mittelwert aller Labore in Abhängigkeit von der Streuung unter den Laboren. Ist der Mittelwert der Z-Scores für ein Labor von Null verschieden, deutet das auf eine bedeutsame Abweichung zu Mehr- (Mittelwert positiv) oder Minderbefunden (Mittelwert negativ) im Vergleich zu den anderen Laboren hin.

Ziel dieser Auswertung war es, zu prüfen, ob Labore, bei denen stark abweichende Ergebnisse für bestimmte Parameter der Standardmessungen festgestellt wurden, auch bei den Ringversuchen auffällig abweichende Ergebnisse hatten. Findet nämlich ein Labor für einen Parameter bei dem über einen längeren Zeitraum mitgemessenen Standard deutlich niedrigere Werte als die anderen Labore, so kann dies im günstigen Fall an der speziellen Zusammensetzung des Standards liegen und somit standardprobenspezifisch sein. Allerdings ist es auch möglich, dass die verwendete Messmethode abweichende Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Laboren liefert. Dies würde bedeuten, dass auch die Messergebnisse für die im Rahmen der BZE II gemessenen Proben nicht mit denen der anderen Labore/Länder vergleichbar sind. Dies müsste sich dann auch in den Ringversuchsergebnissen der betroffenen Labore niederschlagen, das heißt, es müsste ein Trend zu Mehr- oder Minderbefunden wie beim Standard erkennbar sein. Die Überprüfung eines solchen Trends erfolgte anhand der Z-Scores wie oben beschrieben.

Bezüglich der laborübergreifenden Auswertung der Standardmessungen kommt die Studie zu dem Schluss, dass mit wenigen Ausnahmen die BZE II-Datensätze der Labore/Länder unter Berücksichtigung vertretbarer Streuungen übergreifend auswertbar sind. Nur in 12 Einzelfällen (Kombination Labor – Parameter) muss damit gerechnet werden, dass für den jeweiligen Parameter die Daten eines Labors/Landes gerichtet von den Daten der übrigen Labore/Länder abweichen. Es handelt sich dabei um Daten jeweils eines Labors/Landes der Parameter N (B = Boden), Al, Ca, Fe, Mn und Zn im Königswasseraufschluss (H = Humus), K im Königswasseraufschluss (Boden), K, Na aus der Austauschkapazitätsbestimmung (Humus) sowie pH(H₂O) und pH(KCl) (Humus). Details dazu finden sich im Bericht von KÖNIG et al. (2014). Bei der Auswertung dieser Parameter sollte deshalb jeweils entschieden werden, ob die Daten der genannten Länder/Labore entweder unberücksichtigt bleiben oder mit einem Faktor korrigiert werden oder zumindest bei der Ergebnisdarstellung auf die Problematik der möglichen gerichteten Abweichung der Daten dieser Länder/Labore hingewiesen werden.

Für die Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt gibt es nur einen Fall, wo die Daten eines Labors/Landes gerichtet von den Daten der übrigen Labore/Länder abweichen. Es handelt sich um den Parameter K im Königswasseraufschluss (B), bei dem die Daten aus Niedersachsen um bis zu 30 % höher liegen als die der übrigen Länder/Labore.

Für einige Parameter, deren Daten bei den Standardmessungen und bei den Ringversuchen sehr stark streuen, sollte auf eine vergleichende Auswertung der BZE-Daten verzichtet werden. Dies betrifft fast ausschließlich Parameter, die für die BZE unbedeutend sind: Na in der Ake (B), Ake (H) und Akt (B) sowie Na im Königswasseraufschluss (B) und (H). Problematisch sind die K-Werte im Königswasseraufschluss (B und H). Hier zeigt sich, dass einzelne Labore große gerichtete Abweichungen haben, die zumindest für ein Labor so groß sind, dass die Daten nicht mit denen der anderen Labore verglichen werden können. Die Ursache ist vermutlich die unterschiedliche Mahlung der Proben.

Bei allen übrigen Parametern und Untersuchungsmethoden kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die BZE II-Daten aller Labore/Länder übergreifend ausgewertet werden können.

Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass die Variation sowohl innerhalb als auch zwischen den Laboren mindestens $\pm 10\%$ beträgt. Nur bei wenigen Parametern ist die Variation etwas geringer (z. B. Elementaranalyse (B) C, Königswasseraufschluss (B) Ca, Gesamtaufschluss (B) Ca), bei vielen jedoch größer. Tabelle 50 gibt eine grobe Übersicht, welche mittleren Variationen sich bei den Standardmessungen und bei den Ringversuchen zusammengefasst für die jeweiligen Untersuchungsmethoden zeigen und welche einzelnen Parameter innerhalb einer Untersuchungsmethode deutlich stärker variieren.

In der Tabelle 51 sind die Ergebnisse der Kontrollstandard-Messungen der beteiligten Labors aus Hessen und Niedersachsen sowie der BGR Hannover aufgelistet. Aus der Standardabweichung in Prozent kann auf die Streuung der Analyse-daten für die verschiedenen Parameter geschlossen werden. Für Standards, die sich im Analysezeitraum und ggf. auch noch danach verändert haben, ist dies in der Tabelle angegeben. Standardveränderungen erklären die meisten der hohen Abweichungen vom Mittelwert. Dies gilt insbesondere für die austauschbaren Kationen Fe und Mn (AKE) und die Elemente im wässrigen Extrakt (EXTH₂O). Wie bei der Bundesauswertung sind es vor allem die K-Gehalte im Königswasseraufschluss, bei denen die Daten zwischen den beteiligten Laboren nicht vergleichbar sind. Ansonsten liegen die Abweichungen zwischen den Laboren selten über 10 % und sind damit gut vergleichbar.

Tabelle 50: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der die BZE begleitenden Ringanalysen und Standardmessungen (KÖNIG et al. 2014) für die einzelnen Untersuchungsmethoden (Parameter-Gruppen)

Untersuchungs- methode/ Parametergruppe	Mittlere Variation der Mittelwerte der Standard- messungen	Mittlere Variation der mittleren Abweichung vom Mittelwert bei den Ringversuchen	Parameter mit größeren Variationen	Bemerkungen
Elementaranalytik (C,N)	+/- 10 %	+/- 5 %	N bei geringen Gehalten	
AKe Boden	+/- 10 %	+/- 10 – 15 %	Na	Na nicht vergleichbar
AK Humus	+ /- 20 %	+/- 10 – 15 %	H+, Na	Na nicht vergleichbar
AKT Boden	+ /- 20 %	+/- 10 – 15 %	Mg, Na	Na nicht vergleichbar
pH Boden und Humus	+/- 20 %	+/- 40 – 50 %		Achtung: nicht pH, sondern Parameter H+
Königswasser- aufschluss Boden Hauptelemente	+/- 10 %	+/- 10 %	K, Na	K, Na nicht vergleichbar
Königswasser- aufschluss Boden Schwermetalle	+/- 10 %	+/- 10 %		
Königswasser- aufschluss Humus Hauptelemente	+/- 10-15 %	+/- 15 %	Na, Al, K	Na nicht vergleichbar
Königswasser- aufschluss Humus Schwermetalle	+/- 20 %	+/- 15 %	Cr	
NO ₃ im wässr. 1:2-Extrakt	+/- 15 %	+/- 20 %		
Korngrößen- bestimmung	+/- 20 %	+/- 20 %	Grobschluff, Mittelsand, Grobsand	
Gesamt- aufschluss Boden Hauptelemente	+/- 10 - 20 %	+/- 5 - 15 %		
Oxalat-Extrakt	+/- 10 %	+/- 15 %		
AK EU-Methode	+/- 15 - 20 %	+/- 15 %	H+, Na	

Tabelle 51: Ergebnisse der in den Laboren in Göttingen, Kassel und Hannover bei der BZE II mitgeführten BZE-Standardmaterialien (gelb = Abweichung 20-50 %, rot = Abweichung mehr als 50 %)

Standard	U-Methode	Parameter	BZE-Mittelwert 2005/6	BZE-Mittelwert 2009	NW/FVA			IH/II			BGR			Abw. BGR - NW/FVA							
					MW 2006-2009	Std (%)	Abw. vom MW vom 2005/6	MW 2007-2009	Std (%)	Abw. vom MW vom 2005/6	MW 2006-2011	Std (%)	Abw. vom MW vom 2005/6								
BZE-SAC	OKAW1.1	Alges	13,145	12,435	13,74	2,7	4,5	10,5	47	12,90	8,1	-1,8	3,8	19	6,1	13,26	8,3	0,9	6,6	237	3,5
BZE-SAC	OKAW1.1	Gages	1,65	1,588	1,67	2,3	1,2	5,2	47	1,69	4,4	2,4	6,4	19	1,2	1,65	5,6	-0,3	3,6	237	1,3
BZE-SAC	OKAW1.1	Cdges	136	116	120	13,7	-11,8	3,4	21	135,29	7,3	-0,5	16,6	19	-12,7	136,12	11,0	0,1	17,3	237	-13,4
BZE-SAC	OKAW1.1	Gages	9,17	9,54	10,03	4,3	9,4	5,1	47	10,73	7,5	17,0	12,5	19	-7,0	9,62	6,3	4,9	0,8	237	-4,1
BZE-SAC	OKAW1.1	Gages	67,37	66,87	69,77	4,1	5,6	4,3	47	75,61	9,0	12,2	13,1	19	-8,4	69,55	7,5	3,2	4,0	237	0,1
BZE-SAC	OKAW1.1	Cages	8	7,77	8,08	6,4	1,0	4,0	47	9,23	10,7	15,4	18,8	19	-14,2	8,38	8,4	4,7	7,8	237	-3,7
BZE-SAC	OKAW1.1	Fages	37,91	36	37,34	2,7	-1,5	3,7	47	38,17	5,1	0,7	6,0	19	-2,2	37,49	10,7	-1,1	4,1	237	-0,4
BZE-SAC	OKAW1.1	Mgges	6,88	6,47	6,79	2,2	1,3	4,9	47	6,98	4,0	1,4	7,8	19	-2,8	6,55	5,7	-4,8	1,3	237	3,5
BZE-SAC	OKAW1.1	Mgges	0,624	0,61	0,61	1,8	-2,2	0,0	47	0,63	3,7	1,4	3,7	19	-3,7	0,61	5,1	-3,0	-0,8	237	0,8
BZE-SAC	OKAW1.1	Phages	32,21	31,67	32,68	4,8	1,5	3,2	47	33,77	5,2	4,9	6,6	19	-3,3	32,37	7,3	0,5	2,2	237	1,0
BZE-SAC	OKAW1.1	Pges	0,124	0,118	0,124	0,13	0	4,8	10,2	4,7	1,1	3,4	2,2	6,3	0,12	1,03	5,2	-4,7	-0,8	237	4,3
BZE-SAC	OKAW1.1	Zages	86	82,86	85,59	4	-0,5	3,3	47	85,85	5,7	-0,2	3,6	19	-0,3	83,29	8,2	-3,2	0,5	237	2,7
BZE-SAC	OKAW1.1	Kges	0,5	0,661	0,99	4,5	10,0	19,8	47	0,48	6,3	-3,9	-27,3	19	31,5						
BZE-SAC	OKAW1.1	Niges	29,06	29,06	30,69	3,8	3,5	5,6	47	32,67	7,2	10,2	12,4	19	-6,5						
BZE-THUE	ATNU1.1	Gges	7,974	7,858	8,06	1,1	1,1	2,6	80	7,87	6,1	-1,3	0,2	13	2,3	8,13	1,8	1,9	3,4	274	-0,8
BZE-THUE	ATNU1.1	Niges	0,596	0,596	0,62	1,5	4,0	4,0	80	0,68	13,2	14,2	14,2	53	-9,8	0,63	4,3	6,3	6,3	274	-2,1
BZE-THUE	AKEL1	Alges	51,2	49,3	52,09	3	1,7	5,7	73	50,60	4,5	-1,2	2,6	86	2,9						
BZE-THUE	AKEL1	Cages	5,56	5,54	5,9	4,4	6,1	6,5	73	5,73	6,8	3,1	3,5	86	2,9						
BZE-THUE	AKEL1	Fages	0,27	0,47	0,54	13,3	10,0	14,9	73	0,55	19,6	10,3	16,7	86	1,6						
BZE-THUE	AKEL1	Kges	1,42	1,46	1,46	4,4	2,8	0,0	73	1,52	11,2	7,1	4,2	86	-4,2						
BZE-THUE	AKEL1	H+2	4,06	4,02	4,1	6,4	1,0	2,0	73	3,99	1,8	-1,7	-0,7	86	2,6						
BZE-THUE	AKEL1	Mgges	1,1	1,81	1,76	10,2	9,0	-2,8	73	1,95	8,7	7,0	7,6	86	-10,6						
BZE-THUE	AKEL1	Niges	0,35	0,38	0,47	21,8	34,3	23,7	73												
BZE-THUE	AKT21	Cages	5,35	x	5,47	4,8	2,2		39												
BZE-THUE	AKT21	Bages	102,3	x	101,9	3,4	-0,4		39												
BZE-THUE	AKT21	Mgges	1,41	x	1,59	11,5	12,8		39												
BZE-THUE	AKT21	Niges	0,37	x	0,29	7,2	-21,6		39												
BZE-THUE	AKT21	Kges	1,28	x	1,32	8,1	3,1		39												
BZE-SAC	EXTH201.1	Alges	1,178	1,619	1,48	10,5	25,6	-8,6	17	1,33	19,0	13,2	-17,7	25	9,9						
BZE-SAC	EXTH201.1	Cages	2,163	2,71	2,85	8,6	31,8	5,2	17	3,19	23,6	47,6	17,8	25	-12,0						
BZE-SAC	EXTH201.1	Gages	52,14	70,59	70,23	7,8	34,7	-0,5	17	51,51	15,4	-1,2	27,0	30	26,7						
BZE-SAC	EXTH201.1	Cl	1,57	1,48	1,49	6,3	-5,1	0,7	17	1,52	9,8	-3,1	2,8	25	-2,1						
BZE-SAC	EXTH201.1	Fages	0,46	0,46	0,35	10,6	23,9	-23,9	17	0,53	36,3	14,5	14,5	25	-31,5						
BZE-SAC	EXTH201.1	H+	4,64	4,65	4,73	8,9	1,9	1,7	17	4,78	2,8	3,1	2,9	15	-1,1						
BZE-SAC	EXTH201.1	Kges	1,41	1,69	1,64	8,7	16,3	-3,0	17	1,48	10,8	4,6	-12,7	25	10,0						
BZE-SAC	EXTH201.1	I/P	64	80	73,53	4,6	14,9	-8,1	17												
BZE-SAC	EXTH201.1	Mgges	1,11	1,43	1,46	9,9	31,5	2,1	17	1,46	15,6	31,5	2,1	25	0,0						

(Fortsetzung Tabelle 51)

Standard	U-Methode	Parameter	BZL-Mittelwert 2005/6	BZL-Mittelwert 2009	NW-FVA				HLH				BGR				Abw BGR - NW-FVA	
					MW 2006-2009	Std Abw (%)	Abw. vom MW 2005/6 (%)	Abw. vom MW 2009	n	MW 2007-2009	Std Abw (%)	Abw. vom MW 2005/6 (%)	Abw. vom MW 2009	n	MW 2006-2011	Std Abw (%)		Abw. vom MW 2005/6
BZE-SAC	EXTH201.1	Mages	0,9	1,33	1,5	15,2	-4,4	-2,3	17	1,10	18,0	22,0	-17,4	25	15,5			
BZE-SAC	EXTH201.1	Nages	4,11	4,62	4,83	7,1	17,5	4,5	17	4,43	7,2	7,9	-4,0	25	8,2			
BZE-SAC	EXTH201.1	Nages	3,44	4,21	4,84	7,2	40,7	15,0	17	3,61	15,1	4,9	-14,3	25	25,4			
BZE-SAC	EXTH201.1	NH ₄	0,32	0,59	0,48	18,3	30,0	-18,6	17	0,41	29,1	29,6	-29,7	25	13,6			
BZE-SAC	EXTH201.1	NO ₃	0,6	0,7	0,78	6,3	30,0	11,4	17	0,76	12,1	26,7	8,6	25	2,5			
BZE-SAC	EXTH201.1	Sees	x	x	4,77	8,3	x	x	17	x	x	x	x	x	x			
BZE-SAC	EXTH201.1	SO ₄ ber	3,94	4,24	4,23	8,5	7,4	-0,2	17	3,76	8,0	4,7	-11,4	25	11,2			
BZE-ND8	pHGat206.1	H ⁺	4,045	4,043	4,03	9,2	-0,4	-0,3	99	4,13	4,1	2,0	2,1	9	-2,4			
BZE-ND8	pHG3C6.1	H ⁺	4,12	4,02	4,1	9,6	-0,5	2,0	83	4,11	2,1	-0,3	2,2	9	-0,2			
BZE-ND8	pHH206.1	H ⁺	4,47	4,49	4,46	12,6	-0,2	-0,7	99	4,58	3,4	2,5	2,1	9	-2,7			
BZE-HUM	AKH3.1	Alges	24,2	x	21,8	14,7	9,9	x	42	20,09	10,9	20,2	x	9	33,4			
BZE-HUM	AKH3.1	Cages	121	x	110,1	9,3	-9,0	x	42	132,80	5,6	9,5	x	9	-20,3			
BZE-HUM	AKH3.1	Feges	5,24	x	4,96	16,3	-5,3	x	42	5,67	14,6	8,1	x	9	-14,2			
BZE-HUM	AKH3.1	H ⁺ 2	2,8	x	2,9	7,2	3,6	x	42	2,84	1,5	1,3	x	15	2,2			
BZE-HUM	AKH3.1	Nages	24	x	22,7	10,2	-8,4	x	42	25,67	6,8	7,0	x	9	-13,1			
BZE-HUM	AKH3.1	NH ₄ ges	11,15	x	10,12	11,4	-9,2	x	42	12,24	3,1	9,8	x	9	-21,0			
BZE-HUM	AKH3.1	Nages	1,1	x	1,19	28,8	8,2	x	42	1,55	12,1	40,7	x	9	-30,0			
BZE-HUM	AKH3.1	Kages	9,3	x	8,88	11,5	-4,5	x	42	10,87	6,3	16,9	x	9	-22,5			
BZE-HUM	OAKW1.1	Alges	2	x	1,88	8,7	-6,0	x	36	1,79	6,0	10,7	x	6	5,0			
BZE-HUM	OAKW1.1	Cages	2,91	x	2,85	2,6	-2,1	x	36	3,14	3,2	7,8	x	6	-10,0			
BZE-HUM	OAKW1.1	Cdges	2,73	x	3,20	29,1	17,2	x	36	280,54	4,2	2,8	x	6	12,3			
BZE-HUM	OAKW1.1	Coges	1,1	x	1,24	13	12,7	x	36	1,27	8,5	15,6	x	6	-2,6			
BZE-HUM	OAKW1.1	Coges	18,8	x	18,78	3,7	-0,1	x	36	22,18	13,9	18,0	x	6	-18,1			
BZE-HUM	OAKW1.1	Feges	2,33	x	2,22	4,4	4,7	x	36	2,20	5,5	5,5	x	6	0,8			
BZE-HUM	OAKW1.1	Kages	0,536	x	0,57	8,3	6,3	x	36	0,57	4,2	7,0	x	6	-0,6			
BZE-HUM	OAKW1.1	Mages	0,479	x	0,45	2,9	-6,1	x	36	0,47	2,6	-0,9	x	6	-5,5			
BZE-HUM	OAKW1.1	Nages	7,28	x	7,72	8,8	6,0	x	36	8,81	7,6	21,0	x	6	-14,1			
BZE-HUM	OAKW1.1	Pages	60,3	x	59,95	3,4	-0,6	x	36	63,70	1,3	5,6	x	6	-6,3			
BZE-HUM	OAKW1.1	Pages	0,678	x	0,68	2,9	0,3	x	36	0,69	1,6	2,1	x	6	-1,8			
BZE-HUM	OAKW1.1	Sges	2,09	x	2,07	2,7	-1,0	x	36	2,04	2,2	-2,5	x	6	1,6			
BZE-HUM	OAKW1.1	Zoges	37	x	37,51	4,9	1,4	x	36	42,58	8,5	13,1	x	6	-13,5			
BZE-HUM	OAKW1.1	Mages	0,395	x	0,39	2,9	-1,3	x	36	0,42	5,8	5,4	x	6	-6,8			
BZE-HUM	OAKW1.1	Cages	5,2	x	6,73	11,5	29,4	x	36	7,62	9,4	46,3	x	6	-13,2			
BZE-HUM	ATN10.1	Nages	17,75	x	17,48	1,6	-1,5	x	31	x	x	x	x	x	x			
BZE-HUM	ATN10.1	Cges	466,3	x	458,11	1,6	-1,8	x	31	x	x	x	x	x	x			
BZE-HUM	pHGat206.1	H ⁺	3,05	x	3,07	5,2	0,7	x	36	x	x	x	x	x	x			
BZE-HUM	pHG3C6.1	H ⁺	2,86	x	2,87	5,4	0,3	x	38	x	x	x	x	x	x			
BZE-HUM	pHH206.1	H ⁺	3,69	x	3,65	8,8	-1,1	x	38	x	x	x	x	x	x			

11.4 Bedeutung methodisch bedingter Streuungen und Fehlerquellen

Im Rahmen der Auswertung der BZE II-Daten zeigten sich diverse Probleme in den Bereichen Probennahme und Analytik, die zum einen Methodenergänzungen und zum anderen die Identifizierung von Fehlerquellen und von methodisch bedingten Streuungen nötig machten. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Prüfungen dargestellt.

11.4.1 Probleme der Probennahme

Für Parameter mit großem Tiefengradienten, wie z. B. dem Kohlenstoff-Gehalt, zeigten sich zwei Probleme bei der Probennahme: zum einen die Trennung von Humusaufgabe und Mineralboden und damit die Verschiebung des Nullpunkts der Mineralbodenprobennahme und zum anderen die Verschleppung von Probenmaterial in die nächsttiefere Tiefenstufe bei Beprobung mit Bohrzylindern.

11.4.1.1 Vergleichbarkeit von Beprobungen der Profilgrube und Satelliten-Bohrungen

Die Vergleichbarkeit der Proben aus einer Probennahme mit Stechzylindern oder Schaufeln am Profil mit denen einer Probennahme mit Bohrzylindern hängt stark von der Homogenität der Fläche ab. Bei hoher Variabilität in der Fläche oder Störungen durch unterschiedliche Schichtungen, Bänder etc. führt die Probennahme nach dem BZE-Schema an acht Bohrpunkten mit Bohrzylindern zu einer mehr oder weniger repräsentativen Mischprobe, während die Beprobung der Profilgrube nur die Situation an einem Punkt widerspiegelt. Die Vergleichbarkeit ist begrenzt. Für manche Parameter kann die Probennahme am Profil zudem noch zu Minder- oder Mehrbefunden der Vorräte führen. Dies ist vermutlich für die C- und N-Vorräte der Fall, da Profile tendenziell stammferner liegen und deshalb geringere C- und N-Einträge durch Streufall und geringere Durchwurzelungsintensitäten haben.

11.4.1.2 Räumliche Variabilität chemischer und physikalischer Kenngrößen

Um Informationen über die Homogenität der Beprobungspunkte und die Variabilität der diversen erfassten Parameter an den Punkten zu erhalten, hätten die Proben der acht Einzelbohrungen nicht zu Mischproben vereint, sondern einzeln untersucht werden müssen. Dies hätte den Analysenaufwand verachtacht und zu hohe Kosten verursacht. Um dennoch einen Eindruck von der Homogenität zu erhalten, wurden die Daten der Intensivmonitoringflächen der drei Bundesländer ausgewertet, da auf diesen Flächen die Probennahmen in sechsfacher Wiederholung mit je vier Bohrungen erfolgen.

Im Folgenden sind die Auswertungen der Variationskoeffizienten für einige Parameter zusammengefasst.

11.4.1.2.1 Variabilität der Trockenrohdichte des Feinbodens und des Feinbodenanteils

Die Trockenrohdichte und der Feinbodenanteil nehmen direkten Einfluss auf die Höhe der errechneten Elementvorräte. Daher ist von großer Bedeutung, wie exakt sie bestimmt werden können und wie stark sie in der Fläche streuen.

Die Auswertung der Daten von fast 30 Intensivmonitoringflächen der drei Bundesländer zeigt, dass der Variationskoeffizient (C_v) des Feinbodenanteils mit Zunahme des Skelettanteils (= Abnahme des Feinbodenanteils) deutlich zunimmt und auf Werte bis zu 25 % ansteigen kann, während er bei Böden mit einem Feinbodenanteil über 90 % eher bei nur 5 % liegt (s. Abb. 176).

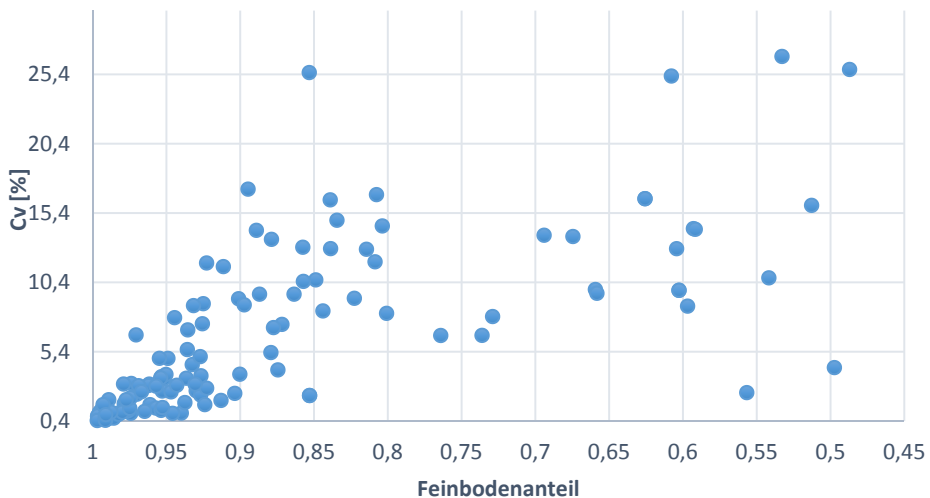


Abbildung 176: Variationskoeffizient C_v [%] des Feinbodenanteils in Abhängigkeit vom Feinbodenanteil

Auch für die Trockenrohdichte des Feinbodens gilt, dass ihr Variationskoeffizient C_v mit steigendem Skelettgehalt zunimmt. Dies zeigt der Vergleich der Abbildungen 177 und 178, bei denen unterschieden wird zwischen Böden mit weniger oder mehr als 10 % Skelettanteil. Während für Böden mit geringen Skelettanteilen ab 10 cm Tiefe der Variationskoeffizient C_v der Trockenrohdichte meist unter 10 % liegt, steigt dieser Wert für Böden mit höheren Skelettgehalten auf Werte bis 20 % an. Auffällig ist, dass in 0-5 cm Tiefe auch bei skelettarmen oder -freien Böden der Variationskoeffizient C_v der Trockenrohdichte bis zu 30 % betragen kann.

Die Trockenrohdichte des Feinbodens und der Skelettanteil bzw. Feinboden-vorrat sind die entscheidenden Größen für die Berechnung des Feinbodenvorrats, der für die Elementvorratsberechnungen benötigt wird. Aus den beschriebenen Auswertungen muss geschlossen werden, dass die Streuung bei der Berechnung des

Feinbodenvorrats zwischen 5 und 20 % liegt und damit im Bereich der Streuung der analytischen Elementgehaltsbestimmungen.

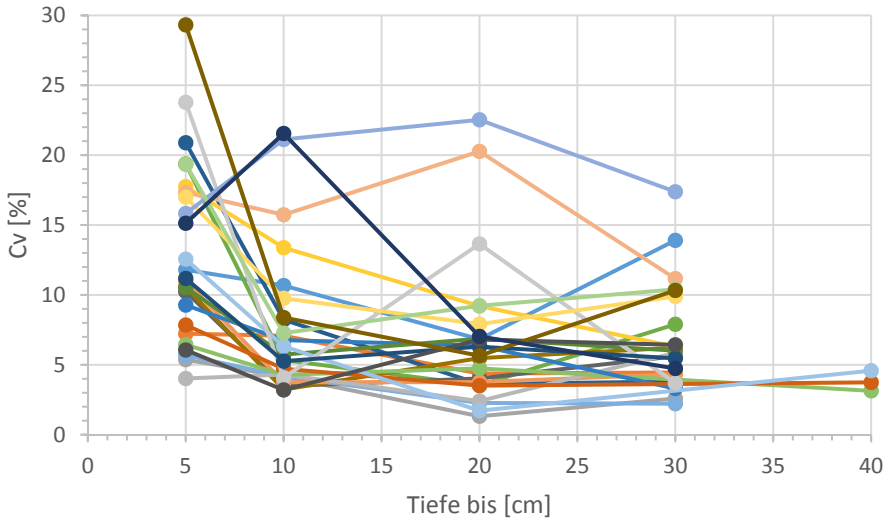


Abbildung 177: Variationskoeffizient C_v [%] der Trockenrobdichte des Feinbodens in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden verschiedener Intensivmonitoringflächen mit Skelettgehalten unter 10 % (jede Farbe symbolisiert eine andere Fläche)

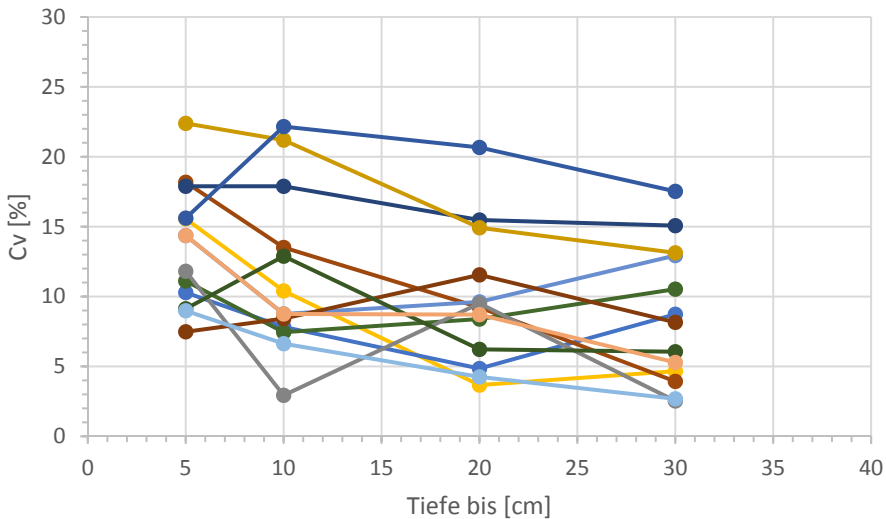


Abbildung 178: Variationskoeffizient C_v [%] der Trockenrobdichte des Feinbodens in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden verschiedener Intensivmonitoringflächen mit Skelettgehalten über 10 % (jede Farbe symbolisiert eine andere Fläche)

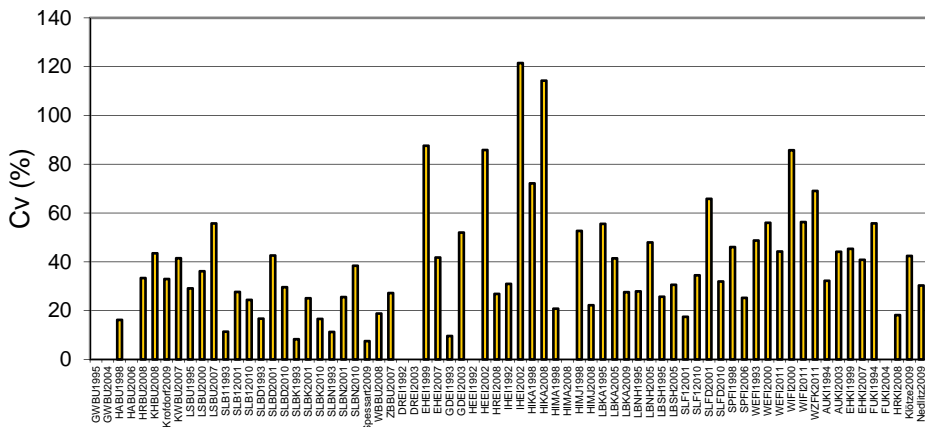
11.4.1.2.2 Variabilität des Humusvorrats und der organischen Kohlenstoffgehalte

Eine wichtige Fragestellung der BZE ist die Ermittlung der Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Wald und damit verbunden die Verlagerung des organischen Kohlenstoffs (Corg) zwischen Humusaufgabe und Boden und innerhalb der Tiefenstufen des Mineralbodens. Daher ist es besonders wichtig, zu klären, wie genau die Humusvorräte und der Kohlenstoffgehalt in den Bodenkompartmenten ermittelt werden können.

In den folgenden Grafiken sind die Variationskoeffizienten (Cv) der Humusvorräte der verschiedenen Humuslagen L, Of und Oh und des Gesamthumusvorrats für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probenahmejahren dargestellt (s. Abb. 179 bis 182).

Dabei zeigt sich, dass die Variationskoeffizienten (Cv) in der Of-Lage (s. Abb. 180) geringer als in der L- (s. Abb. 179) und Oh-Lage (s. Abb. 181) sind. In der Of-Lage liegt der Cv überwiegend bei ca. 20 %, während er in der L- und Oh-Lage oft auch 40 % erreicht. Daneben gibt es in allen Lagen einzelne Ausreißer mit bis zu 120 %. Die größere Streuung in der Oh-Lage im Vergleich zur Of-Lage ist vermutlich auf die Schwierigkeit der Nullpunktfindung, also einer eindeutigen Trennung von Humus und Mineralboden, zurückzuführen.

Betrachtet man den gesamten Humusvorrat (s. Abb. 182), so ist die Streuung am geringsten und liegt bei ca. 20 % im Mittel. Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass in der Regel durch die Mischprobe aus acht Satelliten die Variabilität auf der Fläche berücksichtigt und der Humusvorrat auf +/- 30 % genau erfasst wird.



Intensivmonitoringflächen (mit Beprobungsjahr)

Abbildung 179: Variationskoeffizienten Cv [%] der Humusvorräte der L-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probenahmejahren

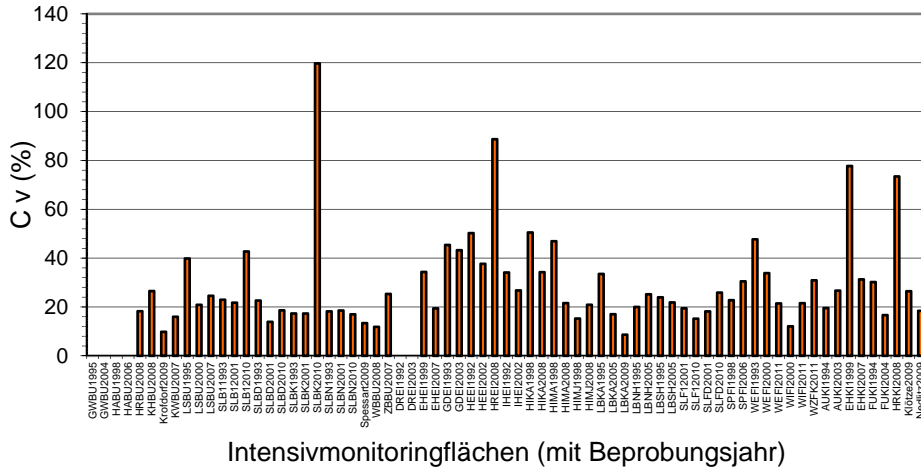


Abbildung 180: Variationskoeffizienten C_v [%] der Humusvorräte der Of-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probenahmejahren

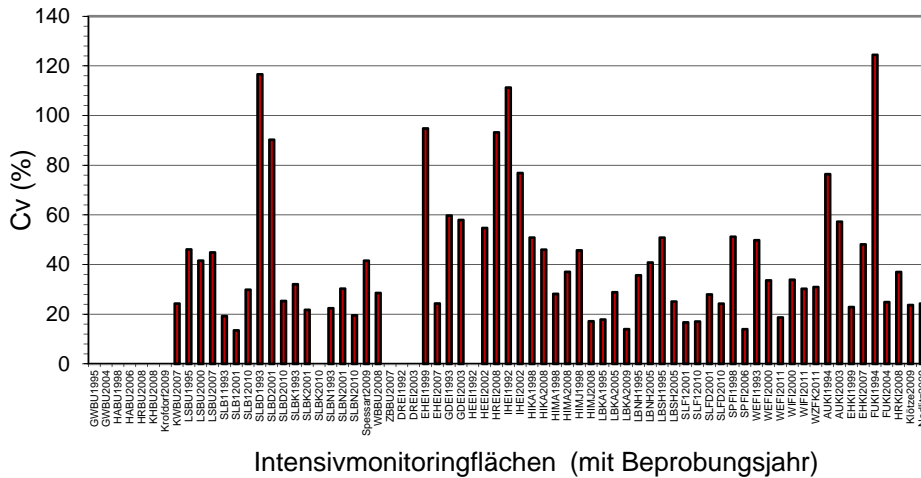
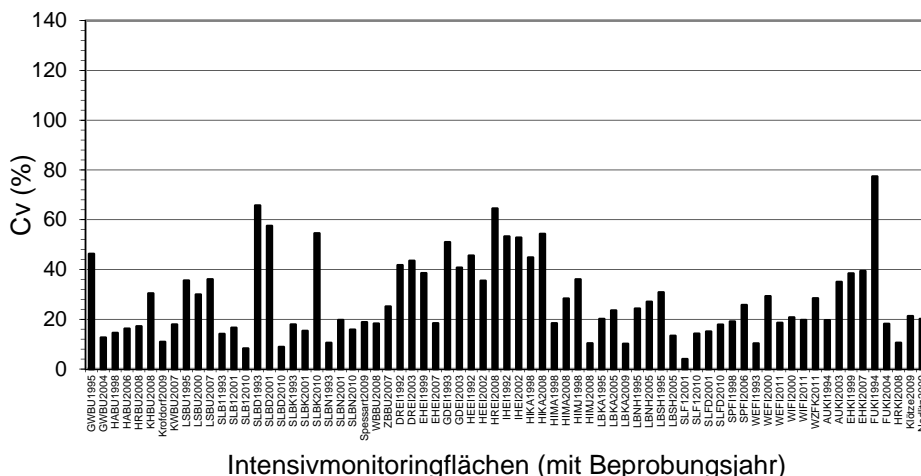


Abbildung 181: Variationskoeffizienten C_v [%] der Humusvorräte der Ob-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probenahmejahren



Intensivmonitoringflächen (mit Beprobungsjahr)

Abbildung 182: Variationskoeffizienten C_v [%] der Gesamthumusvorräte (L-, Of- und Ob-Lage) für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probenahmejahren

Die Auswertung der Daten der Intensivmonitoringflächen für die Corg-Gehalte in verschiedenen Tiefenstufen ergibt, dass die Variationskoeffizienten (C_v) im Oberboden bei 10-25 % für skelettreiche bzw. 10-40 % für skelettarme Böden liegen und im Unterboden ansteigen (s. Abb. 183 u. 184). Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Corg-Gehalte sehr tiefenstufenabhängig sind und daher tiefenstufenabhängige Probenahmefehler bzw. eine unsaubere Trennung zwischen Auflage und Mineralboden sich besonders stark auswirken. In großer Tiefe sind die Corg-Gehalte allerdings sehr gering (s. Abb. 185), sodass hier teilweise schon die methodisch bedingten Bestimmungsgrenzen erreicht werden, was zu großen Streuungen führen kann. Für Gesamtvorratsberechnungen spielen daher die Corg-Gehalte in großer Tiefe keine große Rolle. Die Ermittlung von Vorratsveränderungen in großer Tiefe ist dagegen mit einem sehr großen Fehler behaftet.

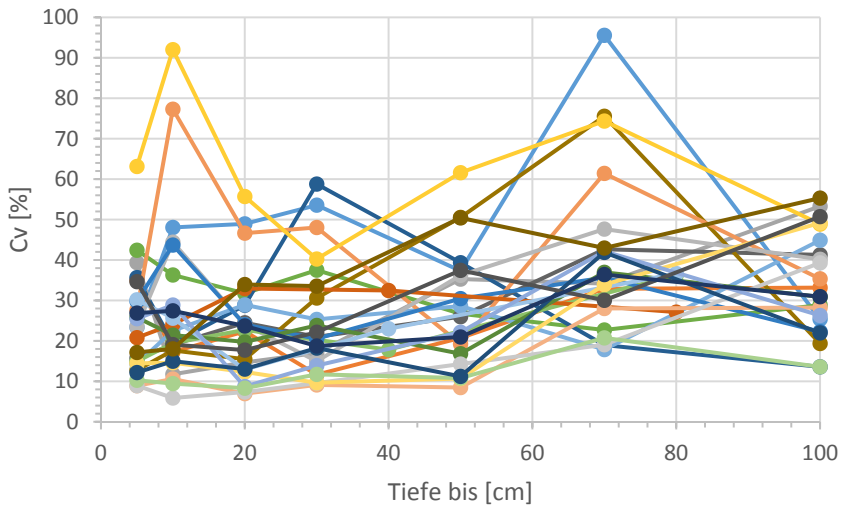


Abbildung 183: Variationskoeffizient C_v [%] des Corg-Gehalts in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden mit Skelettgehalten unter 10 %

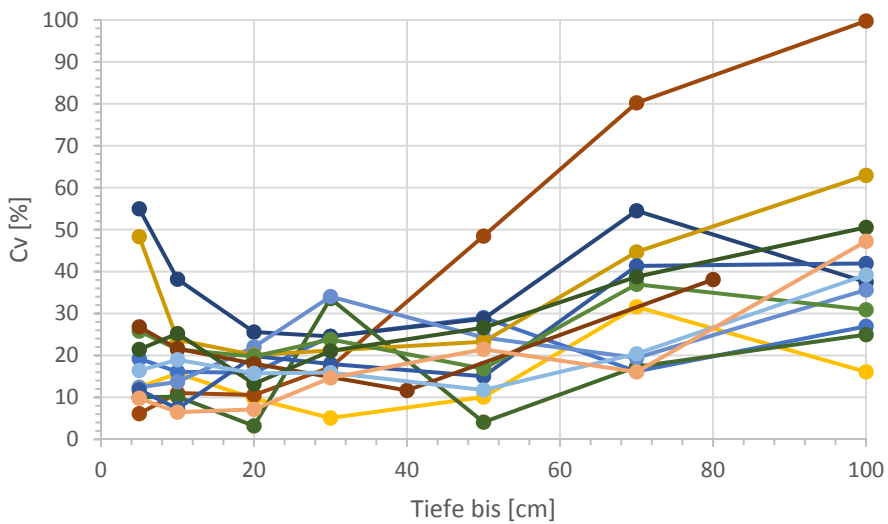


Abbildung 184: Variationskoeffizient C_v [%] des Corg-Gehalts in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden mit Skelettgehalten über 10 %

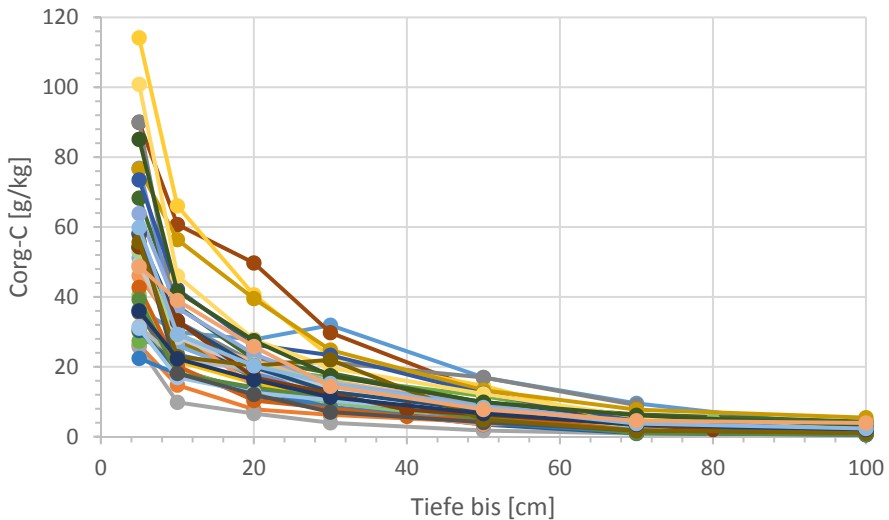


Abbildung 185: Mittlere Corg-Gehalte [g/kg] in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für 30 Intensivmonitoringflächen

11.4.1.2.3 Variabilität chemischer Kennwerte am Beispiel der Gehalte im Königswasseraufschluss

Um Veränderungen von Vorräten zwischen der BZE I und BZE II bewerten zu können, ist es wichtig zu wissen, wie hoch die Variabilität bestimmter Parameter auf der Fläche und in den verschiedenen Tiefenstufen ist. Bei geringer Variabilität sollten bestimmte Parameter, wie z. B. die Königswasser-löslichen Eisen- (Fe), Phosphor- (P) oder Blei- (Pb) Gehalte, die sich über einen Zeitraum von 15 Jahren im Mineralboden nicht wesentlich verändern, bei der BZE I und BZE II sehr ähnliche Ergebnisse haben (s. Vorstudie BZE II, EVERS et al. 2001). Ist jedoch die Variabilität sehr hoch und finden sich für diese Parameter bei der BZE I und BZE II sehr verschiedene Gehalte, so kann dies nur mit hoher Variabilität am Standort erklärt werden. In diesen Fällen ist der Einfluss der standörtlichen Variabilität vermutlich deutlich höher als der zeitlichen Veränderung.

An den Ergebnissen der Untersuchungen der Intensivmonitoringflächen ist dieser Sachverhalt gut zu erkennen. Im Folgenden sind beispielhaft die Daten zweier Monitoringflächen wiedergegeben.

Wie das Profildfoto der Kiefernfläche in Augustendorf (AuKi) zeigt (s. Abb. 186), befindet sich hier in 23-48 cm ein Bh-Horizont unterschiedlich starker Ausprägung. In den davon berührten Probenahme-Tiefenstufen sollte die Variabilität diverser Parameter deutlich höher sein als darüber und vor allem darunter liegender Tiefenstufen. Dies zeigen die Königswasser-extrahierbaren Elementgehalte deutlich (s. Tab. 52).

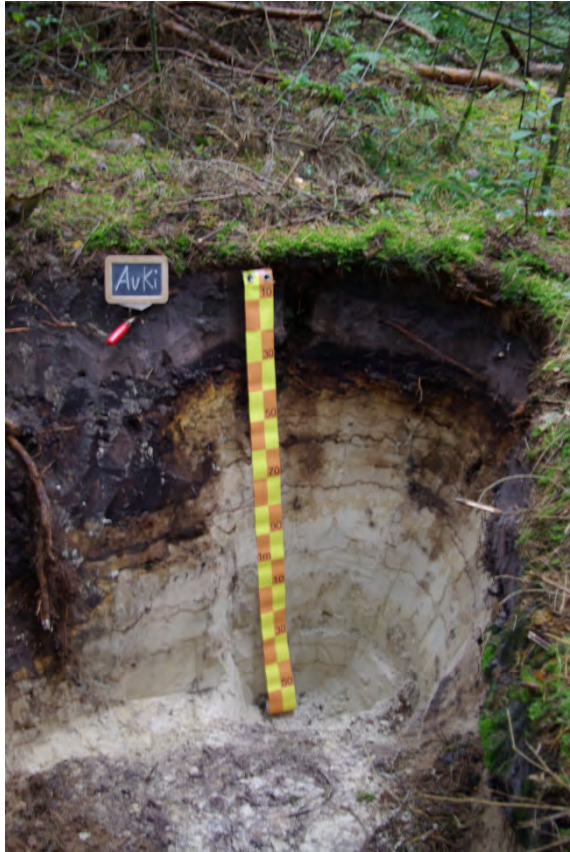


Abbildung 186: Bodenprofil auf der Intensivmonitoringfläche Augustendorf Kiefer

Tabelle 52: Variationskoeffizienten C_v [%] der Elementgehalte im Königswasser-aufschluss (OAKW) in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] (Augustendorf, Kiefer, 2003; gelb = < 20 %, orange = 20 bis 50 %, rot = > 50 %)

AUKI 2003	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]
von (cm)	0	5	10	20	30	40	50	70	80
bis (cm)	5	10	20	30	40	50	70	80	100
OAKW Al (g/kg)	18	30	27	71	59	18	14	9	10
OAKW Ca (g/kg)	66	65	26	83	51	23	20	10	14
OAKW Cd (mg/kg)	40	75	65	39	52	222	100	45	98
OAKW Co (mg/kg)	21	25	21	21	59	28	20	16	22
OAKW Cr (mg/kg)	83	12	21	47	48	19	11	5	11
OAKW Cu (mg/kg)	19	25	43	26	29	22	7	10	9
OAKW Fe (g/kg)	12	15	27	78	76	32	36	8	10
OAKW K (g/kg)	9	9	9	18	35	20	15	9	10
OAKW Mg (g/kg)	23	14	25	76	84	31	18	11	11
OAKW Mn (g/kg)	41	19	9	18	21	27	21	21	21
OAKW Na (g/kg)	71	82	90	78	71	80	69	70	67
OAKW Ni (mg/kg)	98	18	37	34	49	19	15	10	11
OAKW Pges (g/kg)	26	29	28	86	49	42	36	37	29
OAKW Pb (mg/kg)	20	15	49	56	18	31	17	9	5
OAKW Sges (g/kg)	24	34	44	57	42	58	38	37	30
OAKW Zn (mg/kg)	26	22	41	38	41	13	12	5	7

Während in 70-100 cm Tiefe die Variabilität der meisten Elemente unter 20 %, zum Teil sogar unter 10 % liegt, steigt die Variabilität zwischen 20 und 40 cm Tiefe für viele Elemente auf 51 bis 86 % an.

Im Gegensatz dazu ist die Buchenfläche im Göttinger Wald (s. Abb. 187) sehr viel homogener. Bis 30 cm Tiefe variiert nur Ca mehr als 20 %, darunter die Elemente Cd, Mn und Pb. Variationskoeffizienten über 50 % wie bei der Fläche Augustendorf Kiefer treten überhaupt nicht auf (s. Tab. 53).



Abbildung 187: Bodenprofil auf der Intensivmonitoringfläche Göttinger Wald Buche

Tabelle 53: Variationskoeffizienten C_v [%] der Elementgehalte im Königswasseraufschluss (KöWa) in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] (Göttinger Wald, Buche, 2004; gelb = < 20 %, orange = 20-50 %)

Gehalte KöWa	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]	Cv [%]
von (cm)	0	5	10	20	30	40	50	70	80
bis (cm)	5	10	20	30	40	50	70	80	100
Al (g/kg)	5	3	3	16	22	17	12	11	20
Ca (g/kg)	8	34	45	45	24	12	9	7	13
Cd (mg/kg)	6	16	17	10	30	25	29	27	27
Co (mg/kg)	4	4	8	12	17	14	19	20	18
Cr (mg/kg)	7	6	14	12	12	14	12	10	14
Cu (mg/kg)	6	7	6	7	13	17	16	18	19
Fe (g/kg)	5	4	6	15	19	16	16	14	20
K (g/kg)	12	10	11	10	12	12	8	7	17
Mg (g/kg)	7	6	7	8	8	6	5	4	10
Mn (g/kg)	13	17	17	8	31	24	29	26	17
Ni (mg/kg)	4	4	10	11	14	16	16	11	16
P _{gcs} (g/kg)	10	12	14	12	13	15	14	8	7
Pb (mg/kg)	15	15	9	14	27	22	29	32	25
S _{gcs} (g/kg)	7	10	12	15	13	12	13	12	19
Zn (mg/kg)	10	12	13	13	24	20	18	15	16

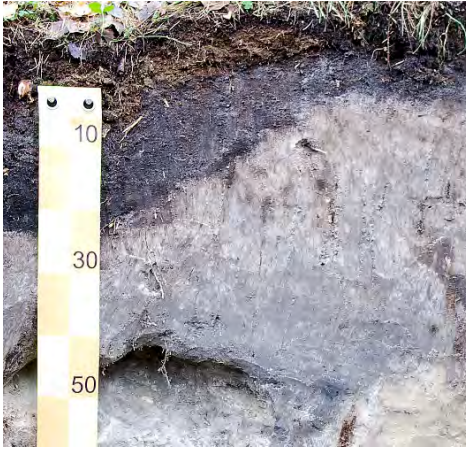
Diese Beispiele zeigen, dass mithilfe bestimmter Königswasser-extrahierbarer Elementgehalte Einschätzungen zur Homogenität der Fläche möglich sind und somit auch bei der BZE, durch Vergleich der Königswasser-extrahierbaren Elementgehalte bei der BZE I gegenüber der BZE II, abgeschätzt werden kann, ob am jeweiligen BZE-Punkt der Einfluss der Flächenvariabilität größer ist als der Einfluss der zeitlichen Veränderung.

11.4.1.3 Nullpunktdefinition

Der Übergang vom Auflagehumus zum Mineralboden ist nur selten scharf abgegrenzt und ist bei den meisten Waldstandorten fließend. Auf Standorten mit geringen Auflagen (Mull) und solchen mit Rohhumus sind die Übergänge relativ eindeutig. Bei den Moder-Standorten ist es jedoch häufig schwierig, eine eindeutige Grenze zu finden. Bei zu tiefer Grenzziehung und Probennahme gelangt zu viel Mineralboden in die Probe des Auflagehumus, es kommt zu einer „Verdünnung“ der Humusaufgabe mit Mineralboden und stets zu geringeren C-Gehalten in den jeweiligen Mineralbodenschichten. Umgekehrt gelangt bei zu hoch angesetzter Grenzziehung und Probennahme Humusmaterial in die oberste Mineralbodenprobe, sodass der C-Gehalt zu hoch ausfällt und der Humusvorrat unterschätzt wird.

Dies kann sich besonders beim Vergleich der Daten der BZE I mit der BZE II auswirken, wenn dieser tiefenstufenweise erfolgt.

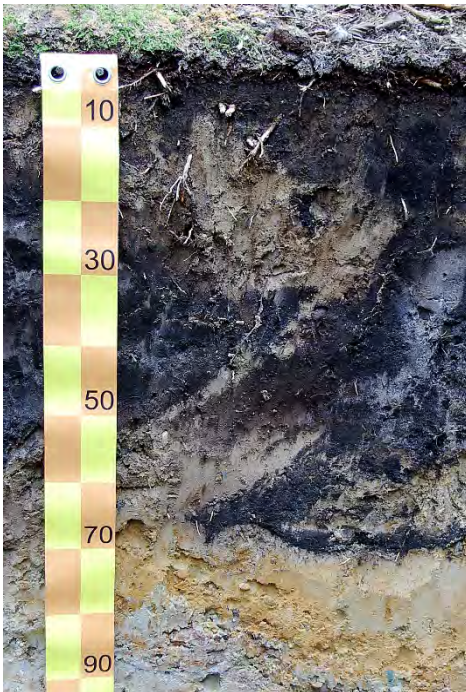
Aus diesem Grund wurden diejenigen 25 Aufnahmepunkte der BZE II in Niedersachsen näher betrachtet, bei denen der C-Gehalt in 0-5 cm bei der BZE I oder BZE II über 100 g/kg liegt und stark vom C-Gehalt der jeweils anderen BZE-Erhebung abweicht. Eine Auswertung der Profildaten ergab, dass nur in 3-4 Fällen tatsächlich eine Nullpunkt-Verschiebung die Ursache der hohen C-Gehaltsunterschiede war. In den anderen Fällen waren andere Störungen (Bodenschichtung, Pflügen, Durchwurzelung etc.) die Ursache (s. Abb. 188).



Punkt 585: Horizontierung gestört



Punkt 540: Tiefpflug



Punkt 916: Tiefpflug



Punkt 642: Durchwurzelung und Störung

Abbildung 188: Mögliche Störungen an Bodenprofilen der BZE

11.4.1.4 *Verschleppung*

Das Verschleppungsproblem tritt nicht bei Probennahmen an der Profilgrube auf. Bei Probenahme mit Bohrzylindern kann jedoch C-reicheres Material an der Zylinderinnenwand durch Verschmieren in C-ärmere untere Schichten verlagert werden. Zwar kann dieses verschleppte Material vom Bohrkern abgeschabt werden, jedoch nur auf der einen Hälfte des Bohrkerns. Dies würde dann zu Mehrbefunden führen.

Durch die Probenahme in zwei Stufen (0-30 cm per Stechzylinder und mit Bohrzylinder in 30-90 cm) ist jedoch keine Verschleppung des C-reichen Materials aus 0-5 cm in C-arme Tiefenstufen unter 30 cm möglich. Damit ist der Fehler durch Verschleppung eher gering.

11.4.1.5 *Veränderung der Trockenrohdichte in oberen Bodenschichten („Soufflé-Effekt“)*

Kommt es durch Veränderung der Humusform oder durch Entsauerung zu einer erhöhten Aktivität von Bodenwühlern, so kann der Boden durch verstärkte Durchmischung mit Humusmaterial aufgelockert werden. Da der aufgelockerte Boden mehr Volumen (und eine geringere Trockenrohdichte) hat, kann er nur nach oben „wachsen“ (Soufflé-Effekt). Bei der Probenahme nach Tiefenstufen wird von der Grenzlinie zwischen Humusaufgabe und Mineralboden an nach unten gemessen. Dies führt in den obersten Tiefenstufen des Mineralbodens dazu, dass die Proben z. B. aus 0-5 cm Tiefe nicht die gleiche Feinbodenmenge haben und damit zwischen BZE I und BZE II nicht mehr direkt vergleichbar sind. Der Fehler durch diesen Effekt ist schwer abschätzbar. Modellberechnungen von KÖLLING et al. (2010a) zeigen, dass der Fehler bei den aus den Elementkonzentrationen und der Trockenrohdichte errechneten Elementvorräten durchaus 20 % in der Tiefenstufe 0-5 cm ausmachen kann. Wenn bei Vorratsberechnungen hingegen das gesamte Profil bis z. B. 90 cm Tiefe addiert wird, wird der Fehler vernachlässigbar. Prinzipiell sind tiefenstufenbezogene Vorräte nur direkt vergleichbar, wenn die Trockenrohdichte und der Skelettanteil sich nicht verändert haben.

11.4.2 *Probleme der Probenanalyse*

11.4.2.1 *Abschätzung der Streuung chemischer Parameter durch kontinuierliches Mitmessen von Kontrollstandards*

Im Labor der NW-FVA werden neben den speziell für die BZE II mitgeführten Kontrollstandards seit vielen Jahren weitere Kontrollstandards mitgeführt und die Ergebnisse in Kontrollkarten erfasst. In der Tabelle 54 sind die Ergebnisse ausgewählter Kontrollstandards im Vergleich zu den Ergebnissen der BZE II-Standards dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, welche Parameter welchen analytisch bedingten Streuungen unterliegen.

Tabelle 54: Standardabweichungen für verschiedene Parameter ausgewählter Kontrollstandards

Probenart	Standard	Untersuchungsmethode	Parameter	Mittelwert	Std-Abw. %
Boden	Harste30-50	effektive Austauschkapazität	Alges	256,77	2,4
			Cages	221,90	2,8
			H+	4,20	0,5
			Kges	47,33	5,0
			Mgges	26,61	4,1
			Mnges	106,03	3,1
Boden	ISE974	Königswasseraufschluss	Alges	16,29	3,6
			Cages	0,19	8,9
			Cdges	0,04	14,9
			Coges	3,97	7,2
			Crges	20,92	2,4
			Cuges	4,61	4,5
			Feges	16,37	2,6
			Kges	2,92	3,9
			Mgges	1,53	2,6
			Mnges	0,42	2,6
			Nages	0,05	29,5
			Ni ges	7,42	4,4
			Pbges	50,79	4,9
			Pges	0,36	4,5
			Sges	0,17	5,2
Znges	23,73	4,1			
Humus	NFVH	Elementaranalyse	Cges	425,66	1,3
			Nges	21,05	1,4
Boden	Boden4	Elementaranalyse	Cges	24,15	0,8
			Nges	0,48	2,1
Pflanze	NHARZ	Druckaufschluss Salpetersäure	Alges	0,09	3,2
			Cages	5,62	1,6
			Cdges	0,15	26,9
			Coges	0,28	14,3
			Crges	0,38	19,5
			Cuges	2,71	4,7
			Feges	0,06	1,6
			Kges	3,36	1,5
			Mgges	0,81	1,5
			Mnges	1,37	1,6
			Nages	0,04	12,2
			Niges	1,36	10,7
			Pbges	< 1,829	-
			Pges	1,25	2
			Sges	0,93	1,7
Znges	33,1	1,9			

11.4.2.2 *Eingeschränkte Repräsentativität von Teilproben*

11.4.2.2.1 *Probenvorbereitung*

Bei der Analyse von Mineralbodenproben mit hohem C-Gehalt und Humusproben mit hohem Mineralboden- bzw. Sand-Anteil zeigten sich bei Wiederholungsanalysen von Proben der BZE I aus Sachsen-Anhalt erhebliche Abweichungen bei den C-Gehalten um bis zu 100 % (s. GAFA 2014, Methode A1.4.1, Anhang 1).

Als mögliche Fehlerursache stellte sich die Entnahme einer Teilprobe der gesiebten Probe aus dem Probenaufbewahrungsgefäß heraus, da sich die sehr viel leichteren organischen Partikel von den schwereren Mineralpartikeln mechanisch trennen und Schichten im Gefäß bilden können, die durch Umrühren nicht vollständig homogenisiert werden. Um das Ausmaß des dadurch möglicherweise verursachten Fehlers zu bestimmen, wurde ein Methodenvergleich an sechs Humus- und zwei Bodenproben durchgeführt. Verglichen wurde dabei die im Labor der NW-FVA übliche Methode des Umrührens der gesiebten Probe im Probengefäß und anschließender Entnahme einer Teilprobe mit einem Probenlöffel für das Mahlen der Probe mit der Methode der Homogenisierung der Probe über einen automatischen Probenteiler und anschließender Mahlung einer Teilprobe sowie der anschließenden Analyse der Teilproben. Dabei stellte sich heraus, dass die einfache Handrührmethode nur unwesentlich größere Streuungen verursacht als die aufwendige Probenteilermethode. Der mittlere Variationskoeffizient von 3,5 % (Spanne zwischen 0,4 und 5,9 %) beim Handrühren der Probe ist nur unwesentlich schlechter als der mittlere Variationskoeffizient von 2,6 % (Spanne zwischen 0,2 und 10,8 %) beim Verwenden eines Probenteilers.

Damit kann davon ausgegangen werden, dass im Regelfall die gewählte Handrührmethode nicht zu verfälschten Analysenwerten führt. Lediglich bei Humusproben mit geringer Probenmenge führt das Rühren von Hand nicht ausreichend zur Probenhomogenisierung, was die gefundenen hohen Abweichungen bei den Nachanalysen von Proben der BZE I aus Sachsen-Anhalt erklärt.

11.4.2.2.2 *Aufschlüsse und Extrakte*

Gesiebte Humusproben sind teilweise sehr inhomogen, da sie noch Bruchstücke von Blättern und Nadeln enthalten können. Bei Extraktions- oder Perkolationmethoden wie der Bestimmung der Austauschkapazität werden zum Teil nur kleine Probenmengen eingewogen (bei der AK Humus-Bestimmung nur 1 g). Da zudem die Benetzung von getrocknetem organischen Material sehr schlecht ist, besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass die Ergebnisse der Austauschkapazitätsbestimmung von Humusproben (AK Humus) stark streuen. Um diese Streuung zu erfassen, wurden grundsätzlich Doppelbestimmungen bei der AK Humus durchgeführt und die Abweichungen ermittelt. Diese lag bei manchen Proben für einige Elemente bei bis zu 50 %. Aus diesem Grund wurde entschieden, bei Abweichungen von mehr als 25 % bei drei oder mehr Elementen eine dritte Perkolation der Humusprobe

durchzuführen und dann entweder den Mittelwert aus den drei Perkolationen oder den Mittelwert aus den zwei nahe beieinander liegenden Perkolationen zu verwenden und den dritten Wert als Ausreißer zu eliminieren. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass in der Regel der Variationskoeffizient auch bei den inhomogeneren Proben unter 20 % lag.

Einen Eindruck von den Variationskoeffizienten der verschiedenen Methoden gibt die Tabelle 54.

12 Aspekte des BZE-Datenmanagements

Andreas Schulze, Jan Evers

12.1 Anforderungen

Die im Rahmen der BZE II durchgeführten Erhebungen und deren übergeordnete Zielsetzungen stellten erhebliche Anforderungen an das Datenmanagement:

- in fast allen Kompartimenten wurde der Erhebungsumfang gegenüber der BZE I deutlich ausgeweitet oder zusätzliche Erhebungen eingeführt (ertragskundliche Aufnahme von Einzelbäumen, Verjüngung, Bodenvegetation, getrennte Beprobungen zur Bodenphysik und Organika)
- intern wurden teilweise noch über den BZE II-Katalog hinausgehende Erhebungen beschlossen, z. B. Zuwachsbohrungen und Triebblängen-Messungen
- in der BZE I und BZE II gleichlautende Parameter sind nicht immer tatsächlich auch inhaltlich gleichbedeutend (z. B. Umstellung der Referenzbasis von der Kartieranleitung (KA) 3 (AG BODENKUNDE 1982) auf die KA 5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005))
- über die pure Dokumentation des aktuellen Zustands der Waldböden und Bestände hinaus mussten mit der BZE II auch erstmals deren zeitliche Veränderungen ableitbar werden

Damit war eine Weiternutzung der für die BZE I entwickelten IT-Lösungen von vornherein ausgeschlossen. Die erforderlich werdende Neukonzeption richtete sich an folgenden Anforderungen aus:

12.1.1 Integration der Merkmalsgruppen

Um zunächst mit dem alleinigen Fokus auf die BZE II kompartimentsübergreifende Fragestellungen (z. B. Ernährungszustand der Bäume vs. Bodenchemismus) möglichst einfach und sicher zu ermöglichen, war für alle beteiligten Kompartimente (z. B. Bestandsaufnahme, Bodenprofilbeschreibungen, Bodenvegetationsaufnahme, Labordaten) eine integrative Datenverwaltung vorzusehen, also eine Separierung in physikalisch isolierte Datenbestände, z. B. getrennt nach Feld- und Labordaten oder Bestandes- und Bodendaten, zu vermeiden (Datenintegration der 1. Ebene, s. Abb. 189).

The screenshot displays the BZE software interface with the following components:

- Top Panel:** Shows plot settings for '4 Plots mindestens eine BZE (562.584.6080.2202) aus Niedersachsen+NI,Hessen+HE,Sachsen+Anhalt+ST angefordert'. It includes tabs for 'Plot', 'Bestand', 'Boden', 'Vegetation', 'Reports', and 'Datenlage'.
- Table 1 (Top):** A data table with columns: BZE_I, Labornummer, BoAkt, GBA, rFK, ELA_C, Kjeldahl_N, OAKW_A, OAKW_Ba, OAKW_Ca, OAKW_Cd, OAKW_Co, OAKW_Cr, OAKW_Cu, OAKW_Fe, OAKW_Mn. It lists various soil profiles and their corresponding nutrient values.
- Table 2 (Middle):** A second data table with columns: BZE_II, Labornummer, BoAkt, GBA, rFK, ELA_C, ELA_C03-C, ELA_N, OAKW_A, OAKW_Ba, OAKW_Ca, OAKW_Cd, OAKW_Co, OAKW_Cr, OAKW_Cu. It provides detailed data for specific soil samples.
- Graph (Left):** A 'Tiefen-Verlauf Mineralaboden' graph showing depth (cm) on the y-axis (from -10 to -110) and nutrient concentration (g/kg) on the x-axis (from 5 to 45). It features two data series: ST06080 ELA_C I (red squares) and ST06080 ELA_C II (green squares).
- Dialog Box (Right):** A 'Rasterfahndung - Methoden-Info zu 2006800171, ELA_C' window. It contains fields for 'Methodenname (ECO)', 'verwendet seit', 'verwendet bis', 'LMS-Methode', 'Legung', 'Trochierung', 'Vorzeckleinung', 'Siebung', 'Mahlung', 'Filtration', 'Bestimmungsgrenze', 'Methoden-Code', and 'Bemerkung'. It also lists 'Untersuchungsmethode', 'Prüfmethode', and 'Gerätemethode'.
- Bottom Panel:** Contains 'Analyseausgaben' options (Labor-Originaleinheit, Massen/Gehalt, etc.), a 'Parameter für Grafik' dropdown, and a list of technical notes and references.

Abbildung 189: Integrierende BZE-Programmieroberfläche

12.1.2 Integration der Datenbestände der Bundesländer

Zum zweiten musste es vor der Zielsetzung späterer bundeslandübergreifender Auswertungen gelingen, die Feld-Kampagnen der einzelnen Bundesländer IT-technisch zu harmonisieren und zu integrieren, obwohl es bei der Durchführung nennenswerte Verfahrensunterschiede gab (die Konzeption der BZE II-Durchführung in den heutigen Partnerländern der NW-FVA fiel noch in die Phase vor Gründung der NW-FVA als Mehrländeranstalt) und die BZE II-Anleitung während der ersten Außenaufnahmen teilweise noch in der Überarbeitung war. Die bundeslandübergreifende Datenhaltung stellt eine 2. Ebene der Datenintegration dar (s. Abb. 189). Hieraus erwachsen nicht nur technische, sondern auch fachlich-inhaltliche Anforderungen, wie z. B. die Harmonisierung mehrerer tradierteter Standortkartierungsverfahren im Hinblick auf eine länderübergreifende Auswertbarkeit (vgl. SCHMIDT et al. 2015). Dies sei am Beispiel der Kategorisierungen der Nährstoffversorgung im Rahmen der Standortkartierung der beteiligten Bundesländer in Tabelle 55 verdeutlicht.

Tabelle 55: Zuordnung landesspezifischer Kodierungen der Nährstoffversorgung zu übergreifenden Kategorien

länderübergreifende Kategorie	übergreifender Code	Codes NI, HB, SH	Codes Hessen	Codes Sachsen-Anhalt
carbonat-eutroph	11	6	1+	RC
eutroph	12	5+ 5	1 1-	R
gut-mesotroph	21	5- 4+	2+	K
mesotroph	22	4 4- 3+ 3	2	M M+
schwach-mesotroph	23	3- 2+ 2	2-	Z
oligotroph	31	2- 1	3	A

NI = Niedersachsen; HB = Bremen; SH = Schleswig-Holstein

12.1.3 Integration von BZE I und II

Ein weiteres wesentliches Auswertungsziel lag in der Analyse der zeitlichen Veränderung des Boden- und Bestandeszustands seit der BZE I. Daraus folgte die Notwendigkeit der direkten Gegenüberstellbarkeit der aktuellen und der damaligen Ergebnisse für die einzelnen Erhebungspunkte, also die zusätzliche Übernahme der BZE I-Daten in die neue Umgebung (3. Integrationsebene, s. Abb. 189). Dabei war neben allen inhaltlichen Veränderungen insbesondere für Niedersachsen der Umstand zu beachten, dass es zwischen BZE I und BZE II zu nennenswerten Raster-Bereinigungen kam, also nicht alle Plots grundsätzlich zu beiden Inventuren gehören.

12.1.4 Integration von Methodeninformation

Die Laboranalytik steht bezüglich mehrerer Auswertungsziele im Mittelpunkt des Interesses, stellt sich aber gleichzeitig (wie weiter unten näher ausgeführt) äußerst komplex dar: Allein bedingt durch die Mehrländerzuständigkeit waren spezifische Datenformate unterschiedlicher Labore zu verarbeiten, wobei Methodenunterschiede recherchierbar bleiben mussten (4. Integrationsebene, s. Abb. 189).

Aber auch bei der Dokumentation der Bezüge (Herkünfte) von Laborproben liegt die Tücke oft im Detail: Ob sich z. B. die Blatt-Nadel-Beprobung einer Baumart auf einem Plot bei der BZE I und II bei der Mischprobenbildung auf dieselben Baumindividuen bezieht, sollte im Einzelfall genauso erkennbar bleiben, wie die Frage nach der exakten Herkunft der Bodenproben (Profilgruben-Einzelprobe oder Satelliten-Mischprobe? Horizontbezogene oder tiefenstufenbezogene Probe?).

12.1.5 Externe Fachinhalte

Weiterhin erschien eine Einbindung der Daten in erweiterte Fachbezüge (über die beiden Inventuren der BZE hinaus) erforderlich. So musste die direkte Verknüpfbarkeit der BZE-Daten mit den jährlichen Erhebungen der Waldzustandserhebung (WZE) gewährleistet werden, insbesondere für die Plots, auf denen sowohl die WZE als auch die BZE durchgeführt werden. Nicht zuletzt sollte ein Abgleich mit den Standortkartierungen der Bundesländer oder Bodeninventuren des Intensiven Umweltmonitorings (Level II) oder eine Erfolgskontrolle der Kompensations-Kalkungen ermöglicht werden, was ein grundlegendes Konzept zur technischen Integration der mit unterschiedlichen Zielvorstellungen unabhängig voneinander erhobenen Daten erforderte (weitere Integrationsebenen).

Nicht alle Details werden im Rahmen jeder einzelnen Auswertung relevant, aber Ziel des IT-Konzepts war es insgesamt, sämtliche erhobenen Ausgangsinformationen so zu verwalten und, flankiert von grundlegenden Auswertungsfunktionen, so zur Verfügung zu stellen, dass allen potenziellen Fragestellungen schnell, einfach und verlässlich nachgegangen werden kann, der Gesamtdatenbestand dabei allen Bearbeitern stets identisch vorliegt und die Entstehung fach- oder personenbezogener „Daten-Inseln“ oder Verrechnungsverfahren (s. Abb. 190, linker Teil) vermieden wird.

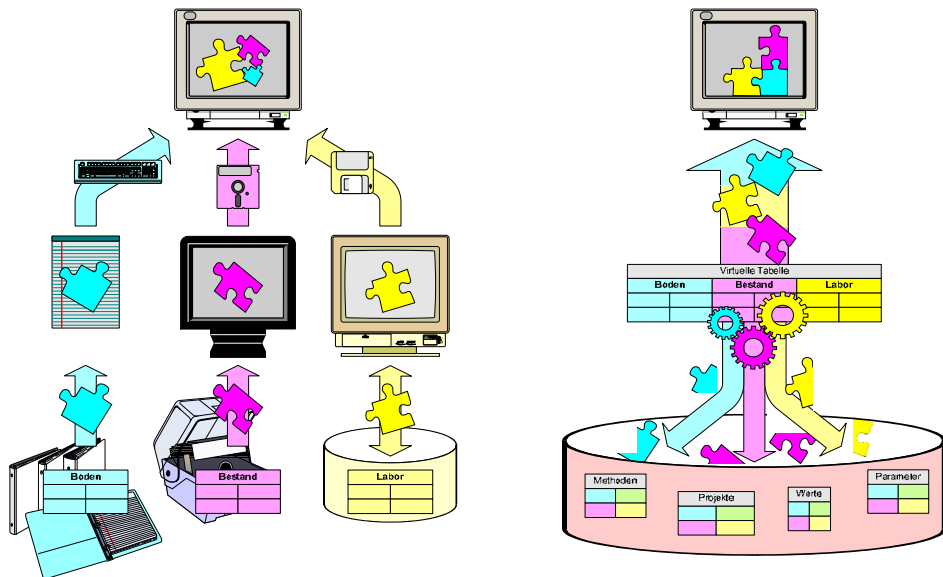


Abbildung 190: Gegenüberstellung von Datenverwaltung in Teildatenbanken (links) und mit zentraler Datenintegration (rechts)

12.2 Umsetzung

In der Abteilung Umweltkontrolle der NW-FVA wird seit 1996 das forstökologische Datenbanksystem ECO entwickelt und betrieben, das neben der vollständigen Integrierbarkeit einschlägiger Erhebungen u. a. mit der konzeptionellen Leitidee entwickelt wurde, zusätzliche Inhalte auch nachträglich ohne strukturelle Änderungen integrieren zu können (HOPPE u. SCHULZE 1997, vgl. Abb. 190, rechter Teil). Dies hat neben einer einheitlichen, redundanzfreien Datenhaltung den gravierenden Vorteil, auch für neu zu übernehmende Datenbestände auf existierende ausgetestete Funktionalitäten zurückgreifen zu können.

Im Zuge der Analyse des BZE-Erhebungsumfangs zeigte sich wie schon bei früheren Projekten, dass dieser Konzept-Anspruch in der Praxis umsetzbar war. Erforderlich wird im Einzelfall die Definition einer Verfahrensweise, wie spezifische Teilinformationen in die bereits bestehenden, notwendigerweise abstrakten Datenstrukturen zu übernehmen sind, wie also die Datenstruktur bezüglich des konkreten Projektes zu interpretieren ist (s. Abb. 191, s. SCHULZE 2012).

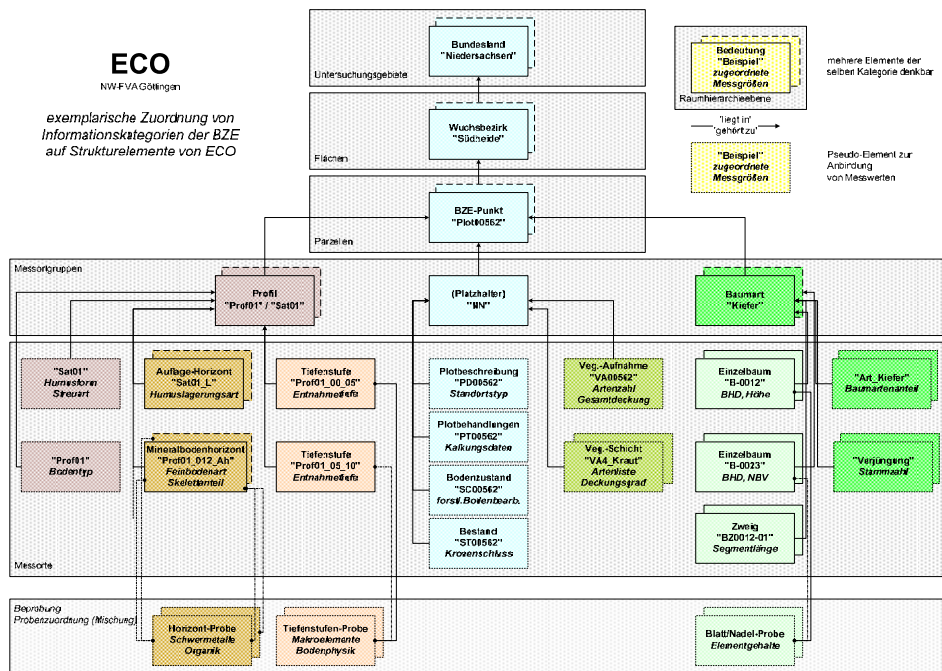


Abbildung 191: Zuordnung von Informationskategorien der BZE zu Strukturelementen von ECO

12.2.1 Identifizierung von Informations-Kategorien

Wichtig bei der Analyse der Projekt-Informationen als Vorstufe einer Anleitung zu ihrer Abbildung in das Datenmodell war eine saubere Kategorisierung, meist auch eine Hierarchisierung der Informationen, die nicht unbedingt von der zugrundeliegenden Fach-Arbeitsanleitung in ausreichendem Maß vorgegeben wird.

In Bezug auf die BZE wurden folgende Informations-Kategorien identifiziert und differenziert (s. Abb. 191):

- *Platz*bezogene, zeitlich unveränderliche (z. B. Koordinaten, Relief)
- *Platz*bezogene, zeitlich veränderliche (z. B. Kalkungsmaßnahmen)
- *Inventur*bezogene, zeitlich variable (z. B. die Standortstypisierung)
- *Profil*bezogene (z. B. die Humusform, die an einzelnen Satelliten abweichend sein kann)
- *Horizont*bezogene (z. B. die Feinbodenart, die in Horizonten des Profils wechseln kann)
- *Tiefenstufen*bezogene (z. B. Bereiche der Probenentnahme)
- *Bestandes*bezogene (z. B. Kronenschlussgrad)
- *Baumarten*bezogene (z. B. Verjüngungsanteile)
- *Einzelbaum*bezogene (z. B. Baumhöhe und Kronenverlichtung)
- *Vegetationsschicht*bezogene (z. B. Artenzahl)
- *Vegetationsart*bezogene (z. B. Deckungsgrad in einer Schicht)

Einhergehend mit dieser Analyse empfiehlt sich die Festlegung bestimmter Konventionen zur internen Benennung von Datenobjekten im jeweiligen fachlichen Kontext.

12.2.2 Integration der Fach-Arbeitsanleitung

Die Projekt-Integration in ECO zog auch die vollständige Hinterlegung der jeweiligen Fach-Arbeitsanleitung i. S. der Erhebungsparameter in der Datenbank nach sich (hier: Anleitungen der BZE I und BZE II). Betrachtet man die Informationen, also die Daten einer Kategorie i. e. S. konkret, ist für viele Parameter datenbank-technisch die Einhaltung einer Liste vorgegebener (erlaubter) Werte zu gewährleisten. Dies ist eine Voraussetzung, um bei Auswertungen zuverlässig stratifizieren zu können, also die Gewissheit zu haben, nicht von der Bedeutung her identische Inhalte in mehreren abweichenden Schreibweisen vorzufinden, die man potenziell nicht alle mit einer Selektion erfasst. Die Hinterlegung dieser Werte-Listen ist damit ein grundlegendes, in der Datenbankanzeption berücksichtigtes Merkmal der Qualitätssicherung.

12.2.3 Projektübergreifende Listen mit projektspezifischen Kodierungen

Durch die Integration eines zusätzlichen Projektes ergeben sich i. d. R. Überschneidungen mit bereits in der Datenbank existierenden Inhalten, die dann einheitlich und projektübergreifend nutzbar werden sollten. Unter praktischen Aspekten ist es dabei bedeutsam, dass die Einzelinformationen – trotz integrativer, redundanzfreier Datenhaltung – projektspezifisch zuordenbar und kodierbar bleiben, da die Feldbelege i. d. R. in Code-Form ausgefüllt werden und auch Berichte oft projektspezifisch kodiert zu erstellen sind. Ein und derselbe Informationsgehalt, z. B. die Kalkgehaltsstufe eines Mineralbodenhorizontes, wird aber durchaus in verschiedenen Projekten – selbst zwischen BZE I und BZE II – verschieden kodiert (s. Tab. 56).

Tabelle 56: Kodierung von Kalkgehaltsstufen in verschiedenen Projekten

Kalkgehaltsstufe	BZE I	BZE II	SOK
carbonatfrei	cf	c0	c0
sehr carbonatarm	-	c1	c1
carbonatarm	ca	c2	c2
durchsetzt	cd	-	cx
carbonathaltig	ch	c3	c3
mittel carbonathaltig	-	-	c3.2
stark carbonathaltig	-	-	c3.3
carbonatreich	cr	c4	c4
sehr-carbonatreich	-	c5	c5
extrem-carbonatreich	-	c6	c6
Carbonat	-	c7	-
keine Angabe	mv	-9	-9

SOK = Standortkartierung Niedersachsen

Umgekehrt kann ein identischer Code projektübergreifend verschiedene Bedeutungen haben, z. B. bedeutet der Code „HS“ des Parameters „Reliefformen“ bei der BZE I „Hangschulter“, in der BZE II „Hangversteilung“.

Aus der zentralen Speicherung des Volltextes ergibt sich eine maximal mögliche Transparenz, in dem inhaltlich Gleiches zwar in den vorgesehenen, unterschiedlichen Codes, nicht aber mit unterschiedlichen oder mehrfachen Nennungen der Bedeutung abgelegt wird.

12.2.4 Differenzierung von Fehlwerten

Nicht unerheblich für eine lückenlose, hoch qualitative und interpretierbare Datenerhaltung ist eine adäquate Differenzierung von Fehlwerten. Fehlwerte können entstehen, wenn

- Einträge vergessen wurden („keine Angabe“)
- bestimmte, obligatorische Angaben im jeweiligen Kontext obsolet sind (z. B. Kronenschlussgrad der Unterschicht in einem einschichtigen Bestand: „entfällt“)
- aus den Feld-Protokollen ersichtlich wird, dass ganze Teilerhebungen nicht durchgeführt wurden (z. B. Bestandes-Ansprache nach Windwurf: „nicht erhoben“)
- Einträge auf Formularen nicht entziffert werden konnten („unklar“)

Von solchen Fehlwerten klar abzugrenzen sind fehlende Merkmalsausprägungen, also z. B. die Mächtigkeit „0“ cm eines nicht existierenden Oh-Horizonts (für den aber über eine solche Eintragung klar dokumentiert wird, dass der Eintrag nicht schlicht vergessen wurde), die Kronenverlichtungsangabe „0“ %, „keine“ Durchwurzelung oder „unbekannt“ bei einem beobachteten Merkmal mit nicht klärbarer Schadursache. Diese Sachverhalte dürfen im Hinblick auf die spätere Auswertbarkeit im technischen Sinne (wo Leerpositionen immer stören) wie im inhaltlichen Sinne (wo ein konkreter Eintrag immer dieselbe Bedeutung haben sollte) nicht durch „-“ oder schlichtes Freilassen des Datenfeldes abgebildet werden. Auch typischerweise optionale Freitext-Felder wie „Bemerkung“ werden deshalb ggf. mit einem Inhalt wie „(keine)“ durchgängig gefüllt. Um maximale Transparenz und Sicherheit bei der Dateninterpretation zu erreichen, sind Leerwerte also in der Datenbank insgesamt nicht vorgesehen.

12.2.5 Methodendokumentation der Laboranalytik

Einen Informationsbereich mit besonderem qualitativen und quantitativen Gewicht stellt die Laboranalytik dar. Hier entstanden im Rahmen der BZE besondere Anforderungen, da die Ergebnisse diverser Labore, die sich auf unterschiedliche Teilproben teilweise überlappende Profilschnitte beziehen können, integrativ zu verwalten waren. So gab es getrennte Beprobungen und/oder Analysen von Teilproben für Hauptelemente, Schwermetalle, Organika und bodenphysikalische Parameter, die häufig in unterschiedlichen Laboren (d. h. mit unterschiedlicher technisch-struktureller und fachlicher Notation) durchgeführt wurden. Auch Unterprogramme wie das EU-BioSoil-Projekt im Rahmen der BZE II erforderten die Dokumentation spezifischer Probenzuordnungen und Beprobungs- und Analysemethoden. Nicht zuletzt lagen in einer Probe häufig multiple Ergebnisse zu einem Element vor, wenn unterschiedliche Materialaufschlüsse durchgeführt wurden (was wiederum in diversen Laboren und mit großem zeitlichen Abstand erfolgt sein kann).

Zwischen BZE I und BZE II erfolgten i. d. R. auch methodische Weiterentwicklungen bzw. Methodenfestlegungen. Für die Humusaufgaben ergab eine Analyse der Laborverfahren z. B. zunächst folgendes, in der Tabelle 57 dargestelltes Bild:

Tabelle 57: Übersicht der Analyseverfahren der Humusaufgaben bei der BZE I und II für Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt

	BZE I	BZE II
Niedersachsen	Druckaufschluss	Königswasseraufschluss
Hessen	Königswasseraufschluss	Königswasseraufschluss
Sachsen-Anhalt	Gesamtaufschluss	Königswasseraufschluss

Damit war für die BZE I zunächst kein direkter Ländervergleich möglich und eine Zeitreihenbetrachtung nur für Hessen aussagekräftig. Erst über die Nachanalyse von Rückstellproben der BZE I konnte hier eine einheitlich interpretierbare Datenlage hergestellt werden (durchgängig Königswasseraufschluss).

Insgesamt wird also ein Vergleich von Laborergebnissen – egal, ob auf der zeitlichen Schiene BZE I/II oder auch bundeslandübergreifend innerhalb einer Inventur – erst auf der Basis einer Methodendokumentation zulässig, die Aussagen zur Vergleichbarkeit von methodischen Varianten erlaubt. Die interne Datenhaltung muss damit mindestens die Verfahren der Probenvorbereitung, des Aufschlusses und der Messung sowie Einheiten und Bestimmungsgrenzen umfassen und diese müssen wiederum technisch unmittelbar mit den Analyseergebnissen verknüpft verwaltet werden.

12.2.6 Anwendungsprogrammierung

Die aus den dargestellten Anforderungen und Aspekten resultierende Datenstrukturierung führt zur technischen Speicherung der Daten in einer Form, die für den Nutzer insofern „wertlos“ ist, als er die benötigten Datensätze in der Datenbank nicht so vorfindet, dass sie unmittelbar für ihn verwendbar sind. Die Datenspeicherung kann nämlich gerade nicht in einer nah an die verwendeten Formulare angelehnten Form erfolgen (wie sie zwar traditionell üblich ist, aber wodurch sie auch einschlägige Schwächen aufweist). Vielmehr müssen die i. d. R. physikalisch stark zergliedert gespeicherten Teilm Informationen durch sogenannte „Sichten“ in eine allgemein verständliche Form rücktransferiert werden. Diese Sichten müssen darüber hinaus in Programmoberflächen eingebunden werden, um z. B. alle wesentlichen Datenbereiche eines Plots gleichzeitig darzustellen. Es wird also eine Anwendungsprogrammierung erforderlich, die es dem Nutzer ermöglicht, ohne Kenntnisse der internen Datenstrukturen auf die gewünschten Informationen in einer Form zuzugreifen, die primär inhaltlichen (und nicht technischen) Erfordernissen genügt.

Grundsätzlich wird im entwickelten Anwendungsprogramm die Auswahl und Betrachtung unterschiedlichster Plot-Teilmenen unterstützt, wobei man nach zeitlichen (BZE I/II), räumlichen (z. B. Bundesländer, Wuchsgebiete), administrativen (Forstämter, Landkreise) oder inhaltlichen (z. B. Besitzart, Baumart, Kalkungsstatus) Parametern stratifizieren kann (s. Abb. 192, rechts). Standard-Verrechnungen werden automatisch ausgeführt und sind teilweise parametrisierbar. Es ist die Ausgabe einschlägiger Standard-Reports (u. a. Plot-, „Steckbriefe“, s. Kap. 2) möglich, aber auch anspruchsvollerer, z. B. zeitreihenorientierter Zusammenstellungen. Auch die Zielformate für die BZE-Bundesdatenbank lassen sich automatisiert generieren.

Aspekte des technischen Grundkonzeptes der Anwendungsentwicklung, die mit Borland Delphi umgesetzt wurde, sind:

- eine übergreifende, hierarchische, erweiterbare Klassenbildung für Datenobjekte aus der WZE, der BZE, der Standortkartierung und aus Bodeninventuren (s. Abb. 192, links)
- vollständige Kapselung aller Datenbankzugriffe in Anwendungsmasken
- zentrale Hinterlegung von statischen Basisinformationen (z. B. Parameter für nFK-Berechnung etc.) in geschützten Steuerdateien
- Eingrenzung von Programmfunktionen in Abhängigkeit von Benutzerrechten.

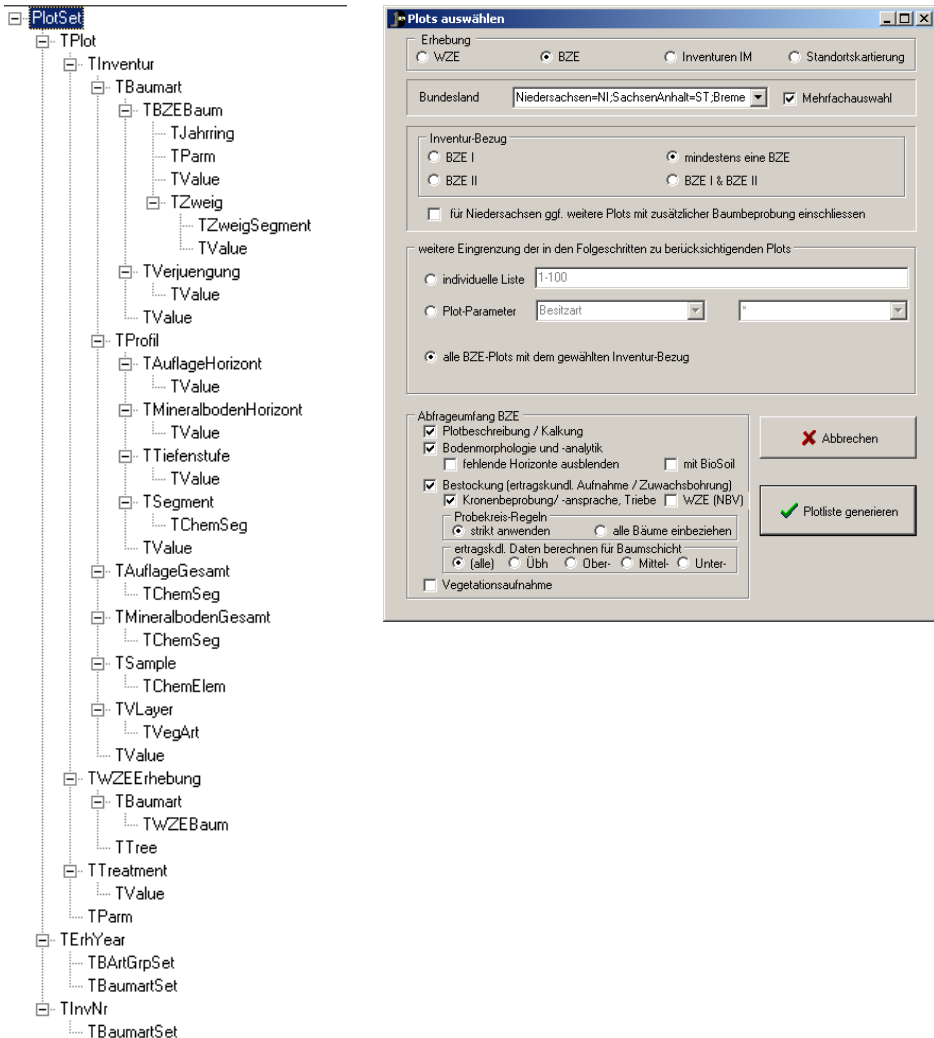


Abbildung 192: Klassendefinitionen und -hierarchie sowie Plot-Auswahlmaske der BZE-Applikation

12.3 Praktische Erfahrungen

Der eigentlichen wissenschaftlichen Datenauswertung muss erfahrungsgemäß eine Phase der Datenvalidierung vorausgehen, bzw. bringen erste Auswertungsschritte i. d. R. Dateninkonsistenzen oder Unvollständigkeiten zum Vorschein. Zur Klärung von Detailfragen (z. B. der ausgewiesene Bodentyp passt nicht zur Horizontfolge) erwies es sich als äußerst hilfreich, neben den eigentlichen Erhebungsdaten ergänzende Medien zu integrieren und dem Benutzer unmittelbar zur Verfügung zu stellen (s. Abb. 193): Fotos der Bodenprofile und des Bestandes, großmaßstäbige Lagepläne (im Hinblick auf Einfluss z. B. von Landwirtschaft, Besiedlung oder Verkehrsstrassen in der Nachbarschaft des Plots) sowie die gescannten Originalbelege (z. B. Wert fehlt nur in der Datenbank, nicht aber auf dem Beleg) konnten oft direkt zur Klärung von Unplausibilitäten beitragen.

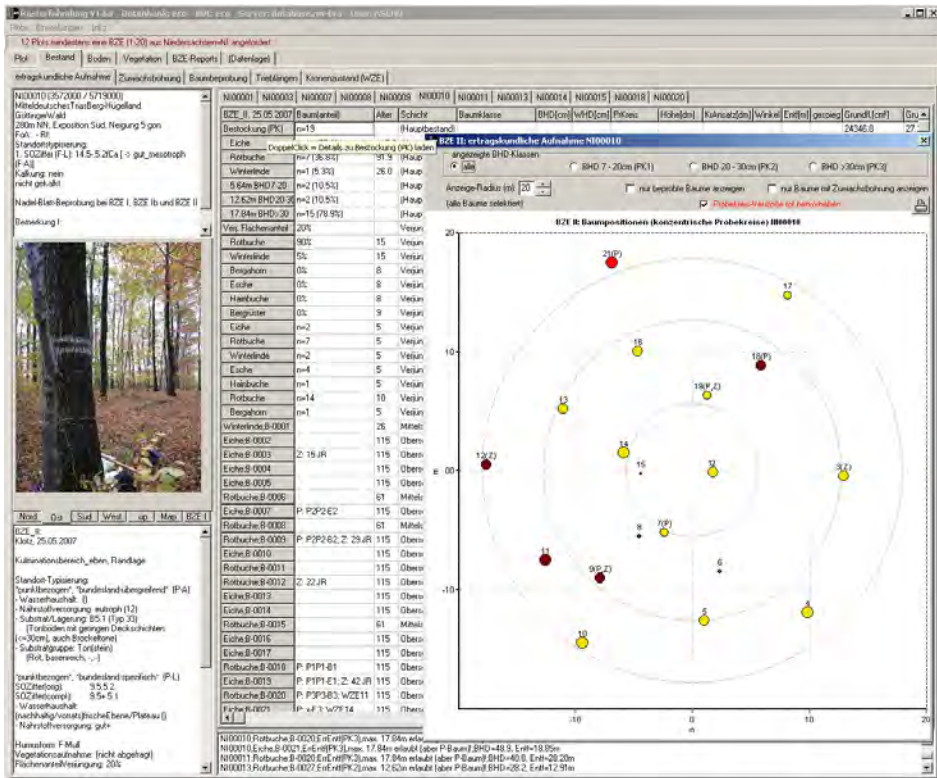


Abbildung 193: Einbindung von Fotos und Graphiken zur Veranschaulichung der Plot-Situation

Die Auswertungen i. e. S. können dann auf dem „geprüften“ Datensatz erfolgen. Für sie gilt, dass bei der Datenerhebung oder Laboranalyse existierende Verfahrensunterschiede routinemäßig egalisiert werden müssen, damit eine einheitliche Bewertung der Informationen ohne größeren Aufwand möglich wird. So erfolgten z. B.

die Bodenprobenahmen bei der BZE I in Sachsen-Anhalt horizontbezogen, bei der BZE II aber tiefenstufenbezogen. Um die Daten trotzdem unmittelbar vergleichbar zu machen, erfolgt eine automatisierte, durch den Nutzer parametrisierbare Umrechnung auf einheitliche Bodensegmente (s. Abb. 194).

Gleiches gilt für zentrale Parameter wie z. B. den Kohlenstoff-Gehalt in Bodenproben: Hier wird aus potentiell unterschiedlichen Ausgangsgrößen (Cges, Corg, CaCO₃-C) einheitlich Corg abgeleitet, um übergreifende Bewertungen zu erlauben (gleiches gilt für pH-Werte und die Austauschkapazität). Dies ist auch für stratifizierende Größen wie z. B. die Trophiestufe der Standortskartierung implementiert, die zur Programmlaufzeit aus bundeslandspezifischen Angaben zu übergreifenden Kategorien umgeformt wird (vgl. Tab. 56, S. 455).

ST06080													
BZE_I, 17.11.1992	Zuordnungsfaktoren	TRD	GBA	FBV	nFK(dw)	pHH2O	pHKCl	CorgI	NI	BS	AKI	AKE_AI	AKE_Mn
		g/cm ³	Vol%	t/ha	mm	(DIN)	(DIN)	kg/ha	kg/ha	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha
0-5	Prof01_00_05 (100~100)	1.15	8.9	523.8	0.0	3.70	3.45	12938.5	601.4	42.3	38.9	144.79	
5-10	Prof01_05_16 (45~100)	1.64	18.1	671.6	0.0	3.96	3.50	6447.2	326.4	33.7	30.9	148.42	
-10-30	Prof01_05_16 (55~30)+Prof01_16_34 (78~70)	1.56	21.3	2451.5	0.0	4.09	3.61	12180.8	742.3	32.2	94.9	504.84	
-30-60	Prof01_16_34 (22~13)+Prof01_34_50 (100~53)+Prof01_50_60 (100~33)	1.11	29.6	2356.6	0.0	3.97	3.56	4012.4	509.2	29.5	215.1	1239.10	
-60-90	Prof01_60_90 (100~100)	1.27	9.8	3447.1	0.0	3.94	3.51	4825.9	910.0	49.7	668.8	2854.86	

ST06080																	
BZE_II, 08.05.2006	Zuordnungsfaktoren	TRD	GBA	FBV	nFK(dw)	pHH2O	pHKCl	CorgI	NI	BS	AKI	AKE_AI	AKE_Ca	AKE_Fe	AKE_K	AKE_Mg	AKE_Mn
		g/cm ³	Vol%	t/ha	mm	(DIN)	(DIN)	kg/ha	kg/ha	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
0-5	Sats_00_05 (100~100)	1.15	8.9	523.4	12.1	4.11	3.31	39847.9	1999.5	33.1	48.4	209.37	217.53	40.93	94.95	29.10	2.51
5-10	Sats_05_10 (100~100)	1.64	15.3	693.2	9.2	4.10	3.30	23305.3	1136.8	27.9	43.9	197.91	149.73	40.76	101.21	21.91	1.87
-10-30	Sats_10_30 (100~100)	1.65	20.4	2628.4	33.1	4.63	3.81	44183.8	1997.6	54.9	102.9	323.56	832.16	46.00	213.95	103.03	33.64
-30-60	Sats_30_60 (100~100)	1.05	30.7	2175.3	45.7	6.83	4.28	7649.9	717.9	51.4	64.4						
-60-90	Sats_60_90 (100~100)	1.27	9.8	3447.0	54.1	4.67	3.97	9720.5	930.7	77.4	261.6	492.92	2647.27	6.20	656.99	608.74	5.86

Abbildung 194: Automatisierte Umrechnung von Bodendaten auf beliebige Zieltiefssegmente

Andererseits müssen je nach Fragestellung unterschiedlich scharfe Berechnungs- und Bewertungskriterien zur Anwendung kommen, die ggf. als Verfahrensvarianten formalisiert und programmiert wurden und vom Benutzer optional gewählt werden können. So gibt es z. B. im Rahmen der Ableitung der Stoffvorräte über die analytisch bestimmten Stoffgehalte und die erforderlichen bodenphysikalischen Parameter die Möglichkeit, diese Berechnung auf eine konkrete Tiefenstufe eines Profils zu beziehen (also vorauszusetzen, dass alle Angaben einen identischen Bezug haben) oder ersatzweise auch die Einbeziehung eines weiteren Profilssegments zuzulassen (Chemieprobe und Physikprobe entstammen nicht dem identischen Profil, aber derselben Tiefenstufe). Bezüglich der Laborergebnisse gibt es die Möglichkeit, Sonderwerte (unter der Bestimmungs- oder Nachweisgrenze) wahlweise durch Standards ersetzen zu lassen (z. B. „halbe Bestimmungsgrenze“), um Datenlücken zu vermeiden, oder explizit nach diesen Bedingungen zu suchen, in dem spezielle Markierungen ausgegeben werden.

Insgesamt wurden einige Standard-Auswertungsfunktionen definiert, die automatisiert beim Abfragen der Daten ausgeführt werden. Für die Bodendaten ist neben der Umrechnung der Analyseergebnisse in Gehalte oder Vorräte in Massen- oder

Äquivalent-Einheiten für frei vom Nutzer definierbare, beprobungsunabhängige Tiefenabschnitte (z. B. „Wurzelraum“) u. a. auch die Ableitung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) implementiert. Die ertragskundlichen Daten der Einzelbäume werden zu baumarten- und bestandesbezogenen Kennzahlen verdichtet. In einigen Fällen erfolgt zusätzlich eine automatische graphische Visualisierung von Sachverhalten (z. B. Stammverteilungspläne, Grundflächenzuwachs auf der Basis von Jahrringanalysen, Triebblängen, Tiefenverlauf von Stoffgehalten).

Ein hervorzuhebender Konzept-Grundsatz im Kontext von Auswertungen ist, dass Verdichtungs- oder Verrechnungsergebnisse i. d. R. nicht in der Datenbank gespeichert werden, sondern stets zur Programmlaufzeit erneut aus den Ausgangsdaten erzeugt werden (z. B. AK-Summe, Basensättigung, Feinbodenmenge etc.). Dies hat den Vorteil, dass nach Datenkorrekturen oder -ergänzungen die Nachführung der abgeleiteten Informationen nicht gesondert beachtet werden muss und sich keine Inkonsistenzen zwischen Ausgangs- und Auswertungsdaten ergeben können, was sonst erfahrungsgemäß unvermeidbar ist. Die zentrale Vorhaltung der Verarbeitungsfunktionen und -formeln gewährleistet zusätzlich personenübergreifend absolute Einheitlichkeit der angewendeten Verfahren und nach einer entsprechenden Testphase auch Fehlerfreiheit.

12.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die anspruchsvollen Ziele des BZE-Datenmanagements erreicht wurden. Die Arbeiten der puren Datenerfassung und die anschließenden Vollständigkeits- und Plausibilitätsprüfungen erforderten vor dem Hintergrund der eingangs dargestellten Ansprüche mit Abstand den größten Aufwand und wurden erheblich unterschätzt. Waren die Ausgangsdaten – meist in mehreren immer wieder zu korrigierenden Anläufen – aber erst einmal erfasst, stellte sich die Entwicklung der entsprechenden Programmoberflächen und Auswertungsroutinen vergleichsweise einfach und zügig umsetzbar dar.

Zu einer zukünftigen Minimierung des Aufwandes bei der Aufarbeitung, Verwaltung und Auswertung der Daten – einhergehend mit einer weiteren Steigerung der Datenqualität – würden beitragen:

- präzise Strukturierung der zu erhebenden Informationen in den Fachvorgaben unter Beteiligung von IT-Experten, darauf aufsetzend Entwurf praxis- und IT-gerechter Felderhebungsbelege
- möglichst weitgehende Eingrenzung und Definition zulässiger Methoden für Felderhebung, Probennahme und Analytik
- zeitlich vorgeschalteter „Testlauf“ an einem Teil-Kollektiv unter Realbedingungen, Analyse von Schwachpunkten und letzte Anpassungen
- Finalisierung der Fachvorgaben (als Grundlage der IT-Umsetzungen) vor Beginn der relevanten Durchführung

- detaillierte Anweisungen an die Kartierer und Probenehmer, u. a.:
 - Aufklärung über die Relevanz lückenlos und eindeutig im Sinne der Fachvorgaben ausgefüllter Feldbelege
 - Aufklärung über die Bedeutung und Behandlung von Fehlwerten
 - intensive Kontrolle auf Einhaltung der Vorgaben noch während der Feldkampagnen
- klare Definition der Schnittstellen (inhaltlich und technisch) zwischen Drittlaboren und Inventurleitungen
- Etablierung angemessener IT-Strukturen in datenproduzierenden Institutionen

Dies bedeutet, dass der projektvorbereitenden Phase insgesamt mehr Gewicht und Zeit eingeräumt werden sollte. Letztlich ist dadurch kein Mehraufwand, sondern eher eine Umschichtung von Ressourcen im Dienste der Qualitätssteigerung zu erwarten. Mittel- und langfristig würden auf diese Weise deutlich erweiterte und effizientere Auswertungsmöglichkeiten geschaffen.

Literatur

- ABER, J. D.; NADELHOFFER, K. J.; STEUDLER, P.; MELILLO, J. M. (1989): Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *Bioscience*, 39, 6, 378-386
- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Hannover, 438 S.
- AG BODENKUNDE (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. 3. Aufl., Hannover, 331 S.
- AHRENDTS, B. (2012): Regionalisierungskonzept zur flächendeckenden Bewertung des Austragsrisikos von Nitrat mit dem Sickerwasser aus Waldböden (RIKON). *Beiträge aus der NW-FVA*, Bd. 9, 115-148
- AHRENDTS, B.; MEESENBERG, H.; SPELLMANN, H. (2011): Waldbau ist Wasserwirtschaft. *Dtsch. Waldbesitzer*, 1, 7-8
- AHRENDTS, B.; KLINCK, U.; FORTMANN, H.; WAGNER, M.; MEESENBERG, H. (2017): Die repräsentative Gewinnung von Bodenlösung mittels Saugsonden. Teil I: Theorie, Methodik und Installation. In: NW-FVA (Hrsg.): *Waldböden: Nutzung und Schutz*. Fachtagung vom 10. bis 11. Oktober 2016 in Göttingen. *Beiträge aus der NW-FVA*, Bd. 17, 1-22
- AK STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. 6. Auflage. IHW-Verlag, Eching, 352 S.
- AK STANDORTSKARTIERUNG (2016): Forstliche Standortsaufnahme. 7. Auflage. IHW-Verlag, Eching bei München, 400 S.
- ALEWELL, C. (1995): Sulfat-Dynamik in sauren Waldböden – Sorptionsverhalten und Prognose bei nachlassenden Depositionen. *Bayreuther Forum Ökologie*, 19
- ANDREAE, H.; EICKENSCHIEDT, N.; EVERS, J.; GRÜNEBERG, E.; ZICHE, D.; AHRENDTS, B.; HÖHLE, J.; NAGEL, H.-D.; WELLBROCK, N. (2016): Stickstoffstatus und dessen zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H. (Hrsg.) (2016): *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland*. Thünen Report, 43, Braunschweig, 135-180
- ASCHE, N. (1997): Nährelementgehalt in Buchenblättern unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Variation auf basenarmen Standorten in Nordrhein-Westfalen. *Forstw. Cbl.*, 116, 394-402
- AUGUSTIN, S.; STEPHANOWITZ, H.; WOLFF, B.; SCHRÖDER, J.; HOFFMANN, E. (2005): Manganese in tree rings of Norway spruce as an indicator for soil chemical changes in the past. *European Journal of Forest Research*, 124, 313-318
- BARTH, N.; BRANDTNER, W.; CORDSEN, E.; DANN, T.; EMMERICH, K.-H.; FELDHAUS, D.; KLEEFISCH, B.; SCHILLING, B.; UTERMANN, J. (2000): Boden-Dauerbeobachtung, Einrichtung und Betrieb von Bodendauerbeobachtungsflächen. In: ROSENKRANZ, D.; BACHMANN, G.; KÖNIG, W.; EINSELE, G. (Hrsg.): *Bodenschutz. Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*. Erich Schmidt Verlag, Berlin. Bd. 3, Kennziffer 9152, 127 S.
- BBODSCHG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 Abs. 3 Verordnung vom 27. Sept. 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- BEESE, F. (1992): Umweltbelastungen und Standort. In: *Boden, Wasser und Luft, Umweltvorsorge in der AGF* (Hrsg.). Proc. vom 26.11.1992, Bonn, 36-39
- BEESE, F.; MEIWES, K. J. (1995): 10 Jahre Waldkalkung, Stand und Perspektiven. *AFZ* 17, 946-949
- BERNHARDT, M. (2005): Reaktionen der Waldbodenvegetation auf erhöhte Stickstoffeinträge: Analyse und Vorhersage von Vegetationsveränderungen anhand von funktionellen Merkmalen. *Dissertationes Botanicae*, 397, 1-121

- BGR (2007): Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000 N2.3). – Auszugskarten Acker, Grünland, Wald; Digit. Archiv FISBo Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR; Hannover und Berlin. <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Aktuelles/Archiv/Datenbank-BUEK1000N.html>
- BIMSchV (2013): Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 1021, 1023, 3754), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 19. Dezember 2017 (BGBl. I S. 4007) geändert worden ist
- BLAG KLiNA (2014) Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft „Klima, Energie, Mobilität – Nachhaltigkeit“: 5. Erfahrungsbericht 2014 zu umweltbezogenen Nachhaltigkeitsindikatoren der BLAG KLiNA an die Umweltministerkonferenz (UMK). 51 S.
- BLOCK, J.; GAUER, J. (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz: Ergebnisse der zweiten landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 70, 228 S.
- BLOCK, J.; MEIWES, K. J. (2013): Erhaltung der Produktivität der Waldböden bei der Holz- und Biomassenutzung. In: BACHMANN, G.; KÖNIG, W.; UTERMANN, J.: Bodenschutz - Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. 4200, 1. Lfg./13., 1-50
- BLOCK, J.; EICHHORN, J.; GEHRMANN, J.; KÖLLING, C.; MATZNER, E.; MEIWES, K. J.; VON WILPERT, K.; WOLFF, B. (2000): Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Wald-ökosystem-Dauerbeobachtungsflächen. Arbeitskreis C der Bund-Ländergruppe Level II. BML (Hrsg.), Bonn, 167 S.
- BLOCK, J.; SCHUCK, J.; SEIFERT, T. (2007): Einfluss der waldbaulichen Behandlung und der Holznutzung auf den Nährstoffhaushalt von Traubeneichenbeständen. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 63, 117-150
- BLUM, U.; HEINBACH, R. (2010): Gesamtauswertung der Datengrundlage sämtlicher BZE Ringversuche 2005 bis 2009. Gegenüberstellung der Ergebnisse von statistisch berechneten und fest definierten Toleranzbereichen (Methode der BZE sowie der EU-Auswertung). Durchgeführt im Auftrage des Gutachterausschusses „Forstliche Analytik“ am Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz durch die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
- BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G. W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York. 570 S.
- BMEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) (2014): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin. Broschüre, 52 S.
- BMEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) (2016): Forstliches Umweltmonitoring in Deutschland. Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring. 40 S.
- BML (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN) (1990): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE). Arbeitsanleitung. Bonn
- BORKEN, W.; MATZNER, E. (2004): Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 167, Issue 3, 277-283
- BRAUN, S.; FLÜCKIGER, W. (2009): Wie geht es unserem Wald? 25 Jahre Walddauerbeobachtung. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch. Bericht 3, 86 S.
- BRAUN, S.; THOMAS, V. F. D.; QUIRING, R.; FLÜCKIGER, W. (2010): Does nitrogen deposition increase forest production? The role of phosphorus. *Environmental Pollution*, 158, 2043-2052 (DOI: 10.1016/j.envpol.2009.11.030)
- BÜTTNER, G. (1997): Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) in Niedersachsen 1990-1991. Schriften aus der forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Sauerländer Frankfurt am Main, Bd. 122, 205 S.

- BWALDG (1975): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz) vom 2. Mai 1975 (BGBl. I S. 1037), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Januar 2017 (BGBl. I S. 75) geändert worden ist
- CEULEMANS, R.; JANSSENS, I. A.; JACH, M. E. (1999): Effects of CO₂ enrichment on trees and forests: Lessons to be learned in view of future ecosystem studies. *Annals of Botany*, 84, 577-590
- COLE, D. W. (1992): Nitrogen Chemistry, Deposition, and Cycling in Forests. In: JOHNSON, D. W.; LINDBERG, S. E. (Hrsg.): *Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling*. Ecological Studies Vol. 91. Berlin, Springer-Verlag, 150-152
- COOLS, N.; VESTERDAL, L.; DE VOS, B.; VANGUELOVA, E.; HANSEN, K. (2014): Tree species is the major factor explaining C:N ratios in European forest soils. *Forest Ecology and Management*, 311, 3-16
- COOLS, N.; VERSTRAETEN, A.; WEIS, W.; CARNICELLI, S.; CECCHINI, G.; CLARKE, N.; PANNATIER, E. G.; JOHNSON, J.; JONARD, M.; MEESENBERG, H.; NIEMINEN, T. M.; KARLSON, G. P.; VANGUELOVA, E.; SINTERMANN, J.; VESTERDAL, L.; HANSEN, K. (2016): Forest Soil Acidification in Europe today. In SEIDLING, W. (Hrsg.): *Forests Conditions. ICP Forests 2016 Executive report*, Eberswalde, 19 S., 6-10, <http://icp-forests.net/page/icp-forests-executive-report> (Zugriff am 15.05.2018)
- DAMMANN, I.; PAAR, U. (2017): WZE-Ergebnisse für alle Baumarten. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): *Waldzustandsbericht 2017 für Niedersachsen*, 10-16
- DAMMANN, I.; PAAR, U.; EICHHORN, J. (2007): *Waldzustandsbericht 2007 für Niedersachsen*. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.), 32 S.
- DAMMANN, I.; SCHÖNFELDER, E.; TALKNER, U.; EVERS, J.; PAAR, U. (2016): Waldernährung. In: PAAR, U.; EVERS, J.; DAMMANN, I.; KÖNIG, N.; SCHULZE, A.; SCHMIDT, M.; SCHÖNFELDER, E.; SCHELER, B.; ULLRICH, T.; EICHHORN, J. (2016): *Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Ergebnisse der Zweiten Bodenzustandshebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der NW-FVA*, Bd 15, 217-266
- DE VRIES, W.; REINDS, G. J.; GUNDERSEN, P.; STERBA, H. (2006): The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. *Glob. Chang. Biol.*, 12, 1151-1173
- DE VRIES, S.; SUHARTI, S.; POUVREAU, L. A. M. (2007). Nitric oxide reductase: structural variations and catalytic mechanism. *Biology of the Nitrogen Cycle*, 57-66
- DE VRIES, W.; DOBBERTIN, M. H.; SOLBERG, S.; VAN DOBBEN, H. F.; SCHAUB, M. (2014): Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystem in Europe: an overview. *Plant and Soil*. 380, 1-45 (DOI: 10.1007/s11104-014-2056-2)
- DE VRIES, W.; POSCH, M.; SVERDRUP, H.; LARSEN, T.; DE WIT, H.A.; BOBBINK, R.; HETTELINGH, J.-P. (2015): Geochemical Indicators for Use in the Computation of Critical Loads and Dynamic Risk Assessments. In: DE VRIES, W.; HETTELINGH, J.-P.; POSCH, M.: *Critical and Dynamic Risk Assessments. Nitrogen, Acidity and Metals in Terrestrial and Aquatic Ecosystems*. Environmental Pollution, Springer. Dordrecht, Heidelberg, New York, London. 15-58
- DISE, N.; WRIGHT, R. F. (1995): Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management*, 71, 1-2, 153-161
- DISE, N.; MATZNER, E.; GUNDERSEN, P. (1998): Synthesis of nitrogen pools and fluxes from European forest ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution*, 105, 143-154
- DUQUESNAY, A.; DUPOUEY, J. L.; CLEMENT, A.; ULRICH, E.; LE TACON, F. (2000): Spatial and temporal variability of foliar mineral concentration in beech (*Fagus sylvatica*) stands in northeastern France. *Tree Physiology*, 20, 13-22
- EICHHORN, J. (1995): Stickstoffsättigung und ihre Auswirkung auf das Buchenwaldökosystem der Fallstudie Zierenberg. *Habilitationsschrift, Forstwissenschaftliche Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen*. 174 S.
- ELLENBERG, H. (1977): Stickstoff als Standortfaktor, insbesondere für mitteleuropäische Pflanzengesellschaften. *Oecol. Plant.*, 12 (1), 1-21, 82-92
- ELLENBERG, H.; WEBER, H. E.; DÜLL, R.; WIRTH, V.; WERNER, W.; PAULISSEN, D. (2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 3. Aufl., *Scripta Geobot.*, 18, 1-262

- EVERS, F. H. (1964): Die Bedeutung der Stickstoff-Form für Wachstum und Ernährung der Pflanzen, insbesondere der Waldbäume. Stuttgart: Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 14, 19-37
- EVERS, F. H. (1972): Die jährweisen Fluktuationen der Nährelementkonzentrationen in Fichtennadeln und ihre Bedeutung für die Interpretation nadelanalytischer Befunde. AFJZ, 143, 68-74
- EVERS, F. H. (1986): Die Blatt- und Nadeldiagnose als Instrument der Bioindikation. AFZ, 1/2, 6-9
- EVERS, J.; PAAR, U. (2012): Bodenzustandserhebungen (BZE I und BZE II) – Wie hat sich der Bodenzustand in Hessens Waldböden verändert? In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2012 für Hessen, 31-35
- EVERS, J.; PAAR, U. (2013): Bodenzustandserhebung (BZE II) und Standortskartierung. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2013 für Hessen, 26-35
- EVERS, J.; KÖNIG, N.; WOLFF, B.; MEIWES, K. J. (2001): Vorbereitung der Zweiten Bodenzustandserhebung im Wald – Untersuchungen zur Laboranalytik, Stickstoffbestimmung und zeitlichen Variabilität bodenchemischer Parameter. BMVEL, Bonn, 243 S.
- EVERS, J.; DAMMANN, I.; NOLTENSMEIER A.; NAGEL, R.V. (2008): Auswirkungen von Bodenschutzkalkungen auf Buchenwälder (*Fagus sylvatica* L.) In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der NW-FVA, Bd. 3, 21-50
- EVERS, J.; PAAR, U.; SCHMIDT, W. (2010): Ziele und erste Ergebnisse der BZE II. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2010 für Niedersachsen, 24-27
- EVERS, J.; PAAR, U.; EICHHORN, J. (2013a). Bestätigt die BZE die Trophiceinschätzung der forstlichen Standortskartierung? AFZ-DerWald, 14, 11-15
- EVERS, J.; PAAR, U.; SCHMIDT, W.; EICHHORN, J. (2013b): Substratgruppen in der BZE als Brücke zur forstlichen Standortskartierung. Ergebnisse der BZE II für Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt. AFZ-DerWald, 14, 16-20
- EVERS, J.; SCHÖNFELDER, E.; STEINMANN, V.; JENSEN, T.; STÜBER, V.; JANSEN, M. (2015): Bodenchemie und Durchwurzelung in tieferen Bodenschichten. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2015 für Niedersachsen, 33-35
- FABIAN, P.; MENZEL, A. (1998): Wie sehen die Wälder von morgen aus – aus der Sicht eines Klimatologen. Forstw. Cbl., 117, 339-354
- FALK, W.; STETTER, U. (2010): Stickstoff – vom Mangel in den Überfluss. LWF aktuell 78, 18-20
- FALLER, N.; HERWIG, K.; KÜHN, H. (1970): Die Aufnahme von Schwefeldioxid (S³⁵ O₂) aus der Luft. I. Einfluss auf den pflanzlichen Ertrag. Plant and Soil, 33, 177-191
- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS) (2006): Global Forest Resources Assessment. FAO Forestry Paper, 147, Rome, 320 S.
- FIEDLER, H. J.; RÖSLER, H. J. (1988): Spurenelemente in der Umwelt. 1. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- FLECK, S.; EICKENSCHIEDT, N.; AHREND, B.; EVERS, J.; GRÜNEBERG, E.; ZICHE, D.; HÖHLE, J.; SCHMITZ, A.; WEIS, W.; SCHMIDT-WALTER, P.; ANDREAE, H.; WELLBROCK, N. (2019): Nitrogen Status and Dynamics in German Forest Soils. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A. (Hrsg.): Status and Dynamics of Forests in Germany. Results of the National Forest Monitoring. Ecological Studies. Springer Verlag, im Druck
- FLÜCKIGER, W.; BRAUN, S. (1999): Nitrogen and its effect on growth, nutrient status and parasite attacks in beech and Norway spruce. Water, Air, and Soil Pollution; 116, 99-110
- FLÜCKIGER, W.; BRAUN, S. (2003): Critical limits for nutrient concentrations and ratios for forest trees – a comment. Additional Documents-Working Group Presentations. 273-280
- FLÜCKIGER, W.; BRAUN, S.; MAINIERO, R.; SCHÜTZ, K.; THOMAS, V. (2011): Auswirkungen erhöhter Stickstoffbelastung auf die Stabilität des Waldes. Synthesebericht im Auftrag des BAFU. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch

- FÖRSTER, P. (1975): Mineralische Stoffbelastung im boden- und oberflächennahen Grundwasser unter Nadelwald und bei Ackernutzung in einem Sandboden Nordwestdeutschlands. Forstw. Cbl., 94, 67-78
- FORTMANN, H.; RADEMACHER, P.; GROH, H.; HÖPER, H. (2012): Stoffgehalte und -vorräte im Boden und deren Veränderungen. In: HÖPER, H.; MEESENBURG, H. (Hrsg.): Tagungsband 20 Jahre Dauerbeobachtung in Niedersachsen. GeoBerichte, 23, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 48-69
- FORUMV (2013): Verordnung über Erhebungen im Forstlichen Umweltmonitoring (ForUmV) vom 20. Dezember 2013 (BGBl. I S. 4384)
- GÄRTNER, E. J.; URFER, W.; EICHHORN, J.; GRABOWSKI, H.; HUSS, H. (1990): Die Nadelverluste mittelalter Fichten (*Picea Abies* (L.) Karst.) in Hessen in Abhängigkeit von Nadelinhaltsstoffen, Bodenelementgehalten und Standortfaktoren. Hess. Forstl. Versuchsanstalt, Bd. 10, 192 S.
- GAFÄ (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK, Hrsg.) (2005): Handbuch Forstliche Analytik – eine Loseblattsammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Grundwerk. BMELV
- GAFÄ (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK, Hrsg.) (2014): Handbuch Forstliche Analytik – eine Loseblattsammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Grundwerk und 1. bis 5. Ergänzung. BMELV
- GAINES, T. P.; GAINES, S. T. (1994): Soil texture effect on nitrate leaching in soil percolates. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 25, 13-14, 2561-2570
- GAUGER, T.; ANSHELM, F.; SCHUSTER, H.; DRAAIJERS, G. P. J.; BLEEKER, A.; ERISMAN, J. W.; VERMEULEN, A. T.; NAGEL, H.-D. (2002): Kartierung ökosystembezogener Langzeittrends atmosphärischer Stoffeinträge und Luftschadstoffkonzentrationen in Deutschland und deren Vergleich mit Critical Loads and Critical Levels. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU/UBA, FE-Nr. 299 42 210. Institut für Navigation, Univ. Stuttgart; 207 S.
- GLATZEL, G. (1991): The impact of historic land use and modern forestry on nutrient relations of Central European forest ecosystems. Fertilizer Research, 27, 1-8
- GÖTTLEIN, A. (2015): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. AFJZ, 186, 110-116
- GREVE, M. (2014): Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf Bodenzustand, Sickerwasser und Nadelspiegelwerte von drei Versuchsanlagen in Rheinland-Pfalz. Forstarchiv, 46, 35-46 (DOI: 10.4432/0300-4112-85-35)
- GREVE, M.; BLOCK, J.; SCHRÖCK, H. W.; SCHULTZE, J.; WERNER, W.; WIES, K. (2016): Nährstoffversorgung rheinland-pfälzischer Wälder. Mitteilung FAWF, Trippstadt, Nr. 76/16, 268 S.
- GROSSMANN, H. (1927): Die Waldweide in der Schweiz. ETH Zürich, Dissertation, Höngg, Zürich, 123 S.
- GRÜNEBERG, E.; RIEK, W.; SCHÖNING, J.; EVERS, J.; HARTMANN, P.; ZICHE, D. (2016): Kohlenstoffvorräte und deren zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H. (Hrsg.) (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Thünen Report, 43, Braunschweig, 181-209
- GUCKLAND, A.; PAAR, U.; DAMMANN, I.; EVERS, J.; MEIWES, K. J.; MINDRUP, M. (2011): Einfluss der Kalkung auf die Bestandesernährung. AFZ-Der Wald, 6, 23-25
- GUCKLAND, A.; AHRENDTS, B.; PAAR, U.; DAMMANN, I.; EVERS, J.; MEIWES, K.-J.; SCHÖNFELDER, E.; ULLRICH, T.; MINDRUP, M.; KÖNIG, N.; EICHHORN, J. (2012): Predicting depth translocation of base cations after forest liming: results from long-term experiments. Eur. J. Forest Res., 131. Jg., 6, 1869-1887
- GUNDERSEN, P.; CALLESEN, I.; DE VRIES, W. (1998a): Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios. Environmental Pollution, 102, 403-407
- GUNDERSEN, P.; EMMETT, B. A.; KJØNAAS, O. J.; KOOPMANS, C. J.; TIETEMA, A. (1998b): Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests. A synthesis of NITREX data. Forest Ecology and Management, 101, 37-55
- HAIDER, K. (1996): Biochemie des Bodens. Ferdinand Enke, Stuttgart, 174 S.

- HAMMEL, K.; KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Forstliche Forschungsberichte München, 185. Heinrich Frank. München. 148 S.
- HARTMANN, G.; NIENHAUS, F.; BUTIN, H. (2007): Farbatlas Waldschäden – Diagnose von Baumkrankheiten. Ulmer Verlag Stuttgart, 269 S.
- HARTMANN, P.; BUBERL, H.; PUHLMANN, H.; SCHÄFFER, J.; TREFZ-MALCHER, G.; ZIRLEWAGEN, D.; VON WILPERT, K. (2016): Waldböden Südwestdeutschlands. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald von 1989-1992 und 2006-2008. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Verlag Kessel, Remagen-Oberwinter, 328 S.
- HASTIE, T. J.; TIEBSHIRANI, R. J. (1990): Generalized Additive Models. Monographs on Statistics and Applied Probability, 43. Chapman & Hall. London. 335 S.
- HAYNES, R. J. (1982): Effects of liming on phosphate availability in acid soils – A critical review. *Plant and Soil*, 68, 289-308
- HEINSDORF, D. (1966/67): Untersuchungen über die Wirkung mineralischer Düngung auf das Wachstum und den Ernährungszustand von Kiefernkulturen auf Sandböden im nordostdeutschen Tiefland. *Archiv f. Forstwesen*, 15/16
- HEINSDORF, D. (1968): Ernährung und Wachstum junger Kiefern auf einem an Magnesium und Kalium armen Talsandboden nach mehrmaliger mineralischer Düngung. *Archiv f. Forstwesen*, 17, 813-838
- HEINSDORF, D.; BRANSE, C. (2002): Entwicklung der Nährelementgehalte in den Nadeln von Kiefernbeständen auf charakteristischen pleistozänen Standorten Brandenburgs in den Jahren 1964-1999. *Forst und Holz*, 57, 421-428
- HEINZE, M.; FIEDLER, H. J. (1992): Ernährung der Gehölze. 43-115. In: LYR, H.; FIEDLER, H. J.; TRANQUILLINI, W. (Hrsg.): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Verlag Gustav Fischer. 620 S.
- HEUNISCH, C.; CASPERS, G.; ELBRACHT, J.; LANGER, A.; RÖHLICH, H.-G.; SCHWARZ, C.; STREIF, H. (2017): Erdgeschichte von Niedersachsen. Geologie und Landschaftsentwicklung. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.), *GeoBerichte*, 6, 85 S.
- HIEDERER, R.; DURRANT-HOUTEN, T.; MICHELI, E. (2011): Evaluation of BioSoil demonstration project – Soil Data Analysis. JRC63301, Publications Office of the European Union, Ispra. 155 S.
- HMLWLFN (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG, WOHNEN, LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN UND NATURSCHUTZ, Hrsg.) (1994): *Naturgemäßer Waldbau. Wald in Hessen*. 40 S.
- HOLLOWAY, J. M.; DAHLGREN, R. A.; HANSEN, B.; CASEY, W. H. (1998): Contribution of bedrock nitrogen to high nitrate concentrations in stream water. *Nature*, 395, 785-788
- HÖPER, H.; MEESENBURG, H. (Hrsg.) (2012): Tagungsband 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. *GeoBerichte*, 23, 256 S.
- HOFMEISTER, H. (2004): *Lebensraum Wald*. Nachdruck der 4. Aufl., Verlag Dr. Kessel, 285 S.
- HOPPE, J.; SCHULZE, A. (1997): ECO. Datenbank zur Stoffbilanzierung in Waldökosystemen. Teil 1: Datenbankstruktur und Virtuelle Tabellen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B*, Bd. 54, 124 S.
- HORVÁTH, B.; MEIWES, K. J.; MEESENBURG, H. ACKERMANN, J. (2010): Nitratausträge unter Wald. Untersuchungen auf Standorten mit hohen luftbürtigen Stickstoffeinträgen. *Grundwasser*, 9, 32 S.
- HUBER, C.; WEISS, W.; GÖTTLEIN, A. (2006): Tree nutrition of Norway spruce as modified by liming and experimental acidification at the Höglwald site, Germany, from 1982 to 2004. *Annals of Forest Science*, 63, 861-869
- HÜTTL, R. F. (1992): Die Blattanalyse als Diagnose- und Monitoringinstrument in Waldökosystemen. In: Festkolloquium anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr. H. Zöttl am 24.04.1992. *Freiburger bodenkundliche Abhandlungen*, Bd. 30, 31-59
- HUNGER, W.; FIEDLER, H. J. (1965): Düngungsdiagnosen für ältere Fichtenbestände des Erzgebirges und Vogtlandes. *Archiv f. Forstwesen*, 14, 963-986

- ICP FORESTS (1998): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part IV: Sampling and analysis of needles and leaves. Bundesforschungsanstalt f. Forst- u. Holzwirtschaft, Hamburg
- ICP FORESTS (2010): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests). Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). UNECE, Hamburg, 578 S.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; STECHOW, C. V.; ZWICKEL, T.; MINX, J. C. (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- IRNIGER, M. (1993): Wald und Waldnutzung im Umbruch des 18. Jahrhunderts. *Geographica Helvetica*, 48, 67-71 (DOI:10.5194/gh-48-67-1993)
- JACOB, F.; ANDREAE, H. (2013) Medizin für den Wald. Forstliche Bodenschutzkalkungen – Ein bundesdeutscher Überblick. Poster, 1. Deutsches Kalkungssymposium, Dresden 2013
- JACOB, F.; ANDREAE, H. (2017): Bodenschutzkalkungen als Reaktion auf intensive Säureeinträge. Exkursionsführer zur AFSV-Jahrestagung 2017, Sachsenforst, 27-30, <http://www.afsv.de/index.php/afsv-tagungen/exkursionsfuehrer>
- JONARD, M.; ANDRÉ, F.; GIOT, P.; WEISSEN, F.; VAN DER PERRE, R.; PONETTE, Q. (2010): Thirteen-year monitoring of liming and PK fertilization effects on tree vitality in Norway spruce and European beech stands. *European Journal of Forest Research*, 129, 1203-1211 (DOI: 10.1007/s10342-010-0410-3)
- JONARD, M.; FÜRST, A.; VERSTRAETEN, A.; THIMONIER, A.; TIMMERMANN, V.; POTOČIĆ, N.; WALDNER, P.; BENHAM, S.; HANSEN, K.; MERILÄ, P.; PONETTE, Q.; DE LA CRUZ, A.; ROSKAMS, P.; NICOLAS, M.; CROISÉ, L.; INGERSLEV, M.; MATTEUCCI, G.; DECINTI, B.; BASCIETTO, M.; RAUTIO, P. (2014): Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*, 1-13 (DOI: 10.1111/gcb.12657)
- KAHLE, H. P. (2012): Signifikanz dynamischer Interaktionen zwischen dem jährlichen Radial- und Höhenzuwachs und jährlichen Nadelspiegelwerten von Kiefern unter dem Einfluss von Klima und Witterung. Beiträge zur Jahrestagung 2012. DVFFA-Sektion Ertragskunde, 53-62
- KEUFFEL-TÜRK, A.; JANKOWSKI, A.; SCHELER, B.; RADEMACHER, P.; MEESENBERG, H. (2012): Stoffeinträge durch Deposition. In: HÖPER, H.; MEESENBERG, H. (Hrsg.): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. *Geoberichte*, 23, 19-37.
- KHANNA, P. K.; PRENZEL, J.; MEIWES, K. J.; ULRICH, B.; MATZNER, E. (1987): Dynamics of sulfate retention by acid forest soils in an acidic deposition environment. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 51, 446-452
- KHANNA, P. K.; FORTMANN, H.; MEESENBERG, H.; EICHHORN, J.; MEIWES, K. J. (2009): Biomass and Element Content of Foliage and Aboveground Litterfall on the Three Long-Term Experimental Beech Sites: Dynamics and Significance. In: BRUMME, R.; KHANNA, P. K. (Hrsg.): *Functioning and Management of European Beech Ecosystems. Ecological Studies*, 208, 183-205 (DOI: 10.1007/978-3-642-00340-0_11)
- KIMMINS, J. P. (1987): *Forest ecology*. New York: Macmillan, 531 S.
- KLINCK, U.; RADEMACHER, P.; SCHELER, B.; WAGNER, M.; FLECK, S.; AHRENDTS, B.; MEESENBERG, H. (2012): Ökosystembilanzen auf forstwirtschaftlich genutzten Flächen. In: HÖPER, H.; MEESENBERG, H. (Hrsg.): *Tagungsband 20 Jahre Dauerbeobachtung in Niedersachsen. GeoBerichte*, 23, 163-174

- KLINCK, U.; AHREND, B.; MEESENBERG, H.; TALKNER, U. (2014): Bodenvorrat, Nährstoffezugsindex, Stoffbilanz, Spiegelwert von Ca, K, Mg. Vergleich verschiedener Indikatoren bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit der Waldnutzung. Vortrag Forstwiss.-Tagung, Vortragsreihe I, Böden und Nährstoffe, Tharandt u. Dresden
- KNABE, W. (1981): Immissionsökologische Waldzustandserhebung in Nordrhein-Westfalen. Analysen. AFZ, 36, 641-643
- KNABE, W. (1984): Merkblatt zur Entnahme von Blatt- und Nadelproben für chemische Analysen. AFZ, 39, 847-848
- KÖLLING, C. (1991): Stickstoffsättigung von Waldökosystemen. AFZ, 10, 513-517
- KÖLLING, C. (1999): Ordination von Waldökosystemen nach Stoffkonzentrationen der Lösungsphase und bodenchemischen Tiefengradienten. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 162, 1, 89-95
- KÖLLING, C. (2005): Gesunder Boden – gesunder Wald. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.)
- KÖLLING, C. (2010): Macht sauer wirklich lustig? LWF aktuell, 78, 21-24
- KÖLLING, C., FALK, W. (2010): Heute reichlich, morgen knapp: Wasser im Wald. LWF aktuell, 78, 15-17
- KÖLLING C.; HOFFMANN, M.; GULDER, H. J. (1996): Bodenchemische Vertikalgradienten als charakteristische Zustandsgrößen von Waldökosystemen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 159, 69-77
- KÖLLING, C.; KÖNIG, N.; EVERS, J. (2010a): Trockenrohdichte und Feinbodenvorrat als Eingangsparameter zur C-Vorratsberechnung – Grenzlinienartefakt und Soufflé-Effekt. Vortrag. In: BMELV 2010: Ergebnisniederschrift über die BZE-Sitzung am 14./15.04.2010 in Braunschweig, Anlage 4
- KÖLLING, C.; BLUM, U.; DIETZ, E.; FALK, W.; SCHUBERT, A.; STETTER, U. (2010b): Daten für den Bodenschutz. LWF aktuell, 78, 4-6
- KÖNIG, N.; FORTMANN, H. (1996): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltsanalytik-Labor der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt und des Zentrallabors II des Forschungszentrums Waldökosysteme. Teile 1 bis 3. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe B, Bd. 46 bis 49
- KÖNIG, N.; FORTMANN, H. (1999): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltsanalytik-Labors der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, 1. Ergänzung: 1996-1998, Teile 1 bis 3. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe B, Bd. 58 bis 60
- KÖNIG, N.; FORTMANN, H. (2012): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltsanalytik-Labors der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. 3. Ergänzung: 1999-2011. - Teile 1 und 2. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 79 und 80
- KÖNIG, N.; WOLFF, B. (1993): Abschlußbericht über die Ergebnisse und Konsequenzen der im Rahmen der BZE durchgeführten Ringanalysen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 33
- KÖNIG, N.; FORTMANN, H.; LÜTER, K.-L. (2009): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltsanalytik-Labors der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. 2. Ergänzung: 1999-2008. Teile 1 bis 4. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 75 bis 78
- KÖNIG, N., SCHÖNFELDER, E.; BLUM, U. (2014): Auswertung der Standardmessungen und der Ringversuche im Rahmen der BZE II. BMELV (Hrsg.)
- KOHLPAINTNER, M.; HUBER, C.; GÖTTLEIN, A. (2012): Improving the precision of estimating nitrate (NO₃) concentration in seepage water of forests by prestratification with soil samples. *European Journal of Forest Research*, 131, 5, 1399-1409

- KORHONEN, J. F. J.; PIHLATIE, M.; PUMPANEN, J.; AALTONEN, H.; HARI, P.; LEVULA, J.; KIELOAHO, A.-J.; NIKINMAA, E.; VESALA, T.; ILVESNIEMI, H. (2013): Nitrogen balance of a boreal Scots pine forest. *Biogeosciences*, 10, 1083-1095
- KRAVCHENKO, A. N.; ROBERTSON, G. P. (2011): Whole-profile soil carbon stocks: the danger of assuming too much from analyses of too little. *SSSAJ*, 75, 1, 235-240
- KREUTZER, K. (1972): Über den Einfluss der Streunutzung auf den Stickstoff-Haushalt von Kiefernbeständen. *Forstw. Cbl.*, 91, 263-270
- KREUTZER, K. (1993): Changes in the Role of Nitrogen in Central European Forests. In: HÜTTL, R. F.; MÜLLER-DOMBOIS, G. (Hrsg.): *Forest decline in the Atlantic and Pacific Region*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 82-96
- KRZAK, J. (1981): A model of forest nitrogen cycling to assess the effects of management intensity on longterm productivity in Douglas fir forests of the Pacific Northwest. Ph. D. Thesis, Oregon State University, Corvallis, OR, 232 S.
- KULHAVÝ, J.; MARKOVÁ, I.; DRÁPELOVÁ, I.; TRUPAROVÁ, S. (2009): The effect of liming on the mineral nutrition of the mountain Norway spruce (*Picea abies* L.). *Journal of Forest Science*, 55, 1-8
- LAMMERSDORF, N. P.; BEIER, C.; BLANCK, K.; BREDEMEIER, M.; CUMMINS, T.; FARRELL, E. P.; KREUTZER, K.; RASMUSSEN, L.; RYAN, M.; WEIS, W.; XU, Y.-J. (1998): Effect of drought experiments using roof installations on acidification / nitrification of soils. *Forest Ecology and Management*, 101, 95-109
- LAUBHANN, D.; STERBA, H.; REINDS, G. J.; DE VRIES, W. (2009): The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model. *Forest Ecology and Management*, 258, 1751-1761 (DOI: 10.1016/j.foreco.2008.09.050)
- LEBERT, M.; BRUNOTTE, J.; SOMMER, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Forschungsbericht 20071245 UBA-FB 000706, Umweltbundesamt Texte 46-04
- LEYER, I.; WESCHE, K. (2007): *Multivariate Statistik in der Ökologie*. – Berlin, Heidelberg, New York. 221 S.
- LÜKEWILLE, A (1995): Rekonstruktion der Boden- und Gewässerversauerung in der Langen Bramke (Harz). Modellierung der Sulfat-Dynamik mit MAGIC (Absorption) und dem LB-Modell (Ausfällung). In: Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK): *Bayreuther Forum Ökologie*, Selbstverlag, 21, 1-189
- LUYSSAERT, S.; CIAIS, P.; PIAO, S.; SCHULZE, E.-D.; JUNG, M.; ZAEHLE, S.; SCHELHAAS, M. J.; REICHSSTEIN, M.; CHURKINA, G.; PAPALE, D.; ABRIL, G.; BEER, C.; GRACE, J.; LOUSTAU, D.; MATTEUCCI, G.; MAGNANI, F.; NABUURS, G. J.; VERBEECK, H.; SULKAVA, M.; VAN DER WERF, G. R.; JANSSENS, I. A. and members of the CARBOEUROPE-IP SYNTHESIS TEAM (2010): The European carbon balance. Part 3: forests. *Global Change Biology*, 16; 1429-1450 (DOI:10.1111/j.1365-2486.2009.02056.x) (Zugriff am 16.11.2018)
- MARSCHNER, H. (1986): *The mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London (u. a.), 674 S.
- MARSCHNER, H. (1995): *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd edn. Academic Press, London (u. a.), 889 S.
- MATZNER, E. (1988): *Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling*. Göttingen: Bericht des Forschungszentrums Waldökosysteme der Georg-August-Universität. Vol. A, 40, 217 S.
- MEESBURG, H.; KLINCK, U.; SCHELER, B.; AHRENDTS, B. (2015): Schutz vor luftgetragenen Bodenbelastungen. In: FRÜND, H.-C.; BEUKER, R. H. (Hrsg), *Fakultät Agrarwissenschaften Landschaftsarchitektur Osnabrück: Bodenschutz im Wald, Beiträge Forum Boden-Gewässer-Altlasten*. Heft 15, 21-35
- MEESBURG, H.; AHRENDTS, B.; FLECK, S.; WAGNER M.; FORTMANN, H.; SCHELER, B.; KLINCK, U.; DAMMANN, I.; EICHHORN, J.; MINDRUP, M.; MEIWES, K.J. (2016): Long-term changes of ecosystem services at Solling, Germany: Recovery from acidification, but increasing nitrogen saturation? *Ecological Indicators*, 65, 103-112

- MEINING, S.; VON WILPERT, K.; SCHÄFFER, J.; HARTMANN, P.; SCHUMACHER, J.; DELB, H.; JOHN, R.; HUG, R.; HÖLSCHER, A.; AUGUSTIN, N. (2013): Waldzustandsbericht 2013. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.), 63 S.
- MEIWES, K. J. (1995): Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water, Air and Soil Pollution* 85, 143-152
- MEIWES, K. J.; KHANNA, P. K.; ULRICH, B. (1980): Retention of sulphate by an acid brown earth and its relationship with the atmospheric impact of sulphur to forest vegetation. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 143, 402-411
- MEIWES, K. J.; KÖNIG, N.; KHANNA, P. K.; PRENZEL, J.; ULRICH, B. (1984): Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben*, Göttingen, Bd. 7
- MELLERT, K. H.; GÖTTLEIN, A. (2012): Comparison of new foliar nutrient thresholds derived from van den Burg's literature compilation with established central European references. *European Journal of Forest Research*, 131, 1461-1472 (DOI: 10.1007/s10342-012-0615-8)
- MELLERT, K. H.; KÖLLING, C. (2006): Stickstoffsättigung – ein wachsendes Problem ohne Lösung? *Forst und Holz*, 61, 95-98
- MELLERT, K. H.; PRIETZEL, J.; STRAUSSBERGER, R.; REHFUSS, K. E. (2004): Long-term nutritional trends of conifer stands in Europe: results from the RECOGNITION project. *European Journal of Forest Research*, 123, 305-319 (DOI: 10.1007/s10342-004-0044-4)
- MELLERT, K. H.; BRENDDEL, J.; GÖTTLEIN, A.; KÖLLING, C.; RÜCKER, G. (2005): Risiko erhöhter Nitratkonzentrationen unter Wäldern im Raum München – Regionalisierung auf der Basis von Satellitendaten und genetester Stichproben. *Waldökologie online*, 2, 25-35
- MEYER, F. H. (1984): Mykologische Beobachtungen zum Baumsterben. *AFZ*, 39, 212-228
- MEYER, F. H. (1985): Einfluss des Stickstoff-Faktors auf den Mykorrhizabesatz von Fichtensämlingen im Humus einer Waldschadensfläche. *AFZ*, 40, 208-219
- MINDRUP, M. (2001): Das Lösungs- und Neutralisationsverhalten von dolomitischen Kalken in sauren Waldböden. Dissertation an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie an der Georg-August-Universität zu Göttingen, 297 S.
- ML (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2013): Langfristige, ökologische Waldentwicklung in den Niedersächsischen Landesforsten (LÖWE-Erlass). Nds. MBL Nr. 9, S. 214, 13 S.
- ML (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2014): Der Wald in Niedersachsen. Ergebnisse der Bundeswaldinventur 3. 56 S.
- MOHREN, G. M. J.; VAN DEN BURG, J.; BURGER, W. (1986): Phosphorus deficiency induced by nitrogen input in Douglas fir in the Netherlands. *Plant and Soil*, 95, 191-200
- MURRAY, C. A.; WHITFIELD, C. J.; WATMOUGH, S. A. (2017): Uncertainty-based terrestrial critical loads of nutrient nitrogen in northern Saskatchewan, Canada. *Boreal Env. Res.*, 22, 231-244
- NÄTSCHER, L.; SCHWERTMANN, U. (1991): Proton buffering in organic horizons of acid forest soils. *Geoderma*, 48, Iss. 1-2, 93-106
- NAGEL, H.-D.; BECKER, R.; EITNER, H.; HÜBENER, P.; KUNZE, F.; SCHLUTOW, A.; SCHÜTZE, G.; WEIGELT-KIRCHNER, G. (2004): Critical Loads für Säure und eutrophierenden Stickstoff. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Luftreinhaltung, Förderkennzeichen 200 85 212. Umweltbundesamt Dessau, 51 S.
- NAGEL, R.-V.; RUMPF, H.; MEIWES, K. J.; KLINCK, U.; SPELLMANN, H. (2014): Hiebsformen zum Umbau älterer Fichtenreinbestände. *AFZ/Der Wald*, 69. Jg., 10, 22-26
- NFP (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT) (2007): Forstliche Standortaufnahme. Geländeökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: Mittelgebirge, Bergland und Hügelland. 11 S. <http://www.landesforsten.de/Publikationen.1291.0.html>

- NFP; LLUR (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT; LANDESAMT F. LANDWIRTSCHAFT, UMWELT U. LÄNDLICHE RÄUME SCHLESWIG-HOLSTEIN) (2009a): Forstliche Standortaufnahme. Geländeökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: pleistozänes (diluviales) Tiefland. 14 S. <http://www.landesforsten.de/Publikationen.1291.0.html>
- NFP; LLUR (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT; LANDESAMT F. LANDWIRTSCHAFT, UMWELT U. LÄNDLICHE RÄUME SCHLESWIG-HOLSTEIN) (2009b): Forstliche Standortaufnahme. Geländeökologischer Schätzrahmen – Varianten. Anwendungsbereich: Mittelgebirge, Berg- und Hügelland. 5 S. <http://www.landesforsten.de/Publikationen.1291.0.html>
- NIEMINEN, T. M.; DE VOS, B.; COOLS, N.; KÖNIG, N.; FISCHER, R.; IOST, S.; MEESENBERG, H.; NICOLAS, M.; O'DEA, P.; CECCHINI, G.; FERRETTI, M.; DE LA CRUZ, A.; DEROME, K.; LINDROOS, A. J.; GRAF PANNATIER, E. (2016): Soil Solution Collection and Analysis. Manual Part XI. . In: Centre, UNECE ICP Forests Programme Coordinating: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems. Eberswalde, Germany. ISBN: 978-3-86576-162-0. 29 S., <http://www.icp-forests.org/Manual.htm>
- NIHLGÅRD, B. (1985): The ammonium hypothesis – An additional explanation to the forest dieback in Europe. *AMBIO* 14, 2-8
- NILSSON, L. O.; WALLANDER, H. (2003): Production of external mycelium by ectomycorrhizal fungi in a Norway spruce forest was reduced in response to nitrogen fertilization. *New Phytologist*, 158, 409-416
- NLF (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN, Hrsg.) (2016): 25 Jahre ökologische Waldentwicklung in den Niedersächsischen Landesforsten. Aus dem Wald – Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen, Heft 60, 88 S.
- NLF (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN, Hrsg.) (2018): Das IÖWE-Programm. 25 Jahre langfristige ökologische Waldentwicklung. <https://www.landesforsten.de/wir/loewe> (Zugriff am 12.11.2018)
- NLR (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESREGIERUNG, Hrsg.) (1991): Niedersächsisches Programm zur langfristigen ökologischen Waldentwicklung in den Landesforsten., Hannover. 49 S.
- NMUEBK (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ) (2018a): Künftige Klimaentwicklungen. <https://www.umwelt.niedersachsen.de/umweltbericht/klima/kuenftigeKlimaentwicklungen/kuenftige-klimaentwicklungen-88592.html> (Zugriff am: 27.02.2018)
- NMUEBK (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ) (2018b): Nitrat im Grundwasser. <https://www.umwelt.niedersachsen.de/umweltbericht/wasser/nitrat/nitrat-88735.html> (Zugriff am 17.04.2018)
- NW-FVA (NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT, Hrsg.) (2010): Merkblatt Bodenschutzkalkungen in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Göttingen, 27 S., https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Publikationen/Merkblaetter/Merkblatt_Bodenschutzkalkungen_und_Anlagen_11_2010.pdf
- OTTO, H.-J. (1972): Die Ergebnisse der Standortkartierung im pleistozänen Flachland Niedersachsens – Grundlage waldbaulicher Leitvorstellungen. Aus dem Walde, 19, 191 S.
- PAAR, U. (1994): Untersuchungen zum Einfluss von Ammonium und Nitrat auf wurzelphysiologische Reaktionsmuster der Buche. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 115, 124 S.
- PAAR, U.; GUCKLAND, A.; DAMMANN, I.; ALBRECHT, M.; EICHHORN, J. (2011): Häufigkeit und Intensität der Fruktifikation der Buche. *AFZ-Der Wald*, 6, 26-29
- PAAR, U.; EVERS, J.; DAMMANN, I.; KÖNIG, N.; SCHULZE, A.; SCHMIDT, M.; SCHÖNFELDER, E.; SCHELER, B.; EICHHORN, J. (2016): Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der NW-FVA, Bd. 15, 458 S.

- PALVIAINEN, M.; PUMPANEN, J.; BERNINGER, F.; RITALA, K.; DUAN, B.; HEINONSALO, J.; SUN, H.; KÖSTER, E.; KÖSTER, K. (2017): Nitrogen balance along a northern boreal forest fire chronosequence. *PLoS ONE*, 12, 3, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174720> (Zugriff am 16.11.2018)
- PARK, S.-U.; SHIM, J. M. (2001): Estimation of Critical Loads of Sulfur and Nitrogen for the Korean Ecosystem. *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.*, 10, 2, 121-129
- PEÑUELAS, J.; POULTER, B.; SARDANS, J.; CIAIS, P.; VAN DER VELDE, M.; BOPP, L.; BOUCHER, O.; GODDERIS, Y.; HINSINGER, P.; LLUSIA, J.; NARDIN, E.; VICCA, S.; OBERSTEINER, M.; JANSSENS, I. A. (2013): Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe. *Nature Communications*, 4, 2934, 1-10 (DOI: 10.1038/ncomms3934)
- PEUKE, A. D.; RENNENBERG, H. (2004): Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulphur concentration and partitioning in beech ecotypes (*Fagus sylvatica* L.): phosphorus most affected by drought. *Trees*, 18, 639-648 (DOI: 10.1007/s00468-004-0335-x)
- PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. (2000): *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer-Verlag, New York, 528 S.
- PRENZEL, J. (1982): Ein bodenchemisches Gleichgewichtsmodell mit Kationenaustausch und Aluminiumhydroxosulfat. *Gött. Bodenk. Ber.* 72, 1-113
- PRIETZEL, J.; KÖLLING, C. (1999): Ein einfaches Routineverfahren zur Beurteilung des Remobilisierungspotenzials von Waldböden für Sulfat-Schwefel aus atmosphärischen Einträgen. *Forstw. Cbl.*, 118, 329-344
- PRIETZEL, J.; REHFUESS, K. E.; STETTER, U.; PRETZSCH, H. (2008): Changes of soil chemistry, stand nutrition, and stand growth at two Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sites in Central Europe during 40 years after fertilization, liming, and lupine introduction. *European Journal of Forest Research*, 127, 43-61 (DOI 10-1007/s10342-007-0181-7)
- PUHLMANN, H.; AHRENDTS, B.; KÖHLER, D.; WEIS, W. (2018): Keine Zuwachsverluste im Stammholz riskieren. Energieholznutzung von Schwachholz und Kronenmaterial erhöht das Risiko unzureichender Nährstoffversorgung. *Holz-Zentralblatt*, 38, 880-882
- RASPE, S.; GÖTTLEIN, A. (2008): Nährstoffbilanzen von Fichtenökosystemen. *Forst u. Holz*, 7/8, 60-65
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2009): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. <http://R-project.org>
- REEMTSMA, J. B. (1964): Untersuchungen an Fichte und anderen Nadelbaumarten über den Nährstoffgehalt der lebenden Nadeljahrgänge und der Streu. Diss. Univ. Göttingen, 139 S.
- REEMTSMA, J. B. (1986): Der Magnesium-Gehalt von Nadeln niedersächsischer Fichtenbestände und seine Beurteilung. *AFJZ*, 10, 196-200
- REUSS, J. O. (1983): Implications of the Calcium-Aluminium Exchange System for the Effect of Acid Precipitation on soils. *J. Environ. Qual.*, Vol. 12, No. 4, 591-595
- REUSS, J. O.; JOHNSON, D. W. (1985): Effect of Soil Processes on the Acidification of Water by Acid Deposition. *J. Environ. Qual.*, Vol 14, No. 1, 26-31
- REUSS, J. O.; JOHNSON, D. W. (1986): *Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters*. Ecological Studies, 59, Springer, 199 S.
- RIEK, W.; DIETRICH, H.-P. (2000): Ernährungszustand der Hauptbaumarten an den deutschen Level II-Standorten. *Forstarchiv*, 71, 65-69
- RIEK, W.; WOLFF, B. (2007): Bodenkundliche Indikatoren für die Auswertung der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Reihe B*, Bd. 74, Selbstverlag, Göttingen
- RIEK, W.; RUSS, A.; KÜHN, D. (2015): *Waldbodenbericht Brandenburg*. Bd. 1, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd 50, 170 S.

- RIEK, W.; TALKNER, U.; DAMMANN, I.; KOHLER, M.; MEIWES, K. J.; GÖTTLEIN, A. (2016): Waldernährung. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H. (Hrsg.): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report, 43, 245-291 (DOI: 10.3220/REP1473930232000)
- RIHM, B.; ACHERMANN, B. (2016): Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Environmental studies, Federal Office for the Environment, Bern. 78 S.
- ROTHER, A.; HUBER, C.; KREUTZER, K.; WEIS, W. (2002): Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European beech: Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies. *Plant and Soil*, 240, 33-45
- RUMPF, S.; KHANNA, P. K.; BAUHAUS, J.; MEIWES, K. J.; KOHLER, M.; SCHÖNFELDER, E. (2008): Phosphor-Versorgung – Zustand und Tendenzen sowie ihre Bedeutung für die Energieholznutzung. *Energieholz und Nachhaltigkeit*, Teil 3: Waldernährung. *Forst und Holz*, 63, 37-40
- RUSS, A.; RIEK, W.; MARTIN, J. (2011): Zustand und Wandel der Waldböden Mecklenburg-Vorpommerns. Mitteilungen aus dem Forstlichen Versuchswesen Mecklenburg-Vorpommern, 9, 108 S.
- SCHAAP, M.; WICHINK KRUIT, R. J.; HENDRIKS, C.; KRANENBURG, R.; SEGERS, A.; BULTJES, P.; BANZHAF, S.; SCHEUSCHNER T. (2015): Atmospheric deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009. Project No. (FKZ) 3712 63 240-1, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. 82 S.
- SCHAAP, M.; HENDRIKS, C.; KRANENBURG, R.; KUENEN, J.; SEGERS, A.; SCHLUTOW, A.; NAGEL, H.-D.; RITTER, A.; BANZHAF, S. (2018): PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland. Texte Umweltbundesamt, 79, 149
- SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, P.; BRÜMMER, G. W.; HARTGE, K. H.; SCHWERTMANN, U. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 494 S.
- SCHELER, B. (2017): Stoffeinträge. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2017 für Niedersachsen, 28-30
- SCHMIDT, W. (2006): Zeitliche Veränderung der Fruktifikation bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in einem Kalkbuchenwald (1981-2004). *AFJZ*, 177, 9-19
- SCHMIDT, W.; STÜBER, V.; ULLRICH, T.; PAAR, U.; EVERS, J.; DAMMANN, K.; HÖVELMANN, T.; SCHMIDT, M. (2015): Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer. Beiträge aus der NW-FVA, Bd. 12, 136 S.
- SCHMIDT-WALTER, P.; AHRENDTS, B.; MEESENBERG, H. (2016): Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2016 für Niedersachsen. 20-22
- SCHRUMPF, M.; SCHULZE, E. D.; KAISER, K.; SCHUMACHER, J. (2011): How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories. *Biogeosciences*, 8, 1193-1212
- SCHUBERT, A.; FALK, W.; STETTER, U. (2015): Waldböden in Bayern. Ergebnisse der BZE II. Forstliche Forschungsberichte München, 213, 144 S.
- SCHULZE, A. (2012): Strukturierung und Integration der Bodenzustandserhebungen I und II für Niedersachsen, Bremen, Sachsen-Anhalt, Hessen und Schleswig-Holstein (internes Dokument, unveröffentlicht)
- SCHULZE, A.; EVERS, J. (2013): Konzeption und Realisierung einer übergreifenden Datenorganisation für die Bodenzustandserhebung. *AFZ-DerWald*, 14, 21-24
- SCHULZE, E.-D.; DE VRIES, W.; HAUHS, H.; ROSÉN, K.; RASMUSSEN, L.; TAMM, C.-O.; NIELSSON, J. (1989): Critical loads for nitrogen deposition on forest ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution*, 48, 451-456
- SCHULZE, E.-D.; BECK, E.; MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (2002): Pflanzenökologie. Spektrum Akademischer Verlag, 846 S.

- SOLBERG, S.; DOBBERTIN, M.; REINDS, G. J.; LANGE, H.; ANDREASSEN, K.; FERNANDEZ, P. G.; HILDINGSSON, A.; DE VRIES, W. (2009): Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *Forest Ecology and Management*, 258, 1735-1750 (DOI: 10.1016/j.foreco.2008.09.057)
- SRU (SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN) (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sondergutachten. Berlin, 564 S.
- STRELETZKI, H.-W. (1987): Überprüfung der Waldschadensentwicklung 1987 durch Unterstichproben. *Forst- und Holzwirt*, 42, 317-318
- STUBER, M.; BÜRGI, M. (2011): Hüeterbueb und Heitsträhl. Traditionelle Formen der Waldnutzung in der Schweiz 1800 bis 2000. Haupt-Verlag, Bern, 302 S.
- SÜSSER, P.; SCHWERTMANN, U. (1991): Proton buffering in mineral horizons of some acid forest soils. *Geoderma*, 49, Iss. 1-2, 63-76
- SUTMÖLLER, J. (2017): Witterung und Klima. In: NÖRDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2017 für Niedersachsen, 17-20
- TALKNER, U.; MEIWES, K. J.; ANDREAE, H.; DAMMANN, I.; DIETRICH, H. P.; GENSSLER, L.; KALLWEIT, R.; SCHIMMING, C.; SCHRÖCK, H. W.; SEIDLING, W.; VON WILPERT, K. (2011): Raum-zeitliche Variabilität der Elementgehalte in Blättern und Nadeln auf Intensiv-Monitoringflächen in Deutschland. Vortrag. Tagung der Sektion Waldernährung im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA), 4.-6. Mai 2011 in Bamberg
- TALKNER, U.; MEIWES, K. J.; POTOČIĆ, N.; SLETKOVIĆ, I.; COOLS, N.; DE VOS, B.; RAUTIO, P. (2015): Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.) is decreasing in Europe. *Annals of Forest Science* (DOI: 10.1007/s13595-015-0459-8)
- TAMM, C. O. (1991): Nitrogen in terrestrial ecosystems. Questions of productivity, vegetational changes and ecosystems stability. *Ecological Studies*, 81, Berlin, Springer Verlag, 116 S.
- TRIPLER, C. E.; KAUSHAL, S. S.; LIKENS, G. E.; TODD WALTER, M. (2006): Patterns in potassium dynamics in forest ecosystems. *Ecology Letters*, 9 (4), 451-466
- UBA (2014): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2014. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2012. Umweltbundesamt Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-the-united-nations-framework> (Zugriff am 16.11.2018)
- ULRICH, B. (1966): Kationenaustausch-Gleichgewichte in Böden. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 113, 141-159
- ULRICH, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 144, 289-305
- ULRICH, B. (1982): Gefahr für das Waldökosystem durch Saure Niederschläge. In: Immissionsbelastung von Waldökosystemen. Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen. 9-23
- ULRICH, B. (1983): Stabilität von Waldökosystemen unter dem Einfluss des „sauren Regens“. *AFZ*, 38, 26/27, 670-676
- ULRICH, B. (1986): Natural and anthropogenic components of soil acidification. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 149, 6, 702-717
- ULRICH, B. (1994): Nutrient and acid-base budget of central European forest ecosystems. In: DOUGLAS, L.; GODBOLD, D. L.; HÜTTERMANN, A. (Hrsg.): *Effects of Acid Rain on Forest Processes*, Wiley Liss. New York, 1-50
- ULRICH, B.; MAYER, R.; KHANNA, P. K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. *Schr. Forstl. Fakultät Univ. Göttingen*, 58, 291 S.
- ULRICH, B.; MEIWES, K. J.; KÖNIG, N.; KHANNA, P. K. (1984): Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldböden. *Der Forst- und Holzwirt*, 39, 278-286
- UNECE (UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE) (1979): *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)*. Geneva

- VAN MIEGROET, H.; COLE, D. W.; FOSTER, N. W. (1992): Nitrogen distribution and cycling. In: JOHNSON, W.; LINDBERG, S. E. (Hrsg.) Atmospheric deposition and forest nutrient cycling – A synthesis of the integrated forest study. Springer Verlag, Heidelberg, 178-195
- VITOUSEK, P. M.; ABER, J. D.; HOWARTH, R. W.; LIKENS, G. E.; MATSON, P. A.; SCHINDLER, D. W.; SCHLESINGER, W. H.; TILMAN, G. D (1997): Human alteration of the global nitrogen cycle: Causes and consequences. *Ecological Applications*, 7, 737-750
- VON DER HEIDE, C.; BÖTTCHER, J.; DEURER, M.; WEYMANN, D.; WELL, R.; DUIJNISVELD, W. H. M. (2008): Spatial variability of N₂O concentrations and of denitrification-related factors in the surficial groundwater of a catchment in Northern Germany. *J. Hydrol.*, 360, 230-241
- VON WILPERT, K. (2003): Drift des Stoffhaushalts im Fichten-Düngeversuch Pfalzgrafenweiler. *AFJZ*, 174, 21-30
- VON WILPERT, K.; HARTMANN, P.; PUHLMANN, H.; SCHMIDT-WALTER, P.; MEESENBERG, H.; MÜLLER, J.; EVERS, J. (2016): Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H.: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Thünen Report, 43, 343-386
- VON WILPERT, K.; AHRENDTS, B.; WEIS, W.; VONDERACH, C.; PUHLMANN, H.; KÖHLER, D.; SÜCKER, C.; KÄNDLER, G.; NAGEL, J. (2018): Standortangepasste Nutzungsintensitäten und forstliche Handlungsoptionen. In: Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit. Abschlussbericht zum Projekt „Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland“ (EnNa). Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, 101, 325-373
- WALDNER, P.; THIMONIER, A.; GRAF PANNATIER, E.; ETZOLD, S.; SCHMITT, M.; MARCHETTO, A.; RAUTIO, P.; DEROME, K.; NIEMINEN, T.M.; NEVALAINEN, S.; LINDROOS, A.-J.; MERILÄ, P.; KINDERMANN, G.; NEUMANN, M.; COOLS, N.; DE VOS, B.; ROSKAMS, P.; VERSTRAETEN, A.; HANSEN, K.; PIHL KARLSSON, G.; DIETRICH, H.P.; RASPE, S.; GRANKE, O.; FISCHER, R.; IOST, S.; LORENZ, M.; SANDERS, T.G.M.; MICHEL, A.; NAGEL, H.-D.; SCHEUSCHNER, T.; SIMONČIČ, P.; VON WILPERT, K.; MEESENBERG, H.; FLECK, S.; INGERSLEV, M.; GUNDERSEN, P.; STUPAK, I.; VESTERDAL, L.; JONARD, M.; NICHOLAS, M.; CLARKE, N.; BENHAM, S.; VANGUELOVA, E.; POTOČIĆ, N.; MINAYA, M. (2015): Exceedance of critical loads and of critical limits impacts tree nutrition across Europe. *Annals of Forest Science*, 72, 929-939 (DOI: 10.1007/s13595-015-0489-2)
- WALDROP M. P.; ZAK, D. R.; SINSABAUGH, R. L. (2004): Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 1443-1451
- WEHRMANN, J. (1959): Methodische Untersuchungen zur Durchführung von Nadelanalysen in Kiefernbeständen. *Forstw. Cbl.*, 78, 77-97
- WEIS, W.; GRUBER, A.; HUBER, C.; GÖTTLEIN, A. (2009): Element concentrations and storage in the aboveground biomass of limed and unlimed Norway spruce trees at Höglwald. *European Journal of Forest Research*, 128, 437-445 (DOI: 10.1007/s10342-009-0291-5)
- WELLBROCK, N.; AYDIN, C.-T.; BLOCK, J.; BUSSIAN, B.; DECKERT, M.; DIEKMANN, O.; EVERS, J.; FETZER, K. D.; GAUER, J.; GEHRMANN, J.; KÖLLING, C.; KÖNIG, N.; LIESEBACH, M.; MARTIN, J.; MEIWES, K. J.; MILBERT, G.; RABEN, G.; RIEK, W.; SCHÄFFER, W.; SCHWERHOFF, J.; ULLRICH, T.; UTERMANN, J.; VOLZ, H.-A.; WEIGEL, A.; WOLFF, B. (2006): Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II), Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. BMELV (Hrsg.), Berlin, 413 S.
- WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H. (Hrsg.) (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Thünen Report, 43, Braunschweig, 495 S. und Anhang
- WOLFF, B.; RIEK, W. (1997): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987-1993 (BZE). BML (Hrsg.), Bonn, 141 S.
- YANAI, R. D. (1992): Phosphorus budget of a 70-year-old northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 17, 1-22

Glossar und Abkürzungen

AAS	Atomabsorptionsspektroskopie mit Flammentechnik
AAS-G	Atomabsorptionsspektroskopie mit Graphitrohrtechnik
Ake	effektive Austauschkapazität
Akt	potentielle totale Austauschkapazität
Al	Aluminium
anthropogen	durch menschliche Aktivitäten verursacht
atmogen	atmosphärisch erzeugt
äolisch	durch Wind verursacht, luftbütig
Austauschkapazität (AK)	Summe der austauschbaren Ionen in mmol _c /kg; abhängig vom pH-Wert
Azidität	Säuregehalt einer Lösung
Basensättigung	Anteil der basisch wirkenden Kationen an der Kationenaustauschkapazität
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BDF	Bodendauerbeobachtungsflächen
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
Biozid	Mittel zur Bekämpfung von Schadorganismen
Bodenart	Zusammensetzung des Bodens bezüglich der Hauptbodenarten, die ihrerseits auf der Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Bodensubstanz beruhen
Bodentyp	Zusammenfassung von Böden mit gleicher Abfolge der Bodenhorizonte
Bulk-Deposition	Niederschlagsdeposition, mit ständig offenen Sammlern erfasst
BZE	Bodenzustandserhebung
C	Kohlenstoff
C/N	Kohlenstoff-/Stickstoff-Verhältnis
Ca	Calcium
CaCl ₂	Calciumchlorid
Cd	Cadmium
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₃ ²⁻	Carbonat-Ion
Critical Load	Kritische Last; Belastungsgrenzwert für (Schad)stoffe
Cu	Kupfer
Cv	Variationskoeffizient

DA	Druckaufschluss mit Salpetersäure
DA-PCI	Druckaufschluss mit Salpetersäure und Perchlorsäure
Deposition	Niederschlag oder Ablagerung von Stoffen aus der Luft auf Oberflächen bzw. die Erdoberfläche
Derbholz	Baumstamm und Äste über 7 cm Durchmesser
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECE	Economic Commission for Europe
EKI	Ertragsklasse
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme der ECE
eutroph	gut nährstoffversorgt
Eutrophierung	Eintrag, ggf. Anreicherung von Nährstoffen in ein System
Fb (Feinboden)	Boden nur mit Körnern kleiner 2 mm Äquivalentdurchmesser
Fe	Eisen
FFG	Forsthydrologische Forschungsgebiete
Fulvosäuren	organische Säuren, die beim Abbau pflanzlichen Materials entstehen
GA	Gesamtaufschluss mit Flusssäure
GAFA	Gutachterausschuss Forstliche Analytik
Georeferenzierung	Zuordnung von geographischen Koordinaten zu raumbasierten Daten
Gt	Gigatonne (Milliarde Tonnen)
H, H ⁺	Wasserstoff, Wasserstoff-Ion (auch Proton)
HFA	Handbuch Forstliche Analytik
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (bis 2015)
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (ab 2016)
Huminsäuren	organische Säuren, die beim Abbau pflanzlichen Materials entstehen
Humusform	typische Abfolge von Horizonten in der organischen Auflage und im mineralischen Oberboden
ICP	International Co-operative Programme
ICP	induktiv gekoppeltes Plasma, oft verwendet als Abkürzung für ICP-OES
ICP-MS	induktiv gekoppelte Plasmaspektroskopie gekoppelt mit einem Massenspektrometer
ICP-OES	"inductively coupled plasma optical emission spectrometry", optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
IPCC	International Panel for Climate Change

IPE	International Plant-analytical Exchange Programme
ISE	International Soil-analytical Exchange Evaluating Programm for Analytical Laboratories
IWE	Immissionsökologische Waldzustandserhebung
K	Kalium
K/Ca-Antagonismus	gegenseitige Hemmung der Aufnahme von Kalium- und Calciumionen
Kalkungskulisse	Standorte, die für eine Waldkalkung vorgesehen sind
kmol	Kilomol = 1000 mol, Stoffmengeneinheit (siehe mol)
kmol _c	Kilomol (charge): Stoffmenge der Ionenäquivalente
LAPIS	Laborproben-Informationssystem
LHL Kassel	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor Kassel
LIMS	Labor Informations und Management System
Ma-Kationen	saure Kationen (Al, Mn, Fe, H)
mesotroph	mittelmäßig nährstoffversorgt
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
mol	Stoffmengeneinheit, 1Mol = 6,022 *10 ²³ Teilchen
N	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffoxid, Lachgas
Na	Natrium
nFK	nutzbare Feldkapazität
Ni	Nickel
NO, NO ₃ ²⁻	Nitrat, Nitrat-Ion
oligotroph	schwach nährstoffversorgt
P	Phosphor
Pb	Blei
Perkolation	Durchfließen einer Lösung durch ein festes Substrat in einer Säule
pH	pH-Wert, Wasserstoffionenkonzentration
pH(CaCl ₂)	pH-Wert, in CaCl ₂ -Lösung gemessen
pH(H ₂ O)	pH-Wert, in H ₂ O gemessen
pH(KCl)	pH-Wert, in KCl-Lösung gemessen
POP	Persistent Organic Pollutant, langlebiger organischer Schadstoff
Pufferbereich	Gliederung der Pufferkapazität des Bodens nach Pufferreaktionen

Pufferung	Fähigkeit eines Systems, einen Kennwert innerhalb gewisser Grenzen trotz Zu- oder Abfuhr konstant zu halten; hier Fähigkeit des Bodens, Änderungen des pH-Werts abzufangen
QM	Qualitätsmanagement
QS	Qualitätssicherung
Relief	Oberflächenform des Geländes
Residuen	Statistik: Abweichung der Einzelwerte von der geschätzten Funktion
Resilienz	Widerstandsfähigkeit, Elastizität; in diesem Zusammenhang: gegen Störungen des Ökosystems, die das System grundlegend verändern
S	Schwefel
Se	Selen
SO ₄ , SO ₄ ²⁻	Sulfat, Sulfat-Ion
Soliflukationsdecke	Fließerde
Stratifizieren	Zerlegung der Grundgesamtheit in Teile, aus denen Teilstichproben gezogen werden
Substrat	Grundmaterial – mineralisch und organisch – des Bodens, inklusive Ausgangsgestein und Verwitterungszustand
Substratgruppe	Zusammenfassung von Böden mit ähnlichen Merkmalen (u. a. Ausgangssubstrat, erdgeschichtliche Einordnung, Lagerungsverhältnisse)
Substratlagerung	Zusammenfassung von Ausgangssubstrat, Aufbau, Körnigkeit, Dichte und Schichtfolge von Böden
Substratzahl	Codierung der Feineinteilung von Waldböden, die aus Substratgruppe, Substrat und Lagerung festgelegt wird
TRD	Trockenrohdichte, Masse des trockenen Bodens je Volumeneinheit in g/cm ³
TRD(Fb)	Trockenrohdichte des Feinbodens in g/cm ³
Trophie	Einstufung der Nährstoffversorgung eines Standortes
TS	Trockensubstanz
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.
Vollbaumnutzung	Nutzung aller oberirdischen Teile eines Baumes
WÖSSH	Waldökosystemstudie Hessen
WZE	Waldzustandserhebung
Zn	Zink
Z-Score	ein statistisches Bewertungsverfahren, hier ein Maß für die Abweichung des Labormittelwertes vom Mittelwert aller Labore in Abhängigkeit von der Streuung unter den Laboren

Danksagung

Der vorliegende BZE II Bericht für Niedersachsen und Bremen konnte nur durch das Engagement und die Arbeit vieler Personen ermöglicht werden. Das Autorenteam dankt allen Kolleginnen und Kollegen, die mit ihrem Einsatz zum Gelingen der BZE II und dieses Bandes beigetragen haben.

Ohne den intensiven und fruchtbaren Gedanken- und Erfahrungsaustausch der Bund/Länder-Arbeitsgruppe zur BZE II stünde die BZE nicht auf diesem soliden fachlichen Fundament.

Unser besonderer Dank gilt Dr. Thomas Heinkele und Niko Martin, Bodenconsult Bremen (Tiefland und Bremen) sowie Wolfgang Hölzer, Klaus Dammann und Thomas Hövelmann (Bergland) für die Durchführung der bodenkundlichen Außenaufnahmen, Thomas Janssen und Heiner Heile für die ertragskundlichen Aufnahmen der Bestände und Dr. Thomas Kompa für die Aufnahme der Bodenvegetation an den BZE II-Punkten sowie den Zapfenpflückern für ihren nicht ungefährlichen Einsatz.

Für die Durchführung der umfangreichen physikalischen und chemischen Analysen der Boden-, Humus- und Pflanzenproben gilt unser besonderer Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Umweltlabors der NW-FVA, des Hessischen Landeslabors und des Labors der BGR.

Allen privaten Waldbesitzern, Vertretern von Körper- und Genossenschaftswald sowie den Landes- und Bundesforsten sei dafür gedankt, dass sie die Außenaufnahmen in ihren Wäldern zugelassen und unterstützt haben.

Nicht zuletzt sei den vielen wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräften für ihren unermüdlichen Einsatz im Rahmen der BZE II gedankt.

Autoren

Inge Dammann

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
inge.dammann@nw-fva.de

Dr. Jan Evers

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
jan.evers@nw-fva.de

Dr. Uwe Paar

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
uwe.paar@nw-fva.de

Dr. Egbert Schönfelder

Normals: Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Waldwachstum
egbert.schoenfelder@gmx.net

Prof. Dr. Johannes Eichhorn

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
johannes.eichhorn@nw-fva.de

Nils König

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
nils.koenig@nw-fva.de

Dr. Marcus Schmidt

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Waldwachstum
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
marcus.schmidt@nw-fva.de

Andreas Schulze

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
andreas.schulze@nw-fva.de

Dr. Volker Stüber

Niedersächsische Landesforsten

Niedersächsisches Forstplanungsamt

Forstweg 1A

D-38302 Wolfenbüttel

volker.stueber@nfp.niedersachsen.de

Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt

Band

- 1 (2007) **Clusterstudie Forst und Holz Niedersachsen.** Burkhard Rüter, Jan Hansen, Agatha Ludwig, Hermann Spellmann, Jürgen Nagel, Bernhard Möhring, Matthias Dieter. 92 S.
- 2 (2008) **Die Waldkiefer – Fachtagung zum Baum des Jahres 2007.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 98 S.
- 3 (2008) **Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 343 S.
- 4 (2008) **Ergebnisse des westdeutschen IUFRO-Küstentannen-Provenienzversuches im Alter 27.** Hans-Martin Rau, Armin König, Wolfhard Ruetz, Hendrik Rumpf, Egbert Schönfelder. 62 S.
- 5 (2010) **Fichtenherkunftsversuch von 1962 und IUFRO-Fichtenherkunftsversuch von 1972. Ergebnisse von mehr als 30-jähriger Beobachtung in Deutschland.** Mirko Liesebach, Hans-Martin Rau, Armin O. König. 467 S.
- 6 (2011) **Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen.** René Würdehoff, Hermann Spellmann, Jan Evers, Jürgen Nagel. 92 S.
- 7 (2012) **Das digitale Luftbild. Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich.** Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (Hrsg.). 84 S.
- 8 (2012) **Züchtung und Ertragsleistung schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb. Erkenntnisse aus drei Jahren FastWood, ProLoc und Weidenzüchtung. Fachtagung vom 21. bis 22.09.2011 in Hann. Münden.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 430 S.
- 9 (2012) **SILVAQUA – Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Zustand von Gewässern in bewaldeten Einzugsgebieten am Beispiel der Oker im Nordharz.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 226 S.
- 10 (2013) **Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried. Entscheidungsunterstützung vor dem Hintergrund sich beschleunigt ändernder Wasserhaushalts- und Klimabedingungen und den Anforderungen aus dem europäischen Schutzgebietssystem Natura 2000.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 397 S.

Band

- 11 (2014) **Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS – Anwendung und theoretische Grundlagen.** Jan Hansen, Jürgen Nagel. 224 S.
- 12 (2015) **Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer.** Wolfgang Schmidt, Volker Stüber, Thomas Ullrich, Uwe Paar, Jan Evers, Klaus Dammann, Thomas Hövelmann, Marcus Schmidt. 136 S.
- 13 (2015) **Pilotstudie zu den lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in ausgewählten Regionen Sachsen-Anhalts.** Stefan Fleck, Matthias Albert, Pavel Plašil, Ralf Nagel, Johannes Suttmöller, Bernd Ahrends, Matthias Schmidt, Jan Evers, Jan Hansen, Marc Overbeck, Wolfgang Schmidt, Hermann Spellmann, Henning Meesenburg. 221 S.
- 14 (2016) **Gefährdungen der Ökosystemdienstleistungen von Wäldern. Fachtagung vom 9. bis 10. Oktober 2014 in Göttingen.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 185 S.
- 15 (2016) **Waldbodenzustandsbericht für Hessen – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II).** Uwe Paar, Jan Evers, Inge Dammann, Nils König, Andreas Schulze, Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Birte Scheler, Thomas Ullrich, Johannes Eichhorn. 466 S.
- 16 (2017) **Hochwertiges Forstvermehrungsgut im Klimawandel. Symposium des Verbundprojektes FitForClim vom 14. bis 15. Juni 2016 in Chorin.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 185 S.
- 17 (2017) **Waldböden: Nutzung und Schutz. Fachtagung vom 10. bis 11. Oktober 2016 in Göttingen.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 157 S.

Band

- 18 (2017) **Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland.** H. Spellmann, B. Ahrends, M. Albert, S. Andert, T. Barkmann, M. Böcher, B. Breckling, O. Christen, J. Dvorak, M. Eggers, S. Fleck, N. Fohrer, M. Gauly, B. Gerowitt, D. Gieseke, J. Grocholl, W. Hakes, V. Hammes, V. Hartje, G. Haunert, M. Hoffmann, J. Hufnagel, J. IsSELstein, R. Kätzel, M. Kayser, I. Kehr, H. Knauer, M. Krott, C. Lambertz, A. Lange, G. Langer, G. Leefken, S. Löffler, H. Meesenburg, R. Meißner, H. Messal, P. Meyer, B. Möhring, K. Möller, J. Nagel, R. Nuske, A. Oetzmann, S. Ohrmann, C. v. Redwitz, J. Riediger, M. Schmidt, J. Schröder, W. Schröder, R. Siebert, D. Spindelndreher, H. Stahlmann, L. Stöck, J. Suttmöller, N. Svoboda, D. Tänzer, A. v. Tiedemann, B. Ulber, K. Wegner, P.C. Werner, M. Winter., H. Wüstemann, P. Zander, T. Ziesche. 436 S.
- 19 (2019) **Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II).** Jan Evers, Inge Dammann, Nils König, Uwe Paar, Volker Stüber, Andreas Schulze, Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Johannes Eichhorn. 498 S.

Alle Bände der „Beiträge der NW-FVA“ sind auch als freie Onlineversion über die Homepage der NW-FVA (www.nw-fva.de), des Verlags sowie über den Göttinger Universitätskatalog (GUK) bei der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (<http://www.sub.uni-goettingen.de>) erreichbar. Es gelten die Lizenzbestimmungen der Onlineversion.

Die Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) gibt ein umfassendes Bild des aktuellen Zustands der Waldböden und deren Veränderungen im Laufe der Zeit. Die BZE in Niedersachsen und Bremen basiert auf einem Rasternetz mit insgesamt 272 Aufnahmepunkten. Die BZE I (1990–1991) ergab deutlich kritische Zustände der Waldböden, vor allem infolge atmogener Säureeinträge. Die Wiederholungsinventur (BZE II, 2006–2009) gibt nun Aufschluss über Veränderungen in Waldböden vor dem Hintergrund zurückgehender Säurebelastungen, weiterhin hoher Stickstoffeinträge und der Wirkung von Kompensationskalkungen. Neben der eingehenden Analyse chemischer Eigenschaften verschiedener Waldböden – von ärmeren Sanden im Tiefland bis hin zu reichen Muschelkalkböden im Bergland – stehen die Kohlen- und Stickstoffspeicherung im Fokus, außerdem Ergebnisse zur Baumernährung, zur Waldvegetation und zum Intensiven Forstlichen Umweltmonitoring. Der Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen liefert wichtige Entscheidungsgrundlagen für Wissenschaft, Praxis und Politik.



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

ISBN: 978-3-86395-388-1
eISSN: 2512-594X

Universitätsdrucke Göttingen