

# Kalkungsversuche auf brandenburgischen BZE-Inventurpunkten – Ziele, Stand und Perspektiven eines bundesweiten Projektes

JENS HANNEMANN, WINFRIED RIEK, ALEXANDER RUSS & MAURICE SCHWOY

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund intensiver Untersuchungen zum Wald- und Bodenzustand, der gewonnenen Erkenntnisse auch aus zurückliegenden großflächig aufgetretenen Waldschäden sowie der sich aus den Prognosemodellen zur künftigen Waldentwicklung ableitbaren Tendenzen ist die Bündelung von Erfahrungen zur Konditionierung der Wälder Deutschlands für sich ändernde Umweltbedingungen sinnvoll. Zudem bestimmt die Stabilität der Wälder u. a. das Bindungsvermögen für schädliche Treibhausgase und leistet damit einen enorm wichtigen Beitrag für die Erreichung der Ziele im Rahmen des Kyoto-Protokolls.

Sowohl der momentane Boden- als auch der Ernährungszustand der Wälder in Deutschland (vgl. MEESENBURG et al., 2017, WELLBROCK et al., 2016, VON WILPERT & HARTMANN, 2016, ASCHE, 2016, EVERS, 2016 u. a.) geben Anlass dazu regional adaptierte Maßnahmen zur Erhaltung der Waldvitalität in Erwägung zu ziehen, zu erforschen oder bereits auch umzusetzen. Nach AID 1985 (zit. in WELLBROCK et al., 2004) sollen mit einer Kompensationskalkung Wirkungen saurer Niederschläge in den Böden vermieden oder bereits entstandene Nährelementverluste wieder ausgeglichen werden. Schutzgut ist sowohl der Boden als auch die Bestockung. Betont wird, dass Kalkungsmaßnahmen jedoch nicht die notwendigen Luftreinhaltmaßnahmen ersetzen. Auf eine differenzierte Vorgehensweise bei der Auswahl potenziell zu kalkender Flächen wird verwiesen (vgl. auch STETTER, 2010).

Das bundesweite Projekt „Modellvorhaben zur Förderung von Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern“ wurde vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) ins Leben gerufen. Gefördert werden Praxis- und Versuchskalkungen in einer Laufzeit von 2015 bis 2017. Koordiniert wird das Vorhaben durch die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) in Göttingen. Neben den Ländern Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Saarland, in denen Waldkalkungen seit vielen Jahren gängige Praxis sind, ist auch das Land Brandenburg an diesem Verbundvorhaben mit Versuchskalkungen beteiligt. Die folgenden Ausführungen beziehen sich vorrangig auf die Einrichtung der Versuchflächen in Brandenburg, das Versuchskonzept und erste Ergebnisse.

### 1.1 Situation in Brandenburg

In Brandenburg wurde im Rahmen des o.g. Projektes eine Verwaltungsvereinbarung zwischen dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und dem Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (BMEL & MLUL-BB, 2014) getroffen in der der Gegenstand der Maßnahme, sowie Grundsätze der Mittelbereitstellung und -verwendung geregelt sind. In §1 Absatz 1 wird besonders auf die angespannte Nährstoff-

situation, verursacht durch die nach wie vor hohen Stickstoffeinträge und den dadurch induzierten Nähr- und Spurenelementmangel sowie die vermehrte Nutzung schwächeren Holzes für energetische Zwecke, verwiesen.

Die Spezifik der historischen und rezenten Eintragungssituation in Brandenburg, die in Abhängigkeit von der räumlichen und zeitlichen Einwirkungsintensität die Boden- und Pflanzernährungschemie beeinflusst, beschreibt EINERT (2015, 2016). Der Zustand der Waldböden in Brandenburg wird ausführlich von RIEK et al. (2015) analysiert. Mit dem Waldbodenbericht Brandenburg liegt auch eine Bewertungsbasis für die Kalkungsbedürftigkeit anhand der BZE-Stichproben vor. Danach ergibt sich **keine akute Kalkungsnotwendigkeit** für den brandenburgischen Wald, wenngleich die durch die Bodenversauerung beeinträchtigte **Magnesiumversorgung** auf zahlreichen Standorten der flächenrepräsentativen BZE-Stichprobe nach gängigen Bewertungsrahmen **angespannt** erscheint. Eine standortbezogene Abschätzung der Effekte einer Zu- bzw. Rückführung von Nährstoffen fehlt zudem, so dass Untersuchungen hierzu im Rahmen eines Monitorings erforderlich sind. Die Partizipation des Landes Brandenburg am o.g. Modellvorhaben gründet sich demnach vorrangig auf dem wissenschaftlichen Interesse auf eine zunehmende Bodenversauerung resp. eine abnehmende Nährstoffverfügbarkeit vorbereitet zu sein.

Bei den Versuchskalkungen in Brandenburg geht es primär um die Schaffung von Kalkungsreferenzflächen zur Untersuchung der Kalkungswirkung. Dabei stehen Untersuchungen sowohl zur Nährstoffversorgung und -verfügbarkeit für die Wirtschaftsbaumarten als auch zur Entwicklung der Humusdynamik und der Baum- und Bodenvegetation unter den spezifischen brandenburgischen Tieflandstands- und Bestockungsbedingungen im Fokus. Die Untersuchungsergebnisse dienen der Ableitung verallgemeinerbarer, vorsorglicher Handlungsempfehlungen. Diese wiederum bilden die Entscheidungsgrundlage für eine rechtzeitige Maßnahmeneinleitung bei einer sich weiter zuspitzenden Ernährungssituation.

### 1.2 Ziele von Wald- und Versuchskalkungen

- Die Ziele einer Waldkalkung und einer Versuchskalkung unterscheiden sich. Soll eine Waldkalkung durchgeführt werden, sind die erforderlichen Voruntersuchungen zur Begründung der Kalkungsnotwendigkeit, einschließlich der Ausweisung einer Flächenkulisse und der Klärung des Einverständnisses der Flächeneigentümer i.d.R. abgeschlossen. Die Kalkungsmaßnahmen werden durch wissenschaftliche Untersuchungen begleitet. Als allgemeine **Ziele der Waldkalkung** sind zu nennen (vgl. auch VON WILPERT & HARTMANN, 2016, ASCHE, 2016, GEHRMANN 2016 u. a.):

- Pufferung der Versauerung
- Erhöhung der Basensättigung
- Beitrag zur Normalisierung der Stoffkreisläufe
- Verbesserung der Nährstoffversorgung und -verfügbarkeit
- Verminderung von Nährstoffungleichgewichten bei der Pflanzenernährung
- Verbesserung der Humusformen (günstige C/N- und C/P-Verhältnisse)
- Kompensation der historischen Übernutzung und der atmosphären Stoffeinträge
- Erhöhung der Stresstoleranz und Anpassungsfähigkeit
- Aufrechterhaltung von Ökosystemdienstleistungen

Bei der Versuchskalkung hingegen wird die Notwendigkeit einer Kalkung unter Berücksichtigung der diversen Standorts- und Bestockungsbedingungen durch ein längerfristiges Monitoring untersucht. Hier steht die wissenschaftliche Untersuchung der Kalkungswirkung im Mittelpunkt. Dabei sollte das Spektrum der zu untersuchenden Flächen, die potenziell für eine Kalkung in Frage kommen, möglichst groß sein, da auch nach Anwendung der Kriterien (s. folgenden Abschnitt) eine Merkmalsdiversität „übrig“ bleibt, die die Effekte der Kalkungswirkung in unterschiedlichem Maße beeinflussen kann. Es können hauptsächlich folgende spezielle **Ziele der Versuchskalkung** benannt werden:

- Erfassung der zeitlichen und räumlichen Stoffdynamik incl. der C- und N-Dynamik (Bodenfestphase, Sickerwasser, Nadeln)
- Änderung der Humusformen und der Artenzusammensetzung
- Untersuchung der Pufferungswirkung
- Stützstellen für die Beurteilung der Kalkungswirkung im Rahmen der BZE-Auswertungen
- Einwertung in ernährungsphysiologische Rahmenbefunde (Göttlein, 2016)

### 1.3 Kriterien für die Kalkungswürdigkeit

Die Kriterien für die Einschätzung der Kalkungswürdigkeit können von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich sein (vgl. Russ et al., 2014). Dabei existiert inzwischen eine Vielzahl von Kriterien die abgeprüft werden müssen. Dieses Kriterienset, das durchaus erweitert werden kann, erlaubt eine sensitive Bewertung, die dem Anspruch einer differenzierten Herangehensweise im Sinne von STETTER (2010) u. a. (s.o.) entspricht. Für die Kalkungswürdigkeit von Standorten in Brandenburg sind von RIEK et al. (2015) Kriterien benannt worden, die auch für die Auswahl der Flächen für die Versuchskalkung anhand der landesspezifischen BZE-II-Stichprobe herangezogen wurden. Diese Kriterien werden im Folgenden herausgestellt. Sie können in sach- und raumbezogene Kriterien / Bedingungen unterteilt werden. Zu den sachbezogenen Kriterien zählen **Boden- und Standortmerkmale, sowie bodenchemische Parameter**, z. B.:

- Hydromorphie (Grundwasserferne)
- Stammnährkraftstufe  $\neq A$ , Ausschluss oligotropher und dystropher Standorte
- geringer pH-Wert (pH < 3.5 in mindestens einer Tiefenstufe)
- geringe Basensättigung (BS < 15 % in jeder Tiefenstufe)

- Ausschluss von C/N-Verhältnissen von < 20 in der Auflage und im mineralischen Oberboden in den Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm
- Kumulierter Kationsäurevorrat (die für die Neutralisierung des Vorrats an sauren Kationen (Ma) in 60-140 cm Tiefe notwendige Kalkungsmenge muss rechnerisch mindestens 3 t/ha ergeben)

Einen weiteren, ebenso wichtigen Teil im Komplex für die Beurteilung der Kalkungswürdigkeit bilden die Kriterien der **Baumernährung**.

- Vorliegen von Mangelernährung nach Göttlein (2016)

Daneben existieren raumbezogene Kriterien, die u. a. **Nutzungs- und Naturschutzaspekte** berücksichtigen und wie folgt zu benennen sind:

- Kiefernbestand, der für den Waldumbau vorgesehen ist
- Schutzstatus (Ausschluss: Fauna-Flora-Habitate, Naturschutzgebiete, tw. Landschaftsschutzgebiete)
- Gewässer- und Siedlungsferne
- Entfernung zu Naturwäldern und Mooren
- Ausschluss anthropogen stark überprägter Böden
- Klärung der Eigentumsverhältnisse, Einverständnis der Waldbesitzer, -bewirtschafter
- weitere Standorteigenschaften, geologische Verhältnisse, Reliefsituation
- Zertifizierung (FSC®, PEFC™)

Mathematisch betrachtet handelt es sich dabei insgesamt um einen Komplex notwendiger und gleichzeitig hinreichender, also äquivalenter Bedingungen. Für sich genommen ist der erste Kriterienkomplex notwendig, der zweite, also die Baumernährung, hinreichend. Damit wird angenommen, dass der zweite Kriterienkomplex kausal mit dem ersten zusammenhängt. Die Kriterien, die darüber hinaus gewichtet in die Gesamtanalyse eingehen können, werden auf die abzurufenden Datensätze (hier: BZE-II-Stichprobe) in der Form *WENN* Bedingung = *wahr DANN* Kalkung empfohlen (Ja/Nein/erneute Prüfung) angewendet. Bei der Abprüfung der Bedingungen können auch weichere Bedingungen in Form von Fuzzy-Funktionen (vgl. auch TRAEGER, 1993) angewendet werden. Das harte Kriterium z. B. einer Basensättigung von unter 15 % kann durch die in Abbildung 1.1a dargestellte Fuzzy-Funktion aufgeweicht werden. Dabei wird die harte Bedingung von < 15 % bedient, jedoch auch Werte, die noch etwas über oder unter dieser Marke liegen, allerdings dann mit einer geringeren Zugehörigkeit. Die Funktion wird in Anlehnung von SCHÖPF (2006) durch die Gleichung

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(a \times (x - b))}$$

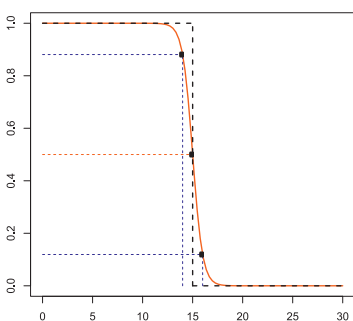
beschrieben. Dabei kann  $b$  z. B. den Wert 15 für die Basensättigung annehmen. Der Angleichungsgrad  $a$  bestimmt die Steilheit der Kurve. Sehr kleine Werte führen zu einer flachen Kurve. Im Beispiel in Abbildung 1.1a ist  $a = 2$ . Die berechneten Erfüllungsgrade entsprechend der dargestellten Fuzzy-Funktionen für die einzelnen Kriterien ermöglichen dann über die o.g. Regeln die Einstufung der Kalkungswürdigkeit.

Dabei werden drei Sachverhalte deutlich: Es gibt potenziell mehr Fälle, die der Bedingung genügen, die Wahl der Zugehörigkeitsfunktion hat einen großen Einfluss auf das Ergebnis und bei der Kombination einer Vielzahl von Bedingungen werden flexiblere Entscheidungen möglich.

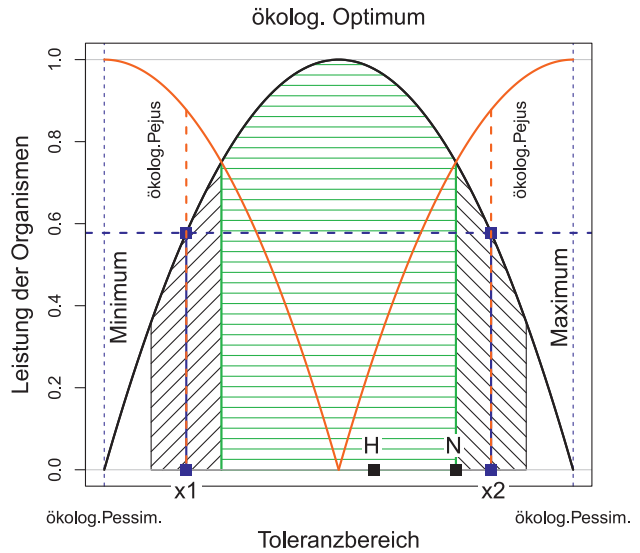
Die Auswahl der Kalkungsversuchsflächen für Brandenburg erfolgte nach einem 3-stufigen, kaskadierten Verfahren bei dem für sensible, raumbezogene Kriterien (FFH, NSG etc.) konzentrische Pufferzonen um die BZE-Punkte gelegt und die Flächenanteile der abstandsrelevanten Flächen in den Pufferzonen bestimmt wurden. Danach erfolgte eine Rangskalierung für die jeweiligen Pufferzonen für alle Punkte und die Ermittlung eines Pufferzonen gewichteten Scores für jeden Punkt. Die innen liegenden Pufferzonen wurden dabei entsprechend höher gewichtet als die äußeren.

### 1.4 Ökologischer Pejus

Die Leistungsfähigkeit eines Organismus ist in entscheidendem Maße davon abhängig in welchem Maße der ökophysiologische Optimalbereich durch die Umweltbedingungen erfüllt werden kann (vgl. ZIERDT, 1997). Im Kontext des Ursachen-Wirkungs-Gefüges bilden die Umweltbedingungen die Ursachen der durch die verschiedensten Indikatoren angezeigten Wirkungen. Das Beziehungsgeflecht ist dabei multikausal, d.h. eine Ursache kann sich in mehreren Wirkungen zeigen und eine Wirkung wiederum kann auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. Der ökologische Pejus, d.h. der Bereich zwischen Optimalbereich und Minimum bzw. zwischen Optimalbereich und Maximum, kann bezogen auf die Ernährungssituation durch eine Mangel- oder Überangebotssituation gekennzeichnet sein. In der Abbildung 1.1b ist ersichtlich, dass beide Situationen durchaus zu gleichen Leistungsmerkmalen (z. B. Jahringbreiten, Durchmesser- und Höhenzuwachs) führen können. Die Schwierigkeit besteht besonders darin einen Bereich zu identifizieren und zu benennen, der sämtliche Wirkfaktoren einschließt, die die optimale Leistungsfähigkeit bestimmen. Hier sind auch die verschiedenen Indikatoren, benannt in der Wald-Monitoring-Konzeption und dem Wald-Monitoring-Bericht des Landes Brandenburg (vgl. KALLWEIT, 2014, 2017) von entscheidender Bedeutung. Auf die Ambivalenz der Wirksamkeit sei auch im Hinblick auf die Betrachtungen zu den Bedingungen (Ursachen) im vorigen Abschnitt verwiesen. Eine Nährstoffzufuhr im Mangelbereich führt entsprechend der Abbildung 1.1b zu einer erheblichen Leistungssteigerung, die im Bereich des Optimums jedoch abnimmt und weiter sogar in einer deutlichen Leistungsabnahme mündet (vgl. ZIERDT, 1997). Aus diesem Grund ist die mit einer Kalkung verbundene Nährstoffzufuhr gesondert zu betrachten.



(a) Beispiel für eine Fuzzy-Funktion der Basensättigung von < 15 % (rot) mit unterschiedlichen Zugehörigkeitsgraden; gestrichelt: "binäre Funktion"



(b) Pejus nach SCHUBERT, 1984 (zit. in ZIERDT, 1997), verändert. N = Intensität eines Faktors, H = Hintergrundwert. Mangel- bzw. Überernährung wird durch die rotmarkierten Zugehörigkeitsfunktionen (hier: quadratisch) beschrieben.

Abb. 1.1: Zugehörigkeitsfunktionen für leistungsbestimmende Parameter

## 2 Versuchskonzept

### 2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Größe der Versuchsfläche beträgt 250×250 m (6.25 ha). Als Bestand dominieren Kiefern mittleren Alters. Auf Grund einzuhaltender technischer Rahmenbedingungen wurde von dem Vorhaben alle 16 ausgewählten Flächen, die um ausgewählte BZE-II-Punkte liegen, mit dem Hubschrauber zu kalken, abgerückt. Dies mündete auch in einer Änderung des Versuchsdesigns in der Art, dass neben noch zwei aviotechnisch zu bedienenden Flächen pro Versuchsfläche lediglich zwei Teilflächen à 20×20 m gekalkt werden sollen. Parallel dazu werden zwei gleich große Nullflächen untersucht. Des Weiteren wurden Teilareale der Level-II-Fläche Weitzgrund gekalkt, so dass hier u. a. auch auf Sickerwasserwerte eines längeren Zeitraums vor der Kalkung zurückgegriffen werden kann. Insgesamt sind also 17 Flächen, davon 15, manuell gekalkt worden. Das Ausbringungsschema ist in der Abbildung 2.1a, das Versuchsflächendesign in der Abbildung 2.1b dargestellt.

Beim ausgebrachten Material handelt es sich um dolomitisches Kalk (60 % CaCO<sub>3</sub>, 25 % MgCO<sub>3</sub>, 50 % BST<sub>b</sub> (basische Bestandteile)) mit einer Dosierung von 3 t/ha und um ein Kalk-Holzasche-Gemisch (54 % CaCO<sub>3</sub>, 21 % MgCO<sub>3</sub>, 44 % BST<sub>b</sub>, 1 % K<sub>2</sub>O; 30 % Holzasche) mit einer Dosierung von 4 t/ha. Das Kalk-Holzasche-Gemisch wurde auf 5 Flächen, die im Landeswald liegen, ausgebracht. „Zu beachten ist, dass nicht 100 % der ausgebrachten Kalkmenge wirksam wird, sondern ein Teil mit dem Sickerwasser ausgewaschen wird.“ (vgl. WELLBROCK et al., 2004)

Die folgende Tabelle zeigt einige Zahlen zu den Flächen und zu den Proben:

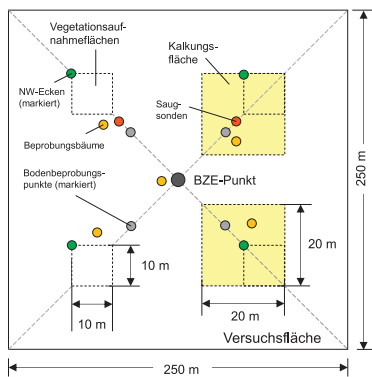
Tabelle 1: Anzahl der Untersuchungsflächen und Proben

Versuchsflächen	Material	Teilflächen	Nullflächen	<sup>1</sup> VA -Flächen	Bodenprofile	Bodenproben	Humusproben	Probenahmebäume
2	Kalk	vollflächig	-	8	8	40	8	20
10	Kalk	20 (3x3) <sup>2</sup>	20 (3x3)	40	40	200	40	100
4	KHG <sup>3</sup>	8 (3x3)	8 (3x3)	16	16	80	16	40
1 (LII) <sup>4</sup>	KHG	4 (1x7)		2	1	7	1	4
gesamt (ohne LII)		28 (18)	28 (18)	64	64	320	64	160
<sup>1</sup> Vegetationsaufnahme, <sup>2</sup> davon Flächen mit (Anzahl) Saugkerzen, <sup>3</sup> Kalk-Holzasche-Gemisch, <sup>4</sup> Level-II-Fläche								

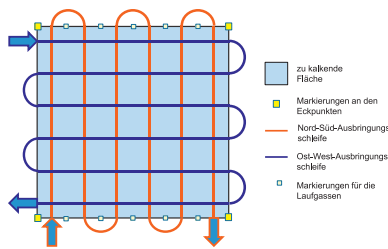
Die entsprechende Ausbringungsmenge für die Kalk-Teilflächen beträgt 120 kg (0,3 kg/m<sup>2</sup>), für die Kalk-Holzasche-Gemisch-Teilflächen 160 kg (0,4 kg/m<sup>2</sup>).

Neben einer Bodeninventur (Bodenansprache nach KA5, AD-HOC AG BODEN, 2005) und -beprobung an vier Punkten der Versuchsfläche, bilden die chemische Analytik der Bodenfestphase (Mineralboden und Humusaufgabe), des Sickerwassers und der Nadeln nach dem Handbuch für forstliche Analytik (GAFA, 2014) sowie die Vegetationsaufnahme nach dem Methodenkatalog zum Monitoring-Programm der Ökosystemaren Umweltbeobachtung von WOLFF et al. (2007) die Hauptblöcke des Untersuchungsprogramms. Die Beprobung des Mineralbodens und der Humusaufgabe orientierte sich an den Vorgaben, einschließlich der benannten Tiefenbereiche, wie sie bezüglich der Methodik in der vom BMELV herausgegebenen Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen zur II. Bodenzustandserhebung im Wald gemacht wurden (vgl. WELLBROCK et al., 2006).

tember 2015 beendet (KOMPA, 2015). Die Erstbeprobung der Nadeln erfolgte von November/Dezember 2015 bis Januar 2016 durch die Zapfenpflücker des Landesbetriebes Forst Brandenburg. In 2016 wurden auf 6 ausgewählten Flächen Saugsonden zur Sickerwassergewinnung in den Tiefen 10, 30 und 60 cm installiert (s. Abbildung 3.5). Mit der erfolgten Installation im September 2016 läuft die Sickerwasserbeprobung in einem 2-3-wöchigen Turnus. Die manuelle Ausbringung des Kalkes (s. Abbildung 2.2) für alle 15 der dafür vorgesehenen Flächen konnte innerhalb von 2 Wochen im November 2016 mit der personellen Unterstützung der beteiligten Oberförstereien realisiert werden.



(a) Versuchsflächendesign mit Beprobungspunkten und gekalkten Teilflächen (gelb)



b) Schema für die sich kreuzende und schleifenartige Kalkausbringung per Hand

Abb. 2.1: Versuchsflächendesign und Ausbringungsschema

Die Boden- und Auflagenbeprobungen konnten wie die Arbeiten zu den Markierungen für die Flächen und die Probenahmeplätze Ende des Jahres 2015 abgeschlossen werden. Der Auftrag für die Vegetationsaufnahme wurde an Herrn Dr. KOMPA aus Stendal vergeben und wurde im Sep-



(a) Ausbringen des Kalkes mit der Hand bei Spreeau (KVF 19) durch Waldarbeiter der Oberförsterei Erkner



(b) Gekalkte Fläche (KVF 23) bei Jethe  
Abb. 2.2: Manuelle Kalkausbringung



Die Behandlung der zwei Flächen mit dem Hubschrauber erfolgte nach witterungsbedingter Verschiebung des ursprünglich auf den 21.11.2016 angesetzten Termins schließlich am 26.11.2016 durch die beauftragte Deutsche Heli Forst GmbH.



(a) Aufnahme des befüllten Kübels durch den Hubschrauber



(b) Niedergang des Materials auf der Fläche bei Zeuden  
 Abb. 2.3: Kalkausbringung mit dem Hubschrauber

Für die Bestimmung der Menge des niedergegangenen Materials wurden in der Nähe der Vegetationsaufnahmeplätze und im Zentrum der Fläche Auffangschalen (umgedrehte Regentonnendeckel, s. Abbildung 2.4) aufgestellt. Die Aufnahmemengen (s. Tabelle 2.2) betragen auf der Fläche 1 nur ca. 74 % der geforderten 300 g. Auf der Fläche 23 wurden ca. 94 % erreicht. Die Gründe für das Defizit auf der Fläche 1 sind möglicherweise darin zu suchen, dass der hier sehr junge Bestand durch seinen hohen Verästelungsgrad eine für die Kalkpartikel große adhäsive Oberfläche bildet und dadurch den Niedergang auf den Boden behindert. Ein Großteil der Partikel dürfte dennoch durch den Niederschlag mit zeitlicher Verzögerung in den Boden gelangen.



Abb. 2.4: Auffangschale  $\varnothing = 0,99\text{ m}$ ;  $A = 0,77\text{ m}^2$

Tabelle 2.2: Auffangmengen des mit dem Hubschrauber ausgebrachten Materials

Auffangpunkt	Menge in g	Menge in g auf 1 × 1 m	%
1 NW	169,08	219,76	
1 NE	144,77	188,16	
1 M (Mitte)	105,42	137,02	
1 SW	195,70	254,36	
1 SE	235,74	306,40	
		221,14 (Soll = 300)	73,71
23 NW	250,17	325,16	
23 NE	229,43	298,20	
23 M (Mitte)	216,52	281,42	
23 SW	202,50	263,20	
23 SE	187,83	244,13	
		282,42 (Soll = 300)	94,14

2.2 Lage der Versuchsflächen

Die folgende Abbildung 2.5 zeigt die räumliche Lage der Kalkungsversuchsflächen im Land Brandenburg. Die relativ gleichmäßige Verteilung ermöglicht zum Einen die Berücksichtigung unterschiedlicher geologischer Ausgangsbedingungen und zum Anderen die Beurteilung der Ergebnisse bezogen auf die Wuchsbezirke Brandenburgs.

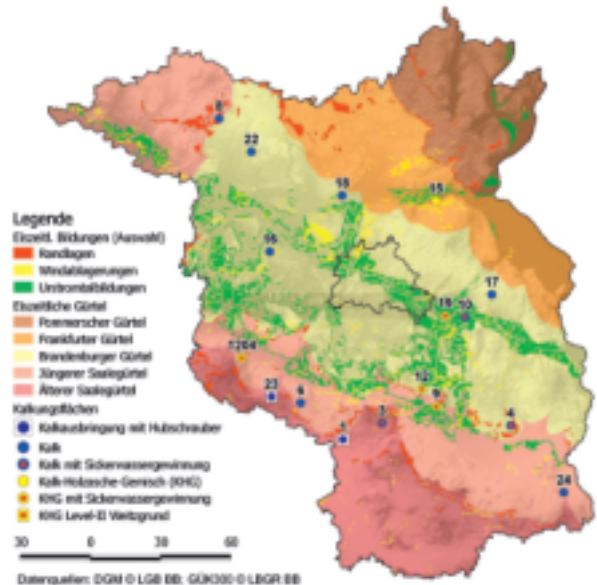
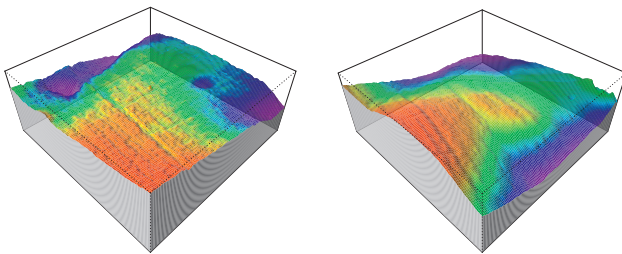


Abb. 2.5: Lage und Art der Versuchsflächen mit ausgewählten geologischen Bildungen und eizeitlichen Gürteln; Kartendarstellung auf Basis der GÜK300 von LIPPSTREU et al. (1996) und des DGM25 (LGB BRANDENBURG)

Neben der geographischen Lage besitzt die Ausprägung des Reliefs einen sehr wichtigen Einfluss auf das Prozessgeschehen im Ökosystem (vgl. HANNEMANN et al., 2016). Es steuert zu einem bedeutenden Teil die Stoff- und Wasserflüsse gerade auch im grossmaßstäbigen Bereich. Für die Modellierung bzw. Quantifizierung dieser sind für jede Kalkungsfläche die Geländeoberflächenhöhen aus dem DGM2-Datensatz extrahiert worden. Die Auflösung des DGM2 ist so gut, dass auch sehr kleinräumige Strukturen, wie Bearbeitungsspuren, Wege und Rückegassen (s. Abbildung 2.6), erkennbar sind. Da diese in hohem Maße die Verweildauer und das Fließverhalten des Oberflächenwassers (lateral und vertikal präferenzierter Fluss) und damit der mit dem Kalk eingetragenen Nährelemente beeinflussen, bildet die Auswertung des Reliefs in Zukunft eine hohe Bedeutung für eine differenzierte Nährstoffbilanzierung. Die Analyse von Mikroeinzugsgebieten (hydrologische Untereinheiten, Patches) in Kombination mit Standortseinheiten sowie Bestandesparametern (Dichte, Höhe, Durchmesser etc.) erlaubt eine stärkere Auflösung in Richtung Einzelbaum.



a) KVF 3

b) KVF 8

Abb. 2.6: Digitales Geländemodell (DGM2) von Kalkungsversuchsflächen (Ausschnitte 250×250 m, stark überhöht, Norden oben links)

### 3 Erste Untersuchungsergebnisse

#### 3.1 Bodenanalytik

##### 3.1.1 Festphase

Die folgenden Ausführungen greifen die im Waldbodenbericht Brandenburg (RIEK et al. 2015) gemachten Aussagen auf und werden bezogen auf die ausgewählten Kalkungsflächen behandelt. Die Ergebnisse der chemischen Analytik der Festphase dienen dabei der Untersetzung der für eine Waldkalkung herangezogenen Kriterien mit den im Waldbodenbericht benannten Schwellenwerten für ausgewählte Intensitäts- und Kapazitätsparameter. Zu den Intensitätsparametern gehören dabei der pH-Wert, das C/N-Verhältnis und die Basensättigung, zu den Kapazitätsparametern der kumulierte Kationsäurevorrat. Diese stellen notwendige Bedingungen für die Kalkungswürdigkeit dar. Die folgenden Auswertungen und Darstellungen beziehen sich auf die Analyse der Boden- und Humusproben, die im Rahmen des Projektes vor der Kalkungsmaßnahme entnommen worden. Die farbigen Quadrate (RGB-abgestuft für die jeweilige Stichprobe; rot: ungünstig, blau: günstig) stellen die Medianwerte, die „Whisker25er- bzw.- 75. Quartil dar. Teilweise lag für die regulär 4 Proben pro Tiefenstufe und Fläche bislang nur eine analysierte Probe vor. Die auf der x-Achse

bezeichneten Flächennummern entsprechen nicht den realen Flächennummern, sondern sie sind entsprechend fortlaufend nummeriert.

##### 3.1.1.1 pH-Wert

Im Waldbodenbericht Brandenburg wird der kritische pH-Wert für eine Kalkungsempfehlung mit 3,5 für mindestens eine Tiefenstufe des Mineralbodens angegeben. In der Abbildung 3.1 ist die Erfüllung dieses Kriteriums für alle Flächen in der Tiefenstufe 0-5 cm angegeben, sowie die Pufferbereiche für den Mineralboden nach Ulrich (1981, 1982; zit. in AK STANDORTSKARTIERUNG, 2016, S. 176)

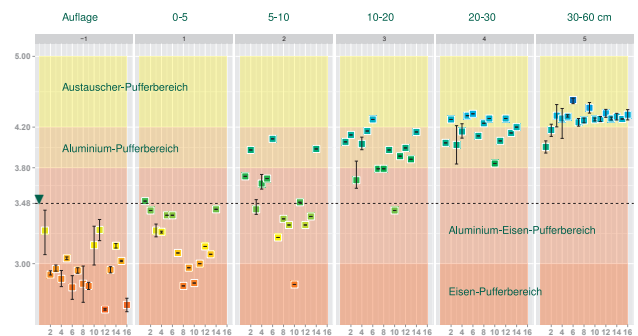


Abb. 3.1: pH-Werte und Pufferbereiche

##### 3.1.1.2 Basensättigung

Die Basensättigung charakterisiert den prozentualen Anteil der basischen Kationen ( $M_B$ :  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ) bezogen auf die Gesamtheit der am Austauscher gebundenen Ionen (AK). Damit wird zudem eine Abschätzung des sauer und potenziell toxisch wirkenden, freien  $Al^{3+}$ -Ionen möglich. Als Voraussetzung für eine Waldkalkung wird eine Basensättigung von <15 % im Tiefenbereich von 0-140 cm angegeben.

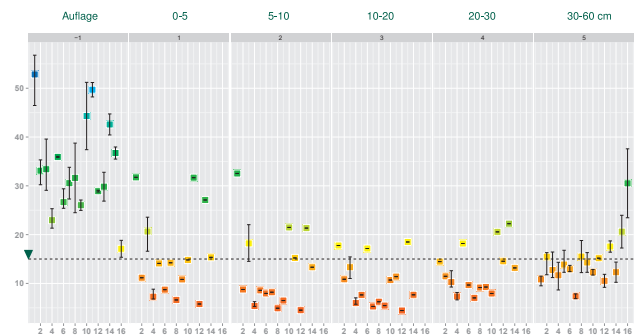


Abb. 3.2: Basensättigung

##### 3.1.1.3 C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis ist zum einen ein Maß für die Humusqualität und zum anderen ein Indikator für die Humusentwicklung. Ein C/N-Verhältnis von >20 zeigt nährstoffarme Bedingungen und schlecht zersetzbar bzw. schlecht zersetzte Humussubstanz an. Verhältnisse von <20 zeugen von einer hohen biologischen Aktivität und einem hohen

Mineralisierungsumsatz von C und N und damit einer günstigen Pflanzenverfügbarkeit. Bei engen C/N-Verhältnissen besteht bei einer Kalkung allerdings die Gefahr einer N-Freisetzung, so dass diese ein Ausschlusskriterium bilden. Weiterhin muss die anhaltend hohe N-Belastung auch regional resp. bei der Erstellung einer Kalkungskulisse berücksichtigt werden.

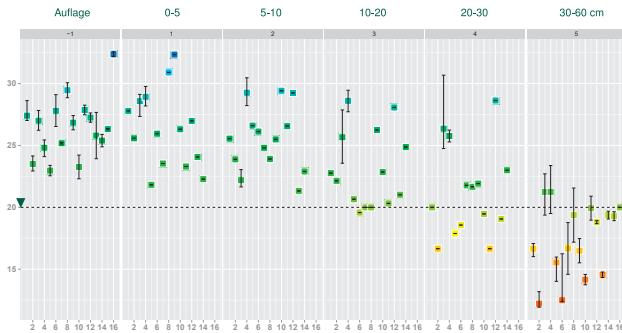


Abb. 3.3: C/N-Verhältnis

3.1.1.4 Kationenaustauschkapazität

Die Kationenaustauschkapazität wird in entscheidendem Maße durch den Anteil von Ton und humosen Material im Substrat, sowie den pH-Wert bestimmt. Eine Kalkungsmaßnahme auf armen, sandigen Böden ist demnach wenig sinnvoll, da die Nährstoffionen nicht an Austauscher gebunden bzw. substituiert werden können. Eine Verbesserung der Nährstoffsituation und eine pH-Wert-Anhebung wären nur von sehr kurzer Dauer. Die Kationenaustauschkapazität (Ak) ist die Bezugsgröße für die Berechnung der Sättigungsgrade (Austauscherbelegung) und wird ihrerseits als Kriterium herangezogen, da sie in Kombination mit den anderen Kriterien entscheidungsunterstützend wirkt. Böden mit einer hohen AK und einer geringen Basensättigung sind beispielsweise ungünstiger zu bewerten als Böden mit geringer bis mittlerer AK aber hoher Basensättigung (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2013).

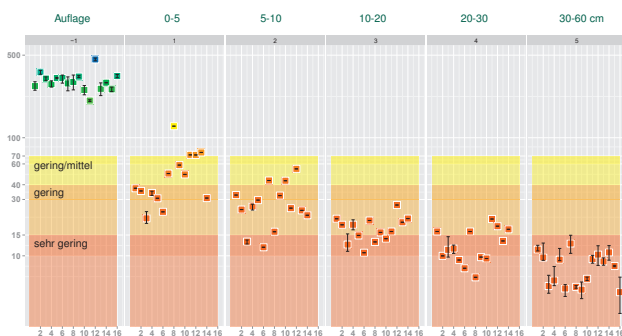


Abb. 3.4 : Kationenaustauschkapazität (AK<sub>e</sub>) in cmol<sub>c</sub>/kg mit Bewertungsstufen nach AK STANDORTSKARTIERUNG, 2016, S. 181 (heller Farbton: B/C-Horizonte, dunklerer Farbton: A-Horizonte)

3.2 Sickerwasser

Die Beprobung und Analyse der Sickerwässer auf den Kalkungsversuchsflächen bildet einen zentralen Bestandteil der laufenden Untersuchungen. Ihnen kommt bei der Quantifizierung der Kalkungswirkung eine besondere Bedeutung zu, da sich hier die Effekte einer Neutralisierung und Verbesserung des Nährstoffangebotes am ehesten beobachten lassen.



(a) Einschlämmen der Saugkerzen mit einer Suspension des autochtonen Bodens bei angelegtem Unterdruck und Einbaurohr



(b) Galerieartige Sickerwassergewinnungsanlage mit den Entnahmetiefen 10, 30 und 60 cm

Abb. 3.5: Sickerwassergewinnung auf den Kalkungsversuchsflächen

Die folgende Abbildung 3.6 zeigt erste Ergebnisse zu den Analysen der Sickerwässer auf den 6 Versuchsflächen. Dabei sind die anfänglich generell höheren Werte möglicherweise darauf zurückzuführen, dass das chemische Gleichgewicht, das mit dem Einbau der Saugkerzen gestört wurde, sich erst langsam wieder einstellt. Mittlerweile dürfte es erreicht sein. Eine Wirkung der Kalkung zeichnet sich bislang, zumindest im gewählten Aggregierungsgrad (alle Flächen und Tiefen), nicht ab. Betrachtungen mit einer höheren räumlichen Auflösung werden dabei künftig angestellt.



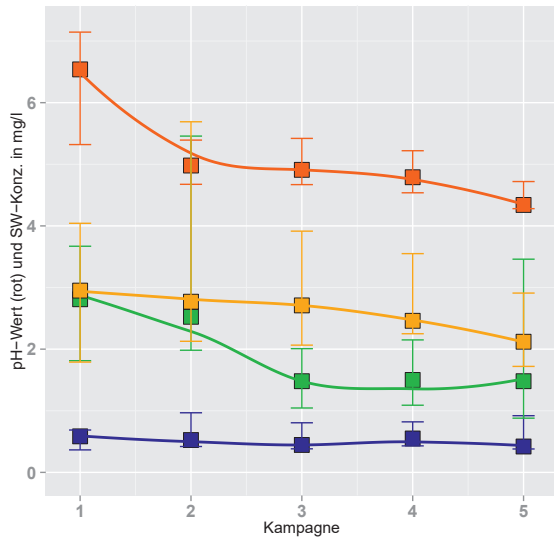
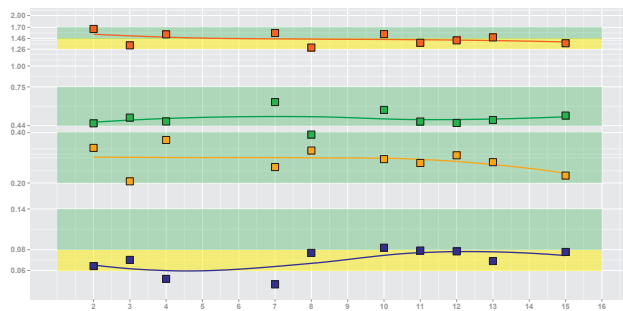


Abb. 3.6: pH-Werte und Sickerwasserkonzentrationen (in mg/l) in 5 Messkampagnen (1: 9/2016; 2: 10/2016; 3: 11/2016; 4: 12/2016; 5: 1/2017) für alle Flächen und Tiefen: ■ pH-Wert ■ Ca ■ Mg ■ K

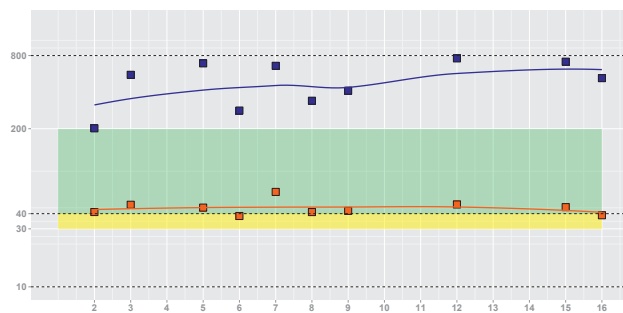
### 3.3 Nadeluntersuchungen

Generell ist bei der Beurteilung der Kalkungswürdigkeit der Waldzustand im Allgemeinen und die Ernährungssituation im Besonderen zu betrachten, d.h. gibt es Anhaltspunkte für erniedrigte Nährelementgehalte (Ursache) oder gar Mangelerscheinungen (Wirkung). Demnach kommt der Integration der Ergebnisse zur chemischen Analytik der Nadeln gegenüber der des Bodens eine hohe Bedeutung zu (hinreichende Bedingungen).

Die Werte für die Hauptnährelemente liegen im Wesentlichen in den von GÖTTLEIN (2016) und RIEK et al. (2016) angegebenen Normbereichen, lediglich bei Mg wird der Symptombereich deutlich belegt (s. Abbildungen 3.7a und 3.7b).



(a) Hauptnährelemente für die Baumart Kiefer: (■ N ■ K ■ Ca ■ Mg in %)



(b) Hauptnährelemente für die Baumart Kiefer: (■ Mn ■ Fe in mg/kg)

Abb. 3.7: Nadelspiegelwerte mit Grenzwertbereichen (grün: normal; gelb: symptomatisch; für Mn gestrichelt) nach GÖTTLEIN (2016), aus AK STANDORTSKARTIERUNG, (2016), S.184

Die Kalkungsflächen sind den Abbildungen 3.7 und 3.8 (s. x-Achse) bezüglich ihrer geologischen Position (Lage in den eiszeitlichen Gürteln; s. Abbildung 2.5) von NW-licher nach SW-licher Richtung sortiert worden um so einen möglichen, geologisch determinierten Trend zu erkennen. Zu beachten ist die logarithmische Skalierung der y-Achsen. Unter Nutzung des Paketes „loess“ ist in der Statistiksoftware R eine Linienanpassung vorgenommen worden. Allerdings können nur vage Vermutungen angestellt werden, da der Stickprobenumfang hierfür zu gering sein dürfte. Auffallend ist lediglich der leicht abfallende Trend von Ca. Dies deckt sich mit der zunehmenden Entkalkung in Verbindung mit der Wirkungsdauer periglazärer Prozesse und einer damit verringerten Verfügbarkeit von Ca. Demgegenüber ist ein recht deutlich ansteigender Trend von Mn erkennbar. Ähnlich verläuft der Trend von Fe. Möglicherweise korrespondieren diese Entwicklungen mit einem in SW-licher Richtung steigenden Podsolierungsgrad (vgl. Wald-Monitoring-Bericht, KALLWEIT, 2017), der eine erhöhte Verfügbarkeit von Fe und Mn induziert.

Die höheren Schwermetallgehalte der Nadeln der Flächen mit den höheren Rangnummern liegen möglicherweise auf den Einfluss der südöstlich und südwestlich gelegenen Emittenten (z. B. Kraftwerke mit Braunkohlenverbrennung) begründet, die zu einer depositionsbedingten Akkumulation sowohl im Boden als auch in der Nadelsubstanz führen können.

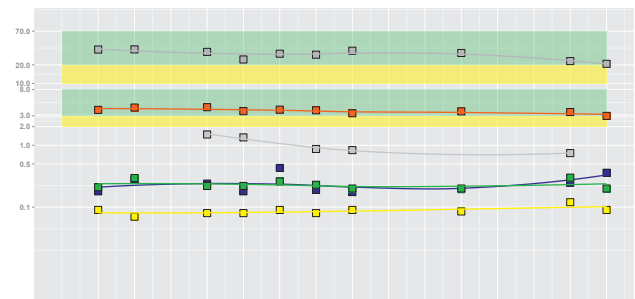


Abb. 3.8: Nadelspiegelwerte einer Auswahl von Mikronährelementen: (■ Zn ■ Cu) und Schwermetallen für die Baumart Kiefer: (■ Ni ■ Cr ■ Pb ■ Cd in mg/kg) mit Grenzwertbereichen (grün: normal; gelb: symptomatisch) nach GÖTTLEIN (2016), aus AK STANDORTSKARTIERUNG (2016), S.184

### 3.4 Vegetationsaufnahme

Die Methodik für die Aufnahme der Vegetation richtet sich nach dem Methodenkatalog ÖÜB-Wald nach WOLFF et al. (2007). Danach sind die obere Baumschicht B1 (verholzende Pflanzen mit einer Höhe > 5 m, wenn zwei Schichten zum Oberstand gehörig), die untere Baumschicht B2 (anzugeben nur wenn zwei Schichten vorhanden sind; verholzende Pflanzen mit einer Höhe > 5 m zum Unterstand gehörig), die Strauchschicht S (verholzende Pflanzen mit einer Höhe 0,5-5 m), die Krautschicht K (Kraut-/Grasarten bis 1,5 m, verholzende Pflanzen < 0,5 m) und die Mooschicht M (Moosarten) mit den jeweiligen wissenschaftlichen Artennahmen anzusprechen, sowie der Deckungsgrad (in %) der Einzelart je Schicht und der Gesamtdeckungsgrad der Schicht anzugeben. Die folgenden Darstellungen basieren auf den Ergebnissen der Vegetationsaufnahme von KOMPA (2015). In der Abbildung 3.9 sind die **Deckungsgrade der Arten** in sog. „Tree Maps“ für die 4 Vegetationsaufnahme-flächen der Kalkungsversuchsfläche (KVF) 1 dargestellt.



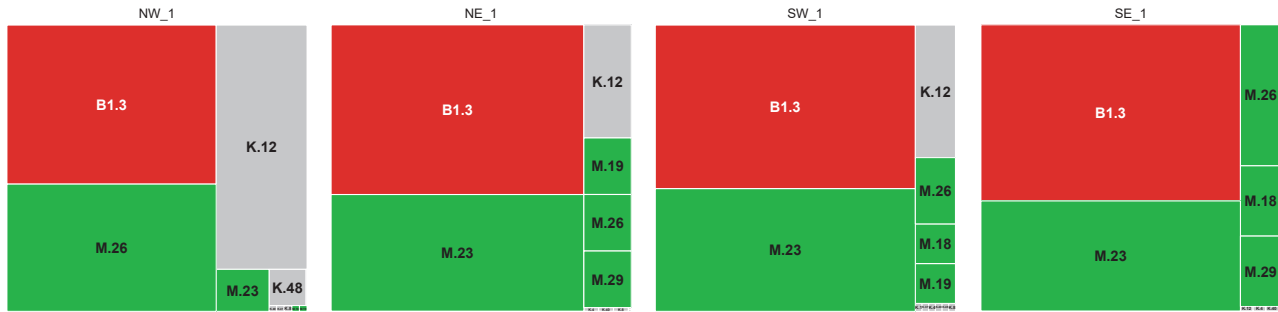


Abb. 3.9: „Tree Maps“ der Vegetationsaufnahme­flächen der KVF 1 (■ Baumschicht 1 und 2, ■ Krautschicht, ■ Moos­schicht; s.a. Tabelle 3.4)

Die Rechtecke repräsentieren dabei die Deckungsgrade proportional zur Größe der Aufnahme­fläche. Dies ermöglicht einen synoptischen Vergleich der Artenzusammensetzungen bzw. -anteile vor und nach der Kalkungsmaßnahme. Die Codierungen der Arten in den entsprechenden Schichten sind in Tabelle 3.4 aufgeschlüsselt in der sämtliche Arten der Kalkungsversuchsflächen verzeichnet sind.

Tabelle 3.4: Vegetationsarten

B1.1	Betula pendula	K.1	Agrostis capillaris	K.30	Moehringia trinervia	M.1	Atrichum undulatum
B1.2	Fagus sylvatica	K.2	Anthoxantum odoratum	K.31	Molinia caerulea	M.2	Aulacomium androgynum
B1.3	Pinus sylvestris	K.3	Betula pendula	K.32	Mycelis muralis	M.3	Brachythecium oedipodium
B1.4	Quercus rubra	K.4	Calamagrostis epigejos	K.33	Picea abies	M.4	Brachythecium rutabulum
B1.5	Viscum laxum	K.5	Calluna vulgaris	K.34	Pinus sylvestris	M.5	Brachythecium spec.
		K.6	Carex arenaria	K.35	Polygonatum multiflorum	M.6	Brachythecium velutinum
B2.1	Betula pendula	K.7	Carex brizoides	K.36	Polypodium vulgare	M.7	Campylopus flexuosus
B2.2	Fagus sylvatica	K.8	Carex pilulifera	K.37	Prunus serotina	M.8	Campylopus introflexus
B2.3	Picea abies	K.9	Convallaria majalis	K.38	Pteridium aquilinum	M.9	Cladonia cervicornis
B2.4	Pinus sylvestris	K.10	Danthonia decumbens	K.39	Quercus petraea	M.10	Cladonia furcata
B2.5	Prunus serotina	K.11	Deschampsia cespitosa	K.40	Quercus robur	M.11	Cladonia glauca
B2.6	Quercus petraea	K.12	Deschampsia flexuosa	K.41	Quercus rubra	M.12	Cladonia macilenta
B2.7	Quercus robur	K.13	Dryopteris carthusiana	K.42	Rubus fruticosus agg.	M.13	Cladonia mitis
		K.14	Dryopteris dilatata	K.43	Rubus idaeus	M.14	Cladonia pyxidata
S.1	Betula pendula	K.15	Dryopteris filix-mas	K.44	Rumex acetosella	M.15	Cladonia spec.
S.2	Fagus sylvatica	K.16	Epilobium angustifolium	K.45	Sorbus aucuparia	M.16	Cladonia uncialis
S.3	Frangula alnus	K.17	Euphorbia cyparissias	K.46	Stellaria media	M.17	Dicranella heteromalla
S.4	Pinus sylvestris	K.18	Fagus sylvatica	K.47	Taraxacum officinale agg.	M.18	Dicranum polysetum
S.5	Prunus serotina	K.19	Festuca ovina agg.	K.48	Vaccinium myrtillus	M.19	Dicranum scoparium
S.6	Quercus petraea	K.20	Frangula alnus	K.49	Vaccinium vitis-idea	M.20	Dicranum spurium
S.7	Quercus robur	K.21	Galeopsis tetrahit agg.	K.50	Veronica officinalis	M.21	Eurhynchium praelongum
S.8	Rhamnus cathartica	K.22	Hieracium lachenalii	K.51	Vincetoxicum hirundinaria	M.22	Herzogiella seligeri
S.9	Sorbus aucuparia	K.23	Hieracium pilosella			M.23	Hypnum cupressiforme
		K.24	Holcus lanatus				(inklusive H. jutlandicum)
		K.25	Holcus mollis			M.24	Leucobryum glaucum
		K.26	Hypericum perforatum			M.25	Lophocolea heterophylla
		K.27	Impatiens parviflora			M.26	Pleurozium schreberi
		K.28	Larix decidua			M.27	Pohlia nutans
		K.29	Luzula pilosa			M.28	Polytrichum formosum
		rena	rena			M.29	Scleropodium purum

Die Einstufungen der erfassten Arten gemäß den ökologischen Artengruppen (Ökogramme der Zeigerarten nach AK STANDORTSKARTIERUNG, 2016) vor und nach der Kalkung erlaubt die sensitive Beurteilung der durch die Kalkung veränderten Waldbodenvegetation und Humusformen.

#### 4 Weitere Versuchsplanung

Neben den im Projekt zwischen den beteiligten Bundesländern abgestimmten Beprobungen und Aufnahmen vor und nach der Kalkung sind auf einigen der Flächen intensivere Untersuchungen geplant, die insbesondere der differenzierten Charakterisierung einer gegenüber den unbehandelten Flächen veränderten Stoffdynamik Rechnung tragen sollen. Dazu gehören zum einen die **Untersuchung des Streufalls** und zum anderen die **fotografische Dokumentation der Teilflächen**. In geeigneten Zeitinterfallen (z. B. einmal pro Monat) und bei festgelegter Höhe (z. B. 5 m) werden horizontale Aufnahmen gemacht. Als Passpunkte dienen dabei die Eckmarkierungen der Teilflächen. Ziel ist die Erfassung von Veränderungen der Muster in der Bodenvegetation.

Der mit der Kalkung verbundene **Humusabbau in der Auflage** und im Mineralboden (vgl. HILDEBRAND, 1996) soll erfasst werden. Die Veränderungen in der Auflage werden dabei punktuell durch Messungen der Mächtigkeit bestimmt. Diese Messungen können dabei durch Oberflächenmessungen (incl. des vorhandenen **Totholzes**) mit Hilfe geeigneter technischer Verfahren (Laser, Photogrammetrie) für die Flächen (Kalkungs- und Nullfläche) qualifiziert werden. Die Referenzierung zum Mineralboden erfolgt dabei anhand der konventionellen Mächtigkeitsmessungen.

Weiterhin soll eine Bestimmung des zeitlichen und tiefenmäßigen **Humus- und Holzabbaus im Mineralboden** über in den Boden geschlagene Holzpfähle, die mit definierten Schlitzern (ggf. Bohrungen) versehen sind, erfolgen. Dabei werden mehrere derartig präparierte Pfähle in den Boden der Kalkungs- und Nullflächen getrieben. Jedes Jahr (ggf. an einem Tag im Herbst oder auch öfter) wird ein Pfahl gezogen. Die Veränderungen der Oberflächen in und an den Bohrungen und Schlitzern sind durch mikromesstechnische Methoden zu erfassen. Die Veränderung der Innen-Oberflächen (Größe, Art, Struktur) ist ein Maß für den Abbau der organischen Substanz. Es wird davon ausgegangen, dass die Außen-Oberflächen der Holzleisten nicht analysiert werden können, da beim Einschlagen Riefen und Schrammen entstehen. Ziel der Untersuchungen sind neben der Erlangung von (Oberflächen-)Merkmalen, Rückschlüsse auf den Zusammenhang von Humus-/Holzabbau und bodenchemischem/-hydrologischem Milieu, sowie der Kohlenstoffdynamik. Bei der Holzmaterialauswahl ist darauf zu achten, dass möglichst Holz von Splintholzbäumen für alle Untersuchungsflächen verwendet wird um eine gleichbleibende Qualität (Dichte, Festigkeit, Feuchtigkeit) des Holzes sicherzustellen. Für die Charakterisierung des Bodenmilieus werden Temperatur- und Feuchtelogger installiert.

Zur Verifizierung der Sickerwassermengen und -qualitäten soll der (Bestandes-) **Niederschlag** (Menge, Chemie) zumindest auf den Kalkungsversuchsfläche mit einer Sickerwasseranalge bestimmt werden. Dazu werden Hellmann-Niederschlagsmesser installiert. Die Probennahme

erfolgt zu den Sickerwasserbeprobungsterminen. Die Bestimmungen der Niederschlagsmengen ist dabei ohne hohen Aufwand möglich.

Weiterhin sind turnusmäßig **wachstumskundliche Untersuchungen** vorgesehen. Dazu werden momentan die Durchmesser und Höhen der Bäume (inklusive der Nadelbeprobungsbäume) je einer Kalkungsteilfläche und je einer Nullfläche ermittelt, sowie Stammlagepläne erstellt. Dendrologische Untersuchungen sind ebenfalls geplant.

#### 5 Ausblick

Insgesamt kann konstatiert werden, dass im Hinblick auf möglicherweise in Frage kommende Kalkungsmaßnahmen die Absicherung einer langfristigen Weiterführung der intensiven Beobachtung und Beprobung auf den Kalkungs- und Kalkungsvergleichsflächen, auch über die Projektlaufzeit hinaus gewährleistet sein muss. Dabei ist eine standort- und biotopdifferenzierte Betrachtungsweise unerlässlich.

Da bereits in der Vergangenheit umfangreiche Kalkungsversuche in Brandenburg durchgeführt wurden (vgl. HEINSDORF 1999, 2011) kann eine Nachauswertung dieser gerade unter dem Aspekt der relativ hohen zeitlichen Distanz und der daraus zu erwartenden Veränderungen im Boden- und Ernährungsstatus bzw. Waldzustand als erforderlich betrachtet werden. Derzeit laufen Untersuchungen zum „Alt-Kalkungsversuch“ Spechthausen u. a. auf der Grundlage der Befunde von KRAUSS (1992).

In diesem Zusammenhang stellt auch die Beobachtung der Entwicklung des Bodenzustandes und der Baumernährung auf Intensivmessflächen (Level II) einen weiteren Schlüssel für die Klärung der Reaktionen des Ökosystems Wald auf sich ändernde Umweltbedingungen dar.

Von hoher Bedeutung für die Ableitung maßnahmenrelevanter Schlussfolgerungen aus den Kalkungsversuchen wird es sein, wie sich die Vorher-Nachher-Situationen darstellen und welche Effekte sich auf Boden, Humusaufgabe, Sickerwasser, Bodenvegetation und Baumernährung auf den Kalk behandelten und den Kalk unbehandelten Flächen zukünftig einstellen werden. Daneben spielt die Entwicklung des Trends, wie er sich von der BZE1 zur BZE2 ergibt, durch die dritte Bodenzustandserhebung BZE3 (voraussichtlich 2022) eine wichtige Rolle.

#### 6 Danksagung

Wir danken denjenigen, die das Projekt maßgeblich unterstützt haben. Dazu zählen in erster Linie die Waldbesitzer, die ihr Einverständnis für die Einrichtung der Versuchsflächen gegeben haben, sowie die Leiter der Oberförstereien Jüterbog, Luckau, Lieberose, Neustadt (Dosse), Erkner, Brieselang, Briesen, Neuendorf, Neuruppin, Dippmendorf, Drebkau und der Landeswaldoberförstereien Lübben, Hammer, Chorin und Hangelsberg. Der Dank gilt selbstverständlich auch den Waldarbeitern die den Kalk auf die Flächen gebracht haben und den Revier- und Funktionsförstern, die die reibungslose Kalkausbringung sichergestellt haben. Für die ausgezeichnete Hilfsbereitschaft und Kommunikation sei an dieser Stelle besonders gedankt.

Große Unterstützung haben wir vom Leiter des Landeskompetenzzentrums Forst Eberswalde (LFE) Herrn Dr. M.E. LUTHARDT, dem Leiter des Fachbereiches Waldökologie/Monitoring Herrn Prof. R. KÄTZEL und Herrn Dr. G. BILKE von der Betriebsleitung des Landesbetriebes Forst Brandenburg (LFB) erhalten. Den Kollegen Prof. F. GUTWASSER vom Ökologischen Labor der Hochschule für nachhaltige Entwicklung (HNE) Eberswalde, sowie Dr. R. KALLWEIT, P. WOLFGGRAMM, M. GRÜLL, O. RÜFFER, TH. KINDERMANN, Dr. A. DEGENHARDT, B. EISERMANN, H. FRITZSCHE, M. POHL, TH. LOEST, Dr. S. PANKA, F. BECKER, Dr. P. HEYDECK, R. BARTH, L. FRÜH, A. KONOPATZKY, I. HÖHNE, M. LABENZ UND U. FINGER danken wir ebenfalls für Ihre Hilfe bei der Durchführung des Projektes.

## Literatur

- Ad – hoc AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. Aufl. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- AID (1985): Forstliche Düngung. Tech. rept. Auswertung und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Bonn.
- AK Standortkartierung (2016): Forstliche Standortaufnahme. 7. Aufl. IHW-Verlag München.
- ASCHE, N. (2016): Schiefe Ebene Bodenversauerung. Bodenschutzkalkung, Waldvitalität. 1. Waldbodensymposium Soest am 19.04.2016.
- BMEL & MLUL-BB (2014): Verwaltungsvereinbarung zwischen der Bundesrepublik Deutschland und dem Land Brandenburg über die Durchführung eines "Modellvorhabens zur Förderung von Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern". VV Modellvorhaben Nährstoffversorgung von Wäldern BB. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft / Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg. unveröffentlicht.
- DGM25 (2000): Digitales Geländemodell (Rasterweite 25m). Landvermessung und Geobasisinformation Brandenburg.
- EINERT, P. (2015): Deposition. Kap. 1.3, In: Wald-Monitoring-Bericht 2015, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft (MLUL) des Landes Brandenburg. unveröffentlicht.
- EINERT, P. (2016): Luftverunreinigungen als Belastungsfaktor. Seite 27–38, In: 30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg - Beiträge zur Fachtagung am 6. und 7. Juli 2016 in Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft (MLUL) des Landes Brandenburg.
- EVERS, J. (2016): Einfluss der Waldkalkung auf den C-Speicher und Neues zur Basensättigung - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. 1. Waldbodensymposium Soest am 19.04.2016.
- Gafa (2014): Handbuch forstliche Analytik (HFA) - Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Gutachterausschuss forstliche Analytik, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Bonn.
- GEHRMANN, J. (2016): Der Bodenzustand in den Wäldern von Nordrhein-Westfalen auf Basis der Stichprobeninventur BZE. Konzeption, Säure/Basen-Status, Schwermetalle, Stickstoff. 1. Waldbodensymposium Soest am 19.04.2016.
- GÖTTLEIN, A. (2016): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. AFJZ, 186 (5/6), 110–116.
- HANNEMANN, J., RUSS, A., KALLWEIT, R. & RIEK, W. (2016): Betrachtungen zu den Stoffbilanzen von Level-II-Flächen im Land Brandenburg. 30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg - Beiträge zur Fachtagung am 6. und 7. Juli 2016 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft (MLUL) des Landes Brandenburg.
- HEINSDORF, D. (1999): Düngung von Forststrukturen auf Lausitzer Kippen. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Düngeversuche zu Forstkulturen auf den Kipp-Rohböden der Lausitz und ihre praktische Anwendung auf der Grundlage von Boden- und Blatt-/Nadelanalysen unter Berücksichtigung eines optimalen Düngereinsatzes, Antworten der Wissenschaft auf Fragen der Praxis, LAUBAG.
- HEINSDORF, D., UEBEL, E. & CHRZON, S. (2011): Begründung und Entwicklung stabiler Forstökosysteme auf ehemals ackerbaulich genutzten degradierten Sandböden. Verlagsgesellschaft für Ackerbau mbH Kassel.
- HILDEBRAND, E. E. (1996): Warum müssen wir Waldböden kalken? Agrarforschung in Baden-Württemberg, 26, 53–65.
- KALLWEIT, R. (2014): Wald-Monitoring-Konzeption des Landes Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 57. Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde.
- KALLWEIT, R. (2017): Wald-Monitoring-Bericht 2017. Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde. unveröffentlicht.
- KOMPA, Th. (2015): Daten zur Vegetationsaufnahme auf den Kalkungsflächen Brandenburgs. Ergebnis zum Auftrag im BMEL-Verbundprojekt "Modellvorhaben zur Förderung von Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern", Landesbetrieb Forst Brandenburg, unveröffentlicht.
- KRAUSS, H. (1992): Bodenuntersuchungsergebnisse eines Versuchs mit gesteigerten Gaben an Hochofenschlacke und Karbonatkalk auf einem mit Kiefern bestockten Sandboden mäßiger Trophie im nordostdeutschen Tiefland nach 38jähriger Beobachtungszeit. Ph.D. thesis.



- LIPPSTREU, L., HERMSDORF, N. & SONNTAG, A. (1997): Digitale Daten der Geologischen Übersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300 000 (GÜK300). Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB).
- MEESENBURG, H., WELLBROCK, N., LAUER, A., EICKENSCHIEDT, N., HÖHLE, J., GRÜNEBERG, E., EVERS, J., AHRENDTS, B., SCHIMMING, C.-G., NAGEL, H.-D., RIEK, W. & MEIWES, K. J. (2017): Entwicklung der Versauerung von Waldböden in Deutschland. AFZ-DerWald, 2.
- R (2013): R-Statistiksoftware. Version 2.15.3. The R Foundation for Statistical Computing.
- RIEK, W., RUSS, A. & KÜHN, D. (2015): Waldbodenbericht Brandenburg. Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebungen BZE-2 und BZE-2a. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 60(1).
- RIEK, W., TALKNER, U., DAMANN, J., KOHLER, M., MEIWES, K.J. & GÖTTLEIN, A. (2016): Waldernährung. Kap. 8. In: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008, Bd. 43. Thünen-Report.
- RUSS, A., RIEK, W. & MARTIN, J. (2014): Vergleich verschiedener Kalkungskonzeptionen hinsichtlich der Beurteilung der Kalkungsbedürftigkeit mecklenburgischer Waldböden anhand von Bodendaten der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-2). Forstarchiv, 85(2). URL <http://dx.doi.org/10.4432/0300-4112-85-55>.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2013): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- SCHÖPF, F. (2006): Erzeugen von Entscheidungsbäumen mit Soft-Splitting. FGBU, Medizinische Universität Innsbruck.
- SCHUBERT, R. (1984): Lehrbuch der Ökologie. VEB Gustav Fischer Verlag Jena.
- STETTER, U. (2010): Bodenschutzkalkung? Fraget die Bäume - Umfangreiche Daten zur Wäldernährung eröffnen einen anderen Blickwinkel auf das Thema Kalkung. LWF aktuell, 78, 25–27.
- TRAGER, D.H. (1993): Einführung in die Fuzzy-Logik. Teubner-Verlag-Stuttgart.
- ULRICH, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. - Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde, 144, 289-305, Weinheim.
- ULRICH, B. (1983): Stabilität von Waldökosystemen unter dem Einfluß des „sauren Regens“. - AFZ, 26/27, 670-676, München.
- von WILPERT, K. & HARTMANN, P. (2016): Ökologische Wirkungen und strategische Ansätze zur Bodenschutzkalkung. 1. Waldbodensymposium Soest am 19.04.2016.
- WELLBROCK, N. & Autorenkollektiv (2006): Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) - Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. (Hrsg.): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), 2. Aufl., Berlin.
- WELLBROCK, N., KIES, U., RIEK, W. & WOLFF, B. (2004): Methodenentwicklung zur Ableitung von Maßnahmenempfehlungen für Waldzustandstypen. Abschlussbericht zum Forschungsauftrag: Maßnahmenempfehlungen für Waldzustandstypen unter variierenden Umweltbedingungen - Modellrechnungen und Szenarien auf der Grundlage des bundesweiten Forstlichen Monitorings. Fachhochschule Eberswalde und Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg.
- WELLBROCK, N., LAUER, A., EICKENSCHIEDT, N., GRÜNEBERG, E., EVERS, J., AHRENDTS, B., SCHIMMING, C.-G., NAGEL, H.-D., RIEK, W., MEIWES, K. J. &
- MEESENBURG, H. (2016): Bodenversauerung und Nährstoffverfügbarkeit. Kap. 4. In: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland-Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008, Bd. 43., Thünen-Report.
- WOLFF, B., RIEK, W., HORNSCHUCH, F. & BIELEFELDT, J. (2007): Methodenkatalog zum Monitoring-Programm der Ökosystemaren Umweltbeobachtung (ÖUB) in den Biosphärenreservaten Brandenburgs für Waldökosystemtypen. Selbstverlag FH-Eberswalde.
- ZIERDT, M. (1997): Umweltmonitoring mit natürlichen Indikatoren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.