

Auswirkungen von Bodenschutzkalkungen auf Buchenwälder (*Fagus sylvatica* L.)

Effects of ameliorative liming on beech forests
(*Fagus sylvatica* L.)

Jan Evers, Inge Dammann, Axel Noltensmeier und Ralf-Volker Nagel

Zusammenfassung

Anhand über 25-jähriger Versuchsreihen wurde der Einfluss von Bodenschutzkalkungen auf Buchenbestände in Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hessen und Rheinland-Pfalz untersucht. Es konnte ein positiver Effekt der Kalkung auf das Höhenwachstum, den Kronenzustand der Buche sowie auf die Nährstoffgehalte von Buchenblättern nachgewiesen werden. Zusätzlich wurde das Nährstoffangebot im Mineralboden deutlich verbessert und die Stoffumsätze im Auflagehumus und oberen Mineralboden aktiviert. Unter gekalkten Parzellen kam es trotz geringeren Kohlenstoffvorräten im Auflagehumus im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollparzellen insgesamt nicht zu Kohlenstoffverlusten, da bei gekalkten Parzellen die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden höher waren. Damit konnte Kohlenstoff im Waldboden durch die Kalkung stabilisiert werden. Die mit der Kalkung ausgebrachten Calciumvorräte fanden sich im Auflagehumus und Mineralboden wieder und gingen somit dem System nicht verloren. Die durch die Kalkung erhöhte Säureneutralisationskapazität kann für die untersuchten Flächen jedoch noch nicht als ausreichend angesehen werden, mittlere Verhältnisse unbelasteter Waldöko-

systeme bezüglich der Nährstoffversorgung wieder herzustellen. Die Calcium- und Magnesiumgehalte der Buchenblätter auf den gekalkten Parzellen lagen im hohen bis sehr hohen Bewertungsbereich, die entsprechenden Gehalte auf den Kontrollparzellen im mittleren bis geringen Bereich. Die Kaliumgehalte der Buchenblätter auf den ungekalkten Parzellen waren höher als auf den gekalkten Parzellen. Insgesamt ergaben die Ergebnisse, dass die derzeit durchgeführten Bodenschutzkalkungen geeignet sind, die Vitalität von Buchenbeständen und die Stabilität der Waldböden zu erhöhen. Auch nach über 10 Jahren hatte die Kalkung noch nachweisbare positive Effekte.

Stichworte: Rotbuche, Bodenschutzkalkung, Höhenzuwachs, Kronenzustand, Kohlenstoff, Nährstoffe

Abstract

Based on the experimental trial series spanning more than 25 years, the effect of soil ameliorative liming on beech stands in Schleswig-Holstein, Lower Saxony, Hesse and Rhineland-Palatinate was investigated. Liming was found to have a positive effect on height growth, beech crown condition, and on the nutrient content of beech leaves. In addition, nutrient availability in the mineral soil improved markedly, and the nutrient turnover in the raw humus and upper mineral soil was activated. Overall, on the limed plots, carbon losses did not eventuate, despite the lower carbon supply in the raw humus compared to the control plots because the carbon supply in the mineral soil was higher on the limed plots. Thus liming stabilised the carbon supply in the forest soil. The calcium supply, enhanced through liming, was located in the raw humus and mineral soil, and hence was not lost to the system. The increase in acid neutralisation capacity of the plots investigated as a result of liming was inadequate, however, in re-establishing the average levels of nutrient availability of unaffected forest ecosystems. The calcium and magnesium content of beech leaves on limed plots was high to very high, whereas the corresponding content on control plots was moderate to low. The potassium content of beech leaves on the unlimed plots was higher than that on the limed plots. Overall, the results indicate that the soil ameliorative liming carried out in the past was appropriate for increasing the vitality of beech stands and the stability of forest soils. Even after more than 10 years, the positive effects of liming are still evident.

Keywords: beech, ameliorative liming, height increment, crown condition, carbon, nutrients

1 Einleitung

In den Wäldern Deutschlands ist die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) die bestimmende Baumart der potenziellen natürlichen Vegetation mit einem Anteil von über 80 % (LEUSCHNER 1998). Aktuell hat die Buche in Hessen 30 %, in Niedersachsen 14 % und in Sachsen-Anhalt 6 % Anteil an der Holzbodenfläche im Hauptbestand (BMVEL 2004). Die Bedeutung der Buche kommt in verschiedenen Waldprogrammen zum Ausdruck, wie z. B. im Programm zur Langfristigen Ökologischen Waldentwicklung (LÖWE-Programm) in Niedersachsen: hier wird explizit eine Erhöhung der Buchenanteile vorgesehen, überwiegend in Mischbeständen (NLF 2007). Grundsätzlich beinhalten alle Waldprogramme das Leitbild standortsgemäßer, struktur- und artenreicher, leistungsstarker, gesunder und stabiler Wälder. Ebenso ist der Erhaltungszustand von Buchenwäldern aus Naturschutzsicht im Rahmen der FFH-Lebensraumtypen europaweit von besonderer Bedeutung. Die Schadstoffbelastung aus der Luft stellt eine erhebliche Belastung des Waldökosystems Wald dar. Konsequente Maßnahmen zur Minderung derselben werden z. B. in der „Leitlinie Wald“ Sachsen-Anhalts (MRLU 1997) angefordert. Der Erhalt der natürlichen Leistungskraft auch der Waldböden ist ein vorrangiges Ziel waldbaulicher Richtlinien der Länder. Bodenschutzkalkungen zur Minderung der negativen Auswirkungen der durch Stoffeinträge bedingten Versauerung von Waldböden werden unter anderem in den Richtlinien von Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt, den Trägerländern der NW-FVA, eingefordert (LÖWE-Erlass 2007, RIBES 2002, MRLU 1997). Die anhaltende Überforderung der natürlichen Pufferkapazität der Waldböden wird durch die Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen der Länder belegt: Bundesweit ist eine flächendeckende, weitgehend substratunabhängige Versauerung und Basenverarmung der Oberböden im Wald nachgewiesen worden (WOLFF et al. 1997). Daher sind Ergebnisse von Untersuchungen zur Wirkung von Bodenschutzkalkungen und deren Bewertungen derzeit und auch zukünftig von großer Bedeutung (z. B. SPELLMANN u. MEIWES 1995).

Zur Untersuchung der langfristigen Auswirkungen der Bodenschutzkalkung auf Bestandes- und Bodenparameter wurden in Niedersachsen, Hessen und Schleswig-Holstein seit Anfang der 1980er Jahre Vergleichspärchen gekalkt und ungekalkt für die Baumarten Rotbuche, Rotfichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.) sowie Trauben- und Stieleiche (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.; *Quercus robur* L.) angelegt (BMVEL 2001). Diese Flächen sind periodisch alle 4-5 Jahre ertragskundlich aufgenommen worden. Auf einem Teil der Flächen wurde jährlich der Kronenzustand erfasst, in mehrjährigen Abständen Auflagehumus- und Bodenproben analysiert und zur Beurteilung der Ernährungssituation Nadel- bzw. Blattanalysen durchgeführt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse zur Buche vorgestellt.

2 Material und Methoden

2.1 Beschreibung der Versuchsflächen

2.1.1 Lage

Die nördlichste Versuchsfläche liegt in Eutin (Schleswig-Holstein, Anlage 1987, s. Abb. 1), es folgen weiter südlich Sellhorn und Görhde in der niedersächsischen Heide sowie Dassel im niedersächsischen Bergland. Die in Hessen 1983 angelegten Versuche zur Buche reichen von Hess. Lichtenau im Norden (Kaufunger Wald) über Frankenberg (Schiefergebirge), Königstein (Taunus), Jossgrund (Spessart) nach Lampertheim (Odenwald) im Süden. Der Kalksteigerungsversuch Dhronecken in Rheinland-Pfalz wurde wegen seiner inhaltlich ähnlichen Fragestellung in diese Auswertung einbezogen. Damit ist insgesamt ein relativ guter Nord-Süd-Transsekt für verschiedene Buchenwaldstandorte in Deutschland abgedeckt.

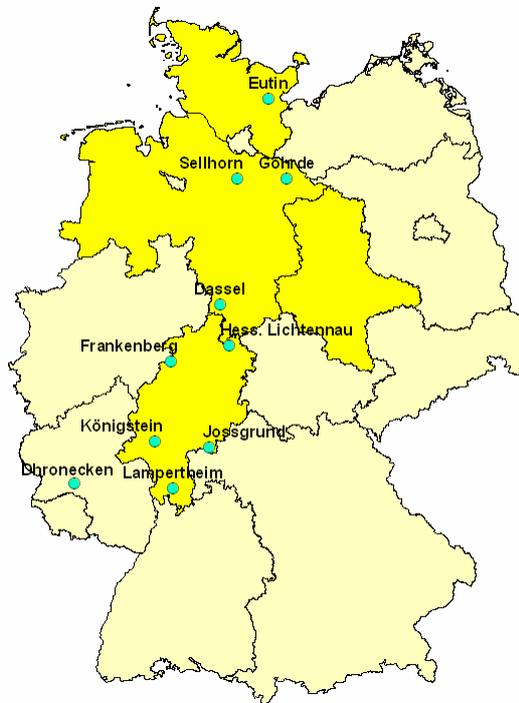


Abbildung 1: Lage der Versuchsflächen (Geobasisinformation © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)), dunkelgelb: Zuständigkeitsbereich der NW-FVA

2.1.2 Standorte

In Tabelle 1 sind die wichtigsten allgemeinen Angaben zu den jeweiligen Versuchsf lächen aufgeführt:

Tabelle 1: Allgemeine Angaben zum Standort, dem Bestandesalter, Parzellenzahl, Exposition, Höhe ü. NN sowie allgemeine Klimadaten

Fläche	Region	Buchen- alter (2008)	Größe (ha)	Expo- sition	Nei- gung (%)	Höhe ü. NN (m)	Jahres- Nieder- schlag* (mm)	Jahres- Mittel- temp.* (° C)
Eutin	Holst. Hügelland	109	2 x 0.25	Ebene	0	55	742	8,3
Sellhorn	Hohe Heide	99	2 x 0.25	Ebene	0	110	837	8,1
Göhrde	Ostheide	111	2 x 0.25	Ebene	0	100	676	8,5
Dassel	Solling	99	2 x 0.25	SO	3	430	1145	6,6
Hess. Lichtenau	Kaufunger Wald	124	5 x 0.30	NO	10	460	902	7,1
Frankenberg	Schiefergebirge	121	5 x 0.25	SO	10	420	667	7,5
Königstein	Taunus	118	4 x 0.25	S	25	600	900	6,6
Jossgrund	Spessart	130	4 x 0.25	W	14	420	969	7,0
Lampertheim	Odenwald	128	4 x 0.25	S	7	550	1047	7,9
Dhronecken	Hunsrück	73	10 x 0.25	NW	5	670	875	6,5

* Klimadaten Periode 1961 - 1990 aus WOLFF et al. 2003, für Dhronecken aus SPELLMANN u. MEIWES 1995

Die untersuchten Buchenbestände sind zwischen 73 Jahre (Versuch Dhronecken) und 130 Jahre (Jossgrund) alt. Damit fehlen in den Versuchen Buchen-Jungbestände in Wiederholungen und Altbestände über 130 Jahre. In Deutschland befinden sich in der Alterspanne 60-140 Jahre 60 % aller Buchenbestände (BMVEL 2004), so dass diese Versuche den mittleren Altersbereich der Buche in Deutschland gut abdecken.

Die Höhenstufen der untersuchten Buchenflächen reichen von der planaren Stufe (Eutin, Sellhorn und Göhrde), der submontanen Stufe (Dassel, Frankenberg, Jossgrund) über die montane Stufe in Hess. Lichtenau, Lampertheim und Königstein bis hin zur obermontanen Stufe in Dhronecken. Damit kommen alle Höhenstufen in diesen Versuchen vor, mit Ausnahme der kollinen Stufe des unteren Hügellandes.

Die durchschnittlichen Jahresniederschläge reichen von knapp 700 mm bis über 1100 mm (Periode 1961 - 1990). Dieser Bereich liegt vollständig in der ökologischen Standortsamplitude der Buche (LEUSCHNER 1998).

Im Folgenden werden kurz Geologie und Böden der einzelnen Flächen charakterisiert:

<i>Eutin:</i>	schwach wechselfeuchter, staufrischer Geschiebelehm über wurzelerreichbarem, nährstoffreichem Geschiebemergel, gut nährstoffversorgt;
<i>Sellhorn:</i>	frisch bis vorratsfrischer, noch gut mesotropher, über 50 cm mächtiger, verlehmteter Geschiebesand über Geschiebelehm;
<i>Göhrde:</i>	mäßig sommertrockener, schwach mesotropher, verlehmteter Geschiebesand über unverlehmtem Schmelzwassersand;
<i>Dassel:</i>	lehmig-sandige, ca. 20-30 cm mächtige Lösslehmdecke über basenarmem Buntsandstein, insgesamt frisch bis vorratsfrisch und mäßig nährstoffversorgt;
<i>Hess. Lichtenau:</i>	skelettreicher, teilweise toniger, mittlerer Buntsandstein mit schluffig-lehmigem Decksediment, mesotrophe, mäßig frische, podsolige Braunerde;
<i>Frankenberg:</i>	mittel bis stark grusiger, schluffig-sandiger Lehm über Tonschiefer und Grauwacken-Skelettboden, insgesamt frisch und mesotroph;
<i>Königstein:</i>	skelettreicher Schiefer und Taunusquarzit mit löss- und bimsreichem Decksediment, insgesamt frisch und mesotroph;
<i>Jossgrund:</i>	mittlerer Buntsandstein unter Schlufflehm-Fließerden mit geringer Nährstoffversorgung, frische bis mäßig frische, podsolige Braunerde, insgesamt mesotroph;
<i>Lampertheim:</i>	Fließerde aus karbonatfreien Lehmen über Hangschutt aus Plutoniten, betont frisch und eutroph;
<i>Dhronecken:</i>	diluvialer Decklehm aus sandigem Lehm mit 10-20 % Grus und Steinen über lehmigem Sand und Grus aus Gehängeschutt; tiefgründige, podsolige, basenarme Braunerde, die ganzjährig mit saurem Hangwasser versorgt ist, insgesamt geringe Nährstoffversorgung.

2.2 Kalkungsmaßnahmen

In Tabelle 2 sind die jeweiligen Bodenschutzkalkungen auf den 10 Versuchsflächen nach Zeitpunkt, Menge, Kalktyp mit den jeweiligen elementbezogenen Ausbringungsmengen an Calcium, Magnesium, Phosphor und der Säureneutralisationskapazität (SNK) angegeben. Die in den letzten beiden Spalten aufgeführte theoretisch zu kompensierende Säuremenge ergibt sich auf Grundlage der modellierten potenziellen Netto-Säuredeposition (GAUGER et al. 2002) für die letzten 25 Jahre sowie für die atmogene Deposition für den Zeitraum 1790 bis 1982 in Anlehnung an Zeitreihen für den Standort Rothamsted in England

(SVERDRUP et al. 1995), jeweils abzüglich der jeweiligen geschätzten Pufferraten für den effektiven Wurzelraum der Böden in den jeweiligen Versuchen (zwischen 0,2-0,4 kmolc je ha und Jahr). Die von GAUGER et al. (2002) zwischen 1990 - 1999 modellierten Werte wurden für den Untersuchungszeitraum 1983 bis 2007 extrapoliert. Insgesamt wurde von einer konstanten Freisetzung von Nährstoffkationen durch Silikatverwitterung über die angegebenen Zeiträume ausgegangen. Kam es zu Überschreitungen dieser Pufferraten durch die potenzielle Netto-Säuredeposition, wurde von einer Säureakkumulation im Mineralboden ausgegangen. Austräge mit dem Sickerwasser wurden nicht berücksichtigt. Diese in der Tabelle aufgeführten Angaben können nur Größenordnungen darstellen, die die ungefähre Säurebelastung dieser Standorte verdeutlichen sollen.

Die Bodenschutzkalkungen in den Versuchen sind überwiegend per Hand ausgebracht worden, um die erforderliche Sorgfalt sicherzustellen (Ausnahme Göhrde 1983: Ausbringung mit dem Schlepper und Schleuderstreuer).

Insgesamt sind zwischen 1,0 (Hess. Lichtenau und Königstein) und 8,5 (Sellhorn) Tonnen Kalk je Hektar ausgebracht worden. Im Kalksteigerungsversuch Dhronacken wurden bis zu 15 Tonnen Kalk je Hektar verschiedener Zusammensetzung ausgebracht. Wegen umfangreicherer Kalkungsmaßnahmen ist der Kalksteigerungsversuch Dhronacken von der Haupttabelle abgesetzt.

Tab. 2: Zeitpunkte der Kalkung, ausgebrachte Mengen, Kalktyp und elementbezogene Ausbringungsmenge sowie die theoretisch zu kompensierende Säuremenge

(SNK=Säureneutralisationskapazität, Sum(SNK) = Summe der SNK der jeweiligen Versuchsfläche)

Fläche	Kalkung	Menge (t/ha)	Kalktyp							zu kompensierende Säuremenge	
			Ca (kg/ha)	Mg (kg/ha)	P (kg/ha)	Ca (kmolc)	Mg (kmolc)	SNK (kmolc)	Sum(SNK) (kmolc)	1983-2007 (kmolc)	bis 1983 (kmolc)
Eutlin	1988	3	962	43		48	4	52	109	66	120
	1997	3	722	259		36	21	57			
Sellhorn	1962	0,5	161		35	8		8			
	1982	5	1502	91	77	75	7	82	147	129	126
	1993	3	722	259		36	21	57			
Göhrde	1983	5	1502	91	77	75	7	82	140	109	126
	1983	3	722	259		36	21	57			
	1981	5	1500	91	77	75	7	82	139	109	120
Dassel	1993	3	722	259		36	21	57			
	1984	1	349	9		17	1	18	18	97	120
Hess. Lichtenau	1986	1	349	9		17	1	18	38	88	126
	1993	1	220	115		11	9	20			
Frankenberg	1984	1	349	9		17	1	18	18	64	120
	1985	1	349	9		17	1	18	39	74	120
Königstein	1985	1	349	9		17	1	18	38	79	115
	1993	1	220	115		11	9	20			
Jossgrund	1987	1	349	9		17	1	18	38	79	115
	1993	1	220	115		11	9	20			
Lampertheim	1987	1	349	9		17	1	18	38	79	115
	1993	1	220	115		11	9	20			

Fläche	Kalkung	Menge (t/ha)	Kalktyp							zu kompensierende Säuremenge	
			Ca (kg/ha)	Mg (kg/ha)	P (kg/ha)	Ca (kmolc)	Mg (kmolc)	SNK (kmolc)	Sum(SNK) (kmolc)	1983-2007 (kmolc)	bis 1983 (kmolc)
Dhronecken	1931	0									
	1931	2	1430			71		71			
Parzelle II+VIII	1931	4	2659			143		143			
	1931	0									
Parzelle IV+IX	1931	6	4289			214		214			
	1988	0								74	126
Parzelle III+VII	1988	6	769	260		38	21	59	130		
	1988	3	1538	519	127	77	43	119	262		
Parzelle V+XI	1988	6	1538	519	127	77	43	119	262		
	1988	9	2307	779	127	115	64	179	393		

2.3 Bestandesaufnahmen, Beprobung und Analysen

Die ertragskundlichen Aufnahmen wurden im 4- bis 5-jährigen Zyklus als BHD-Vollaufnahme mit Umfangmessband und als repräsentative Höhenmessung an einem festen Baumkollektiv zur Herleitung der Bestandeshöhenkurve durchgeführt. Die Versuchsbestände wurden nach den Vorgaben einer schwachen Hochdurchforstung unter Förderung der jeweils besten Bäume behandelt. Die Eingriffsstärken waren allgemein gering. Der Kronenzustand der Buchen auf den Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel ist nach dem Verfahren der Dauerbeobachtungsflächen Waldschäden (BMVEL 2001) erhoben worden. Die Kronenverlichtung und die Vergilbung sind je Parzelle an 50 (soweit vorhanden) vorherrschenden bis mitherrschenden Buchen in 5 %-Stufen eingeschätzt worden. Die erste Erhebung erfolgte 1984 (ohne Eutin), ab 1987 (inkl. Eutin) wurde der Kronenzustand jährlich erhoben.

Der Auflagehumus und der Mineralboden der Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel wurden 1990 und 1998 beprobt. In Dassel und Göhrde folgte 2004 eine weitere Beprobung. Pro Parzelle wurden 1990 und 1998 jeweils drei Einzelproben zu drei Mischproben zusammengefasst, 2004 wurden je Parzelle vier Mischproben aus je drei Einzelproben gebildet. Der Mineralboden wurde in den Tiefenstufen 0-5, 5-10, 10-20 und 20-40 cm, in Dassel und Göhrde 2004 zusätzlich auch in 40-60 cm Bodentiefe beprobt. Profilansprachen lagen nicht vor, so dass Trockenrohdichten und Skelettanteile für die Vorratsberechnung geschätzt werden mussten.

Die Blattprobennahme erfolgte an herrschenden Buchen aus der Lichtkrone. 1990 und 1997 wurden je ungekalkter/gekalkter Parzelle drei Buchen beprobt. Auf den Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel wurden in den Jahren 2004 und 2007 je Parzelle 8 Buchen geprobt. Je zwei Einzelproben wurden zu einer Mischprobe vereinigt und entsprechend vier Mischproben je Parzelle analysiert. Ergebnisse bodenchemischer Analysen und Analysen von Blattgehalten von den hessischen Flächen waren zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht verfügbar.

Bei der Probenvorbereitung und den chemischen Analysen wurden folgende Methoden angewandt: Effektive Austauschkapazität (Perkolation mit 1 N NH_4Cl), Elementaranalyse für Kohlenstoff und Stickstoff sowie SCHEIBLER für Carbonat und HNO_3 -Druckaufschluss bei den Blattproben. Diese Methoden sind zusammen mit den jeweils zugehörigen Probenvorbereitungsmethoden in KÖNIG u. FORTMANN (1996, 1999a und 1999b) beschrieben.

Die statistische Datenauswertung erfolgte mit SPSS 15.0.1 Inc.

3 Ergebnisse

3.1 Höhenwachstum

In den Abbildungen 2, 3 und 4 ist die Oberhöhe H_{100} über dem jeweiligen Alter der Buchen für die gekalkten und ungekalkten Parzellen (=Kontrolle) der Versuchsflächen dargestellt. Der Parameter H_{100} wurde gewählt, da die Oberhöhe stärker vom Standort und damit von einer Bodenschutzkalkung beeinflusst wird als von der Bestandesbehandlung wie Durchforstungsart und -stärke.

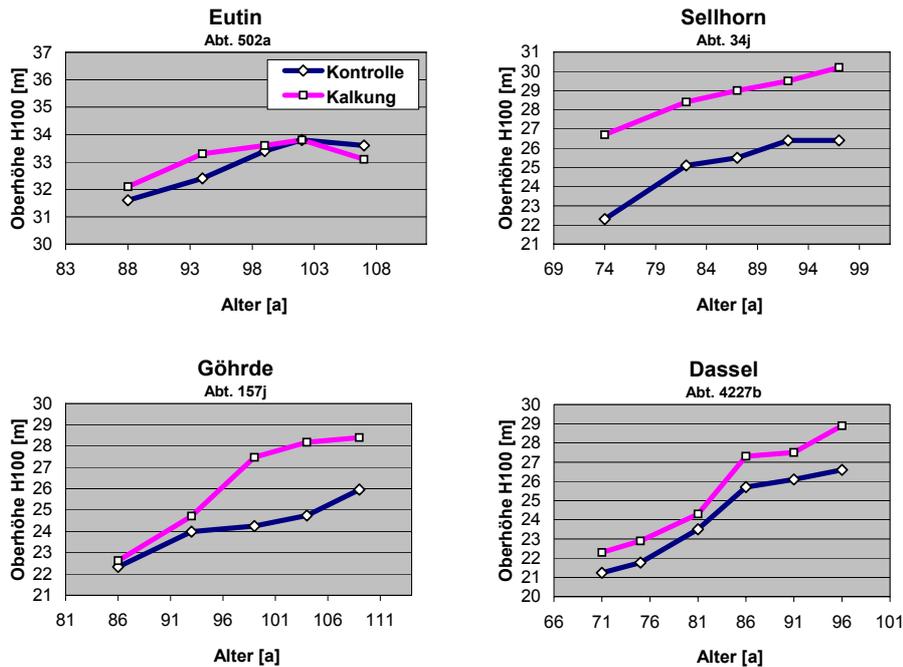


Abbildung 2: Oberhöhe H_{100} über dem Alter der gekalkten und ungekalkten Buchen in den Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel

Am deutlichsten zeigt sich ein Anstieg der Oberhöhe auf der gekalkten im Vergleich zur ungekalkten Parzelle auf der Fläche Göhrde (s. Abb. 2), hier sind bei etwa gleicher Ausgangshöhe im Alter 86 die gekalkten Buchen seit der dritten Aufnahme im Alter 99 durchschnittlich 2-3 m höher als die ungekalkten. Diese Tendenz weisen auch die gekalkten Buchen in Dassel auf. In Sellhorn ist bereits das Ausgangsniveau zu Beginn der Versuchsreihe sehr unterschiedlich. Dies lässt auf entsprechende standörtliche Unterschiede der Parzellen bereits zu Beginn des Versuches schließen. In Eutin liegen die Oberhöhen der gekalkten und ungekalkten Parzelle im gesamten Beobachtungszeitraum eng zusammen, hier flachen beide

Oberhöhenkurven ab dem Alter 103 ab, was auf die gekalkte Parzelle etwas stärker zutrifft.

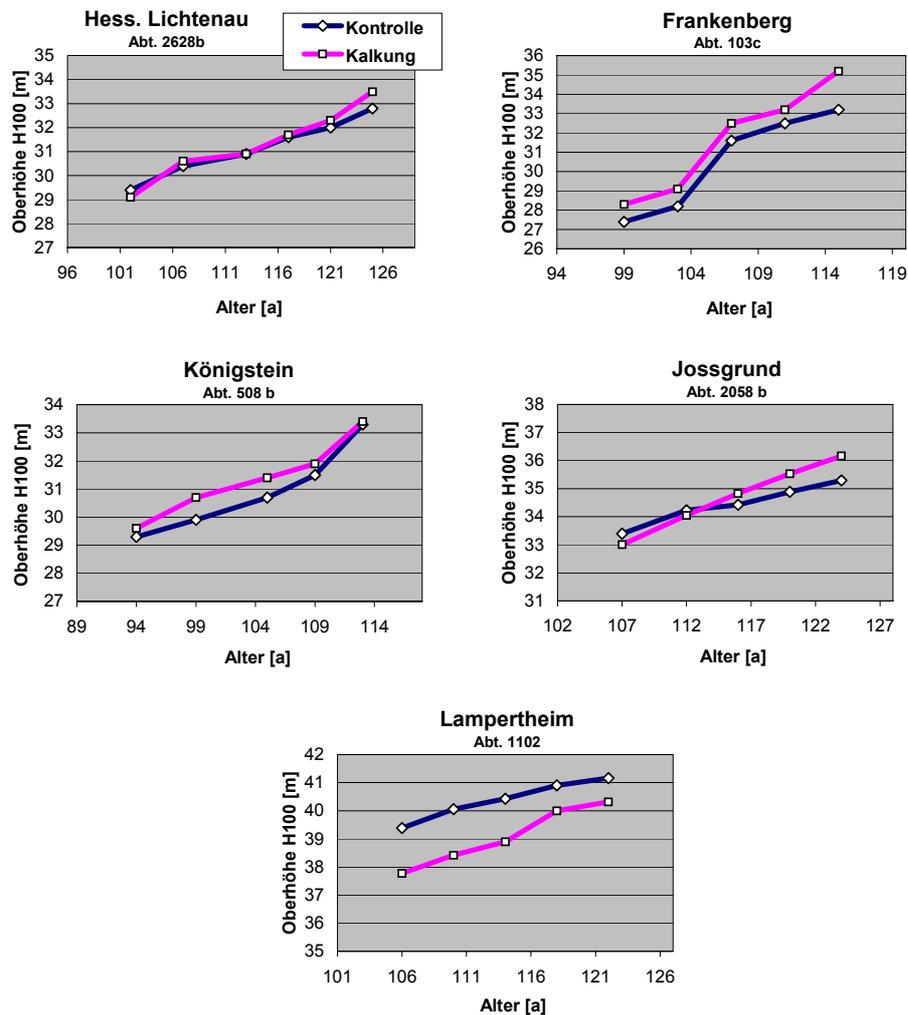


Abbildung 3: Oberhöhe H_{100} über dem Alter der gekalkten und ungekalkten Buchen in den Flächen Hess. Lichtenau, Frankenberg, Königstein, Jossgrund und Lampertheim

Ein gegenüber der Kontrolle gesteigertes Höhenwachstum zeigt sich bei den hessischen Versuchen bei den gekalkten Buchen in der Fläche Jossgrund, Frankenberg und relativ auch in Lampertheim (s. Abb. 3). In Hess. Lichtenau und Königstein sind die Unterschiede zwischen gekalkten und ungekalkten Buchen gering.

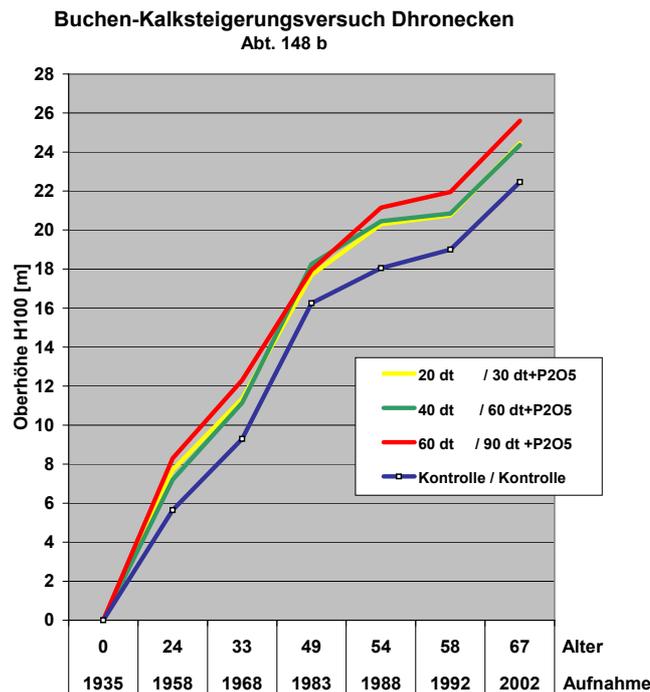


Abbildung 4: Oberhöhe H_{100} über dem Alter der gekalkten und ungekalkten Buchen im Kalksteigerungsversuch Dhronecken

Die Oberhöhen der gekalkten Buchen im Kalksteigerungsversuch Dhronecken liegen über denen in den Kontrollflächen (s. Abb. 4). Die Variante mit den höchsten Oberhöhen ist zugleich die mit der höchsten Kalkausbringungsmenge, allerdings sind die Unterschiede zu den Varianten mit geringeren Kalkausbringungsmengen nicht sehr deutlich. In Dhronecken konnten SPELLMANN und MEIWES (1995) bereits deutliche Zuwachseffekte bei der Gesamtwuchsleistung von über 40 % Mehrleistung durch die Kalkung nachweisen.

Da die Kalkungen und Bestandesaufnahmen in unterschiedlichen Jahren durchgeführt wurden und die Bestände unterschiedliche Alter haben, wurde für einen summarischen Vergleich des Kalkungseffektes auf die Oberhöhe H_{100} die Differenz zwischen End- und Anfangsoberhöhe gebildet. Im t-Test für abhängige Stichproben ließ sich unter dem 5 %-Niveau über alle Flächen ein Unterschied von 0,7 m zugunsten der gekalkten Buchen nachweisen (s. Tab. 3). Unter Ausschluss von Eutin (mergelbeeinflusst) ergab sich ein höheres Signifikanzniveau von 0,01 für knapp 1 m höhere H_{100} bei den gekalkten Buchen.

Tabelle 3: Höhenzuwachs (H_{100}) im Beobachtungszeitraum nach Flächen und Behandlung (Kalk% = Höhenzuwachs H_{100} der gekalkten Flächen in % der Kontrolle)

Höhenzuwachs (m) im Beobachtungszeitraum				
Flächen	Kalkung	Kontrolle	Kalk%	p
Eutin	1,0	2,0	50	
Sellhorn	3,5	4,1	85	
Göhrde	5,8	3,6	159	
Dassel	6,6	5,4	123	
Hess. Lichtenau	4,4	3,4	129	
Frankenberg	6,9	5,8	119	
Königstein	3,8	4,0	95	
Jossgrund	3,2	1,9	167	
Lampertheim	2,6	1,5	172	
Dhronecken	17,1	15,9	108	
Mittel	5,5	4,8	120,8	0,045
Mittel (ohne Eutin)	6,0	5,1	128,7	0,010

Zusammenfassend zeigt sich ein positiver Einfluss der Bodenschutzkalkung auf die Entwicklung der Oberhöhen der Buchen, am deutlichsten in den Versuchen Göhrde und Dhronecken. Ein Kalkungseffekt auf das Höhenwachstum ist jedoch nicht auf allen Flächen festzustellen. Eutin ist die einzige Fläche, bei der ein Rückgang der Oberhöhe auf der gekalkten gegenüber der ungekalkten Parzelle aufgetreten ist. Bei diesem Standort war ein Kalkungseffekt auf das Höhenwachstum auch nicht zu erwarten, da von einer Durchwurzelung von nährstoffreichen Schichten (hier Mergel) auszugehen ist.

3.2 Kronenverlichtung und Vergilbung

Die mittleren Kronenverlichtungen und Vergilbungen der Buchenkronen liegen überwiegend zwischen 20 und 40 % und sind damit nach der Nomenklatur der Waldzustandserhebung schwach bis mittelstark geschädigt (s. Abb. 5). Während auf den Flächen Sellhorn, Göhrde und Dassel die Kronenverlichtungen der Buchen zu Beginn der Messreihen 1984 auf jeweils beiden Parzellen bei rund 10 % lagen und sich im Zeitverlauf auf durchschnittlich 25 % erhöhten, haben die Buchen auf der Fläche Eutin bereits bei der ersten Erhebung 1987 eine relativ hohe durchschnittliche Kronenverlichtung aufgewiesen und bis 2005 beibehalten.

Die mittleren Kronenverlichtungen der gekalkten Buchen sind geringer als die Werte der ungekalkten Buchen. Bei den Versuchsflächen Eutin und Sellhorn weichen die jährlichen Mittelwerte der durchschnittlichen Kronenverlichtung zwischen den gekalkten und ungekalkten Buchen kaum voneinander ab. In Sellhorn ist das Niveau der Verlichtungen der gekalkten Buchen zwischen 1993 und

1998 deutlich geringer als die mittleren Verlichtungswerte der ungekalkten Buchen. In den Versuchsflächen Gührde und Dassel sind die gekalkten Buchen bei gleichem Ausgangsniveau besser belaubt als die ungekalkten Buchen. In Gührde ist dies am deutlichsten.

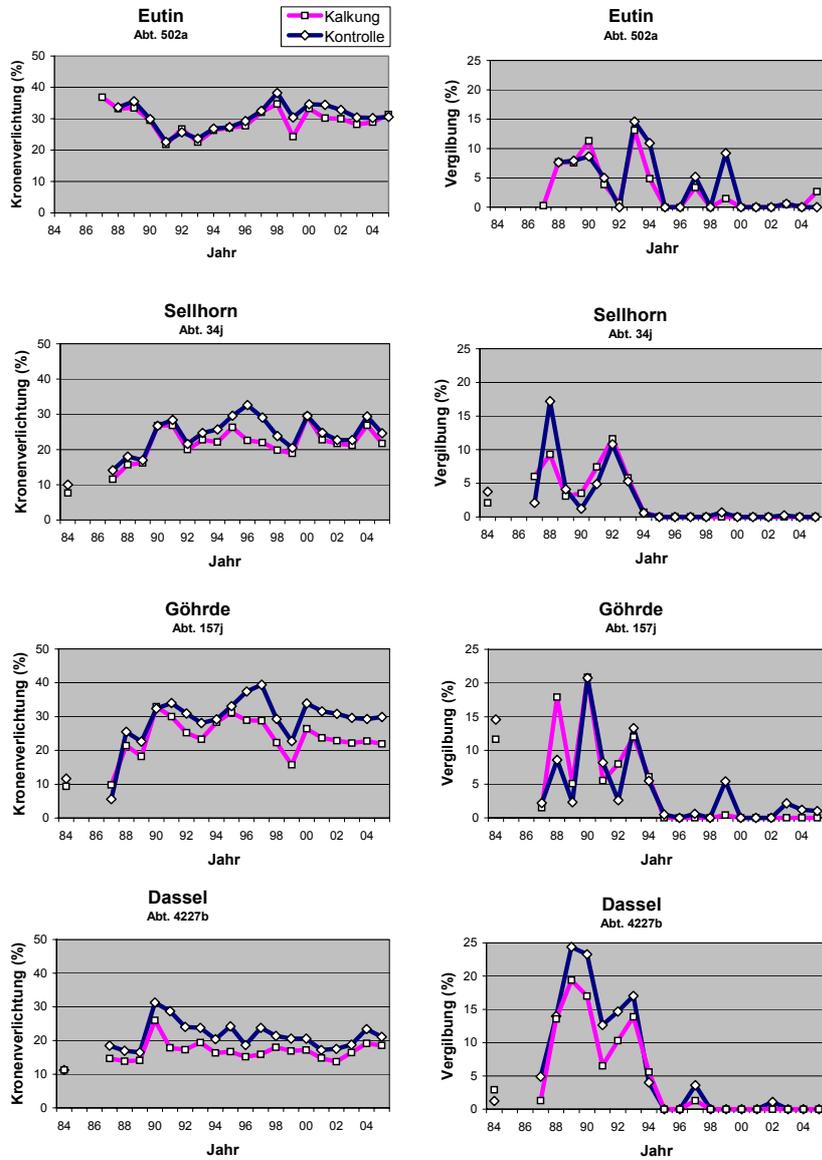


Abbildung 5: Mittlere Kronenverlichtung (links) und mittlere Vergilbung (rechts) der gekalkten und ungekalkten Buchen in den Flächen Eutin, Sellhorn, Gührde und Dassel

Bei der mittleren Vergilbung der Buchen auf allen Parzellen der Versuchsflächen zeigt sich ein klarer Rückgang unabhängig von der Bodenschutzkalkung. Ab 1994 sind Vergilbungen nur noch vereinzelt zu beobachten. Die Unterschiede zwischen dem Vergilbungsgrad der gekalkten und ungekalkten Buchen sind gering, lediglich in Dassel weisen die gekalkten Buchen zeitweise geringere Vergilbungen auf als die ungekalkten Buchen. In Einzelfällen waren die gekalkten Buchen stärker vergilbt, so z. B. in Göhrde 1988.

In Tabelle 4 sind die mittlere Kronenverlichtung und Vergilbung über den gesamten Beobachtungszeitraum für die jeweiligen Flächen und im Mittel nach Behandlung gekalkt/ungekalkt angegeben. Im t-Test für abhängige Stichproben ergaben sich hochsignifikante geringere mittlere Kronenverlichtungen bei den gekalkten Buchen im Vergleich zu den ungekalkten. Diese Unterschiede waren in Göhrde und Dassel am höchsten, in Sellhorn geringer und in Eutin am geringsten. Im Mittel ergab sich eine um 3,4 %-Punkte geringere Kronenverlichtung bei den gekalkten Buchen; diese Differenz ist zwar relativ gering, aber bei einem Standardfehler von 0,29 und dem hohen Signifikanzniveau gut abgesichert. Bezüglich der Vergilbung zeigten sich zwischen den gekalkten und jeweils ungekalkten Buchen nur sehr geringe Unterschiede, die sich nur in Dassel mit geringer vergilbten Buchen in der Kalkungsparzelle absichern ließen. Bei den geringen Werten der durchschnittlichen Vergilbung sind diese Unterschiede von geringer Relevanz.

Zusammenfassend zeigt sich ein relativ geringer, aber positiver Einfluss der Bodenschutzkalkung auf die Belaubungsdichte der Buche. Die Unterschiede bei der Vergilbung zwischen gekalkten und ungekalkten Buchen sind gering, ab 1994 werden für beide Behandlungen nur selten Vergilbungen festgestellt.

Tabelle 4: Mittlere Kronenverlichtung und mittlere Vergilbung im Beobachtungszeitraum nach Flächen und Behandlung (Diff = mittlere Differenz, SD = Standardabweichung, SDF = Standardfehler der Diff., p = Signifikanzniveau)

Mittlere Kronenverlichtung 1984 - 2005 (%)							
Flächen	N	Kalkung	Kontrolle	Diff.	SD	SDF	p
Eutin	18	28,9	30,5	1,52	1,79	0,42	0,002
Sellhorn	20	21,2	23,7	2,40	2,58	0,58	0,001
Göhrde	20	23,3	28,3	5,08	3,58	0,80	0,000
Dassel	20	16,7	20,9	4,26	2,41	0,54	0,000
Mittel	78	22,4	25,7	3,40	3	0,29	0,000

Mittlere Vergilbung 1984 - 2005 (%)							
Flächen	N	Kalkung	Kontrolle	Diff.	SD	SDF	p
Eutin	18	3,2	3,9	0,70	2,54	0,60	0,256
Sellhorn	20	2,5	2,5	0,07	2,23	0,50	0,894
Göhrde	20	4,5	4,4	-0,01	3,03	0,68	0,991
Dassel	20	4,6	6,1	1,46	2,45	0,55	0,015
Mittel	78	3,7	4,2	0,50	2,6	0,29	0,065

3.3 Bodenchemische Untersuchungen

3.3.1 Auflagehumus

Die aus den Beprobungen und chemischen Analysen berechneten Kohlenstoff- und Calciumvorräte sind in der Abbildung 6, die Mittelwerte mit statistischen Kennwerten und Testergebnissen in Tabelle 5 dargestellt. Diese beiden Elemente wurden beispielhaft aus den Analyseergebnissen zur Darstellung von Behandlungseffekten beim Auflagehumus und Mineralboden ausgewählt: Kohlenstoff deswegen, weil es in allen organischen Geweben als wichtigstes Element vertreten und im Rahmen der Kohlenstoffbindung von besonderem Interesse ist und Calcium, weil hier die stärksten Kalkungseffekte zu erwarten waren.

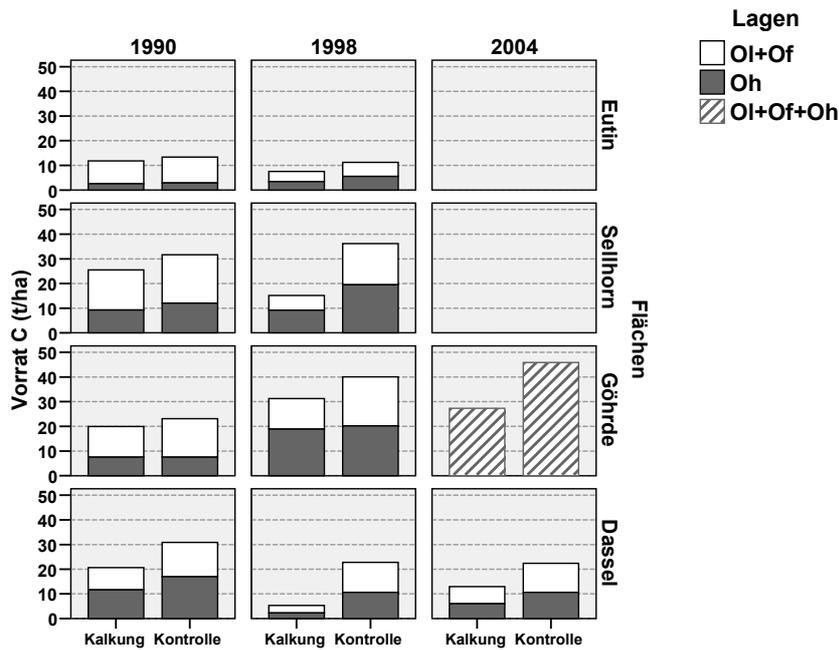


Abbildung 6: Kohlenstoffvorrat im Auflagehumus (t/ha) getrennt nach Humuslagen für die Jahre 1990, 1998 und 2004 für die Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel nach Kalkung und ungekalkter Kontrolle

In allen gekalkten Parzellen sind die Kohlenstoffvorräte zum jeweiligen Zeitpunkt der Probennahme geringer als in den ungekalkten. Die Unterschiede finden sich nicht nur bei den jeweiligen Ol- und Of-Lagen, sondern auch in der Oh-Lage. In der Versuchsfläche Göhrde konnten infolge intensiven Wühlens durch Schwarzwild die Lagen des Auflagehumus 2004 nicht mehr sinnvoll getrennt werden, daher

sind die Auflagehumusvorräte dort nicht mehr getrennt nach ihren Lagen dargestellt.

Bezogen auf die jeweiligen Probennahmen und Einzelflächen ist die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte unterschiedlich: In Eutin nehmen die Vorräte leicht ab, wobei 1998 die Kohlenstoffvorräte in der Ol- und Of-Lage geringer, in der Oh-Lage höher sind. In der Fläche Görde dagegen nehmen die Kohlenstoffvorräte sowohl in der gekalkten als auch in der ungekalkten Parzelle im Auflagehumus eher zu. Dies trifft auch für Sellhorn bei der ungekalkten Parzelle zu, in der gekalkten Parzelle nehmen die Vorräte hingegen ab. In Dassel dagegen kommt es zu einer Abnahme der Humusvorräte in der Kontrolle von 1990 zu 1998, von 1998 zu 2004 bleibt der Kohlenstoffvorrat in der Kontrolle konstant. In der gekalkten Parzelle ist zunächst eine Abnahme, dann eine Zunahme der Vorräte zu beobachten.

Die Unterschiede zwischen den Humusvorräten insgesamt auf den gekalkten zu den ungekalkten Parzellen nehmen von 1990 zu 1998 zu (s. Tab. 5). Zwischen den Behandlungen Kalkung gegen Kontrolle lassen sich diese Unterschiede nicht für 1990, doch für die Jahre 1998 und 2004 und für alle Jahre insgesamt signifikant absichern.

Tabelle 5: *Mittlere Kohlenstoff- und Calciumvorräte im Auflagehumus, statistische Kennwerte und Testergebnisse für die Jahre 1990, 1998 und 2004 sowie den gesamten Zeitraum nach Versuchsbehandlung (N = Anzahl der Mischproben, MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung, STF = Standardfehler des MW, p = Signifikanzniveau)*

Jahr	Behandlung	N	C t/ha Auflagehumus				Ca kg/ha Auflagehumus					
			MW	SD	STF	p	MW	SD	STF	p		
1990	Kalkung	12	19,1	6,8	2,0	0,103	t-Test	907	407	117	0,000	Mann-Whitney-U
	Kontrolle	12	24,5	8,8	2,5			273	244	70		
1998	Kalkung	12	14,5	11,3	3,3	0,014	t-Test	932	746	215	0,000	Mann-Whitney-U
	Kontrolle	12	27,6	12,6	3,6			163	36	10		
2004	Kalkung	8	20,1	7,8	2,8	0,026	t-Test	1040	555	196	0,000	Mann-Whitney-U
	Kontrolle	8	34,1	13,9	4,9			175	54	19		
Mittel	Kalkung	32	17,6	9,0	1,6	0,000	t-Test	950	573	101	0,000	Mann-Whitney-U
	Kontrolle	32	28,1	11,9	2,1			207	158	28		

Insgesamt steigen die mittleren Kohlenstoffvorräte der ungekalkten Parzellen von 24,5 t/ha im Jahre 1990 über 27,6 t/ha 1998 auf 34,1 t/ha 2004 an, wogegen der Kohlenstoffvorrat bei den gekalkten Parzellen von 19,1 (1990), 14,5 (1998) und 20,1 (2004) t/ha eher auf ähnlichem Niveau geblieben ist. Über alle Jahre hinweg ergibt sich bei den ungekalkten Parzellen ein mittlerer Kohlenstoffvorrat von 28,1 t/ha, bei den gekalkten Parzellen ein Mittel von 17,6 t/ha. Hier sind jedoch die hohen Standardabweichungen im Zusammenhang mit den grundsätzlichen Schwierigkeiten einer repräsentativen Humusbeprobung im Wald zu beachten, die die Interpretation dieser Ergebnisse einschränken.

Die Calciumvorräte im Auflagehumus sind mit Ausnahme der Fläche Dassel 1990 in allen gekalkten Parzellen erwartungsgemäß deutlich höher als in den Kontrollparzellen (s. Abb. 7). Dies lässt sich für alle Jahre hochsignifikant absichern (s. Tab. 5). Im zeitlichen Verlauf verlagert sich der Hauptanteil des Calciumvorrats von der Ol- und Of-Lage (1990) hin zur Oh-Lage (1998, vor allem Sellhorn und Göhrde). Die Calciumvorräte bleiben in den einzelnen Jahren je Fläche und Variante relativ konstant mit Ausnahme der gekalkten Fläche Göhrde.

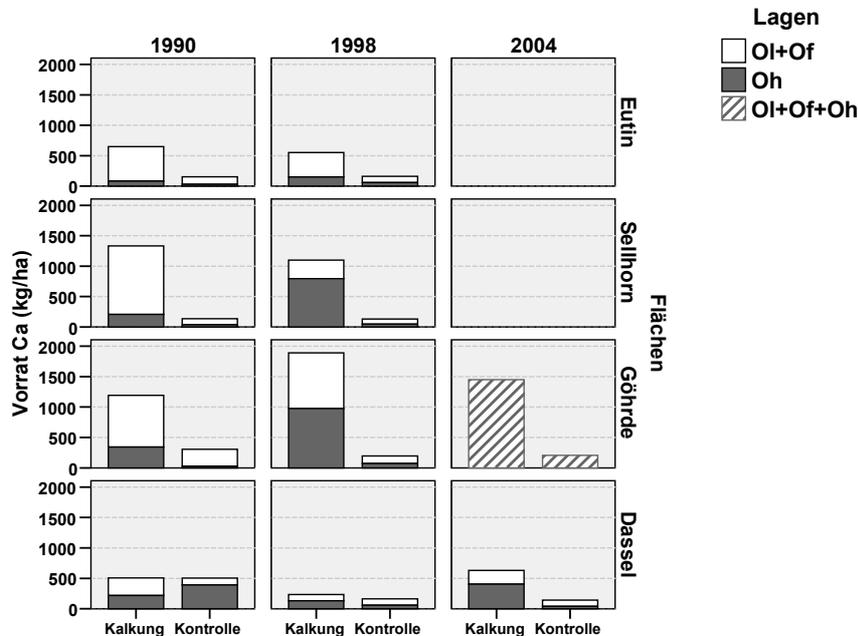


Abbildung 7: Calciumvorrat im Auflagehumus (kg/ha) getrennt nach Humuslagen für die Jahre 1990, 1998 und 2004 für die Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel nach Kalkung und ungekalkter Kontrolle

3.3.2 Mineralboden

Für die Beschreibung der Unterschiede der chemischen Eigenschaften des Mineralbodens hinsichtlich Kalkung und Kontrolle wurden die Basensättigung sowie analog zum Auflagehumus die Kohlenstoff- und Calciumvorräte ausgewählt.

Die Basensättigung der Kontrollflächen liegt in allen Erhebungsjahren in den Tiefenstufen unter 20 %, die Standorte sind damit nach dem ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003) als basenarm zu klassifizieren. Die Ausnahme bildet die Basensättigung von 30 % der Tiefenstufe 0-5 cm 1990 auf der Fläche

Sellhorn. Insgesamt variieren die Basensättigungswerte der Kontrollflächen kaum zwischen den Erhebungszeitpunkten (s. Abb. 8).

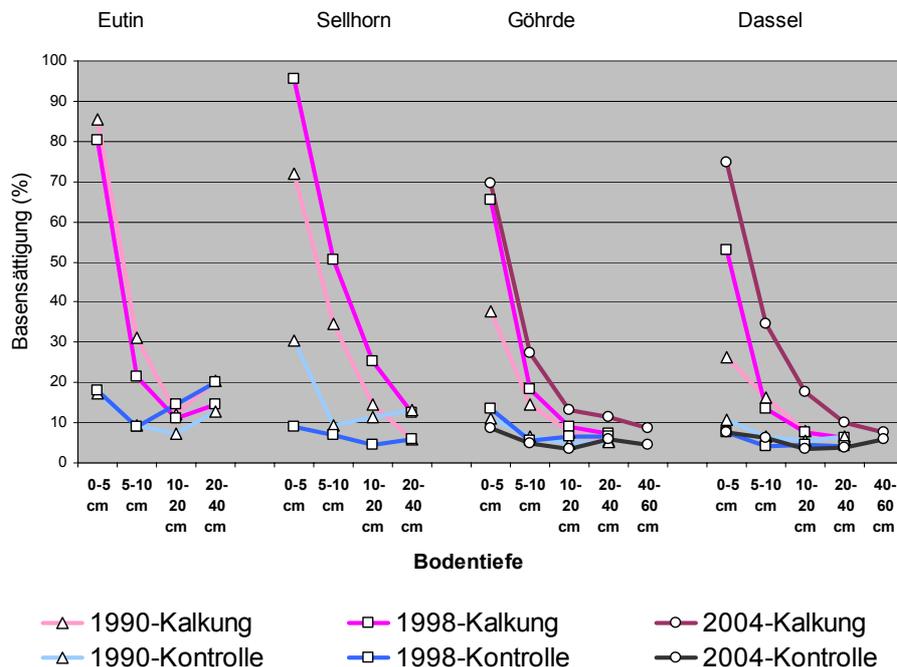


Abbildung 8: Basensättigung nach Tiefenstufen in den Jahren 1990, 1998 und 2004 für die Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel nach Varianten Kalkung und ungekalkter Kontrolle

Nach der Kalkung ist für alle Kalkungspartellen eine Verbesserung der Basensättigung festzustellen. Die Kalkung hat vor allem in den oberen Bodenschichten (bis 10 cm) eine deutliche Steigerung der Basensättigung bewirkt, so dass diese Tiefenstufen in den Beprobungsjahren 1998 und 2004 als basenreich bezeichnet werden können. Auf der Fläche Sellhorn ist eine deutliche Erhöhung der Basensättigung auch in einer Bodentiefe von 10-20 cm im Jahre 1998 erkennbar. Die Flächen Göhrde und Dassel zeigen 2004 sogar einen Anstieg der Basensättigung bis in die Tiefenstufe 20-40 cm und teilweise auch 40-60 cm. Mit Ausnahme von Eutin erhöht sich in allen Flächen die Basensättigung in den jeweiligen Tiefenstufen mit jeder zusätzlichen Kalkung. Eine Basensättigung zwischen 30 und 50 % wird als Gleichgewichtszustand mittlerer Waldstandorte angesehen (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2003).

In Abbildung 9 sind die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden nach Tiefenstufen bis 10 cm Bodentiefe dargestellt. Die Grenze bis 10 cm Bodentiefe wurde

gewählt, da vor allem in oberen Mineralbodenbereichen von Kalkungseffekten auszugehen ist.

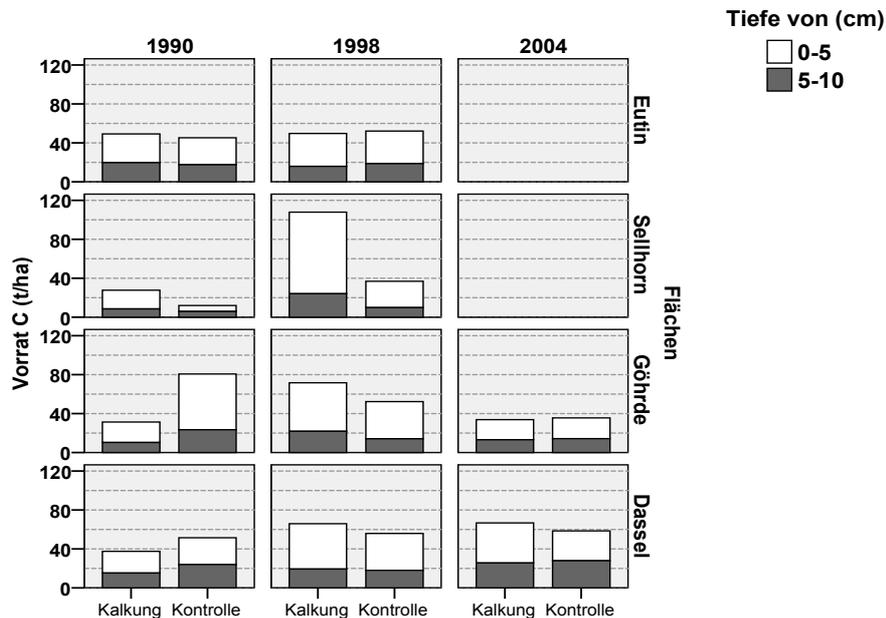


Abbildung 9: Kohlenstoffvorrat im Mineralboden (t/ha) getrennt nach Tiefenstufen für die Jahre 1990, 1998 und 2004 für die Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel nach Kalkung und ungekalkter Kontrolle

1990 sind die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe in den gekalkten Parzellen in Eutin und Sellhorn höher, in Göhrde und Dassel geringer als in der Kontrolle. 1998 liegen die Kohlenstoffvorräte dieser Bodenschicht in den gekalkten Parzellen über den Kontrollen (Ausnahme Eutin). 2004 sind die Kohlenstoffvorräte zwischen Kalkung und Kontrolle in Göhrde nahezu gleich, in Dassel in der Kalkungsvariante höher im Vergleich zur Kontrolle. Der überhöhte Kohlenstoffvorrat der gekalkten Parzelle in Sellhorn 1998 in 0-5 cm Bodentiefe ist nicht plausibel. Da alle 3 Wiederholungen ähnlich hohe Kohlenstoffgehalte aufweisen, die Laborwerte überprüft und keine besonderen Ereignisse bei der Beprobung gemeldet wurden, ist der Wert mit dargestellt. Von 1990 zu 1998 gab es insgesamt über alle Flächen bei den Kalkungsparzellen eine Zunahme der Kohlenstoffvorräte (rechnerisch von 36,5 auf 73,8 t/ha bzw. 62,4 t/ha ohne Sellhorn), von 1998 zu 2004 wieder eine Abnahme auf rechnerisch 50,3 t/ha. Die Kohlenstoffvorräte der Kontrollparzellen sind über diesen Zeitraum mit Werten zwischen 45 und 48 t/ha relativ konstant geblieben. Die Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen lassen sich für 1998 auch statistisch absichern (s. Tab. 6).

Die austauschbaren Calciumvorräte bis in 40 cm Bodentiefe sind für die Beprobungsjahre und Flächen nach Kalkung und Kontrolle in Abbildung 10 dargestellt. Im Jahr 1990 sind die Calciumvorräte in allen Parzellen mit 60 kg/ha Calcium für alle gekalkten Parzellen und 18 kg/ha für die jeweiligen Kontrollen nach der Bewertung des ARBEITSKREISES STANDORTSKARTIERUNG (2003) sehr gering. 1998 und 2004 sind die Calciumvorräte der gekalkten Parzellen mit durchschnittlich knapp 1000-1400 kg/ha im mittleren Bereich, und zwar überwiegend in der Tiefenstufe 0-5 cm. Die hohen Calciumvorräte in 20-40 cm Bodentiefe 1998 sowohl in der Kontrolle als auch in der gekalkten Parzelle in Eutin sind vermutlich auf den dort vorkommenden Mergel zurückzuführen, der 1990 bei der Beprobung nicht getroffen wurde.

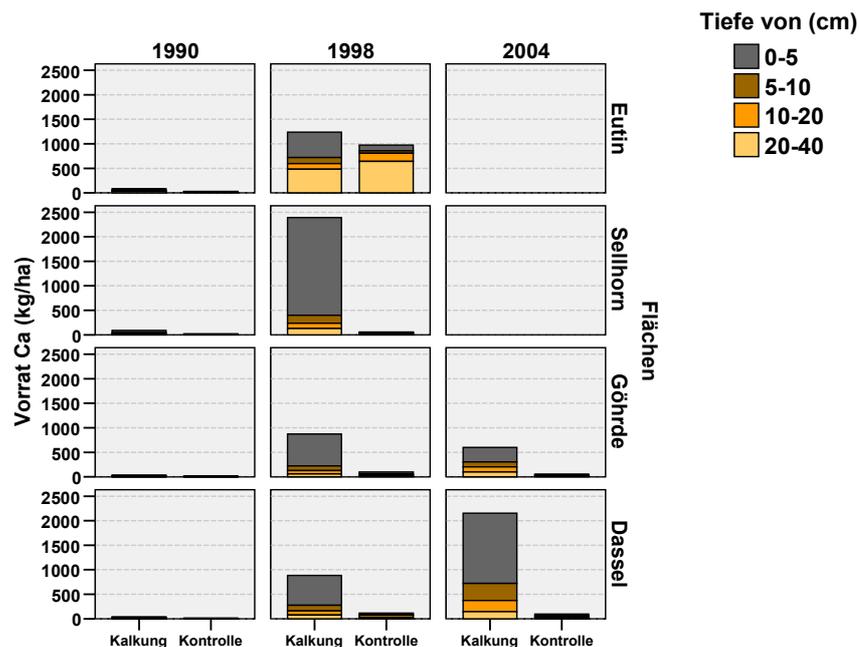


Abbildung 10: Calciumvorrat im Mineralboden (kg/ha) getrennt nach Tiefenstufen für die Jahre 1990, 1998 und 2004 für die Flächen Eutin, Sellhorn, Göbrde und Dassel nach Kalkung und ungekalkter Kontrolle

Die Calciumvorräte zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen sind für alle Jahre und das Gesamtergebnis hochsignifikant abgesichert (s. Tab. 6).

Tabelle 6: Mittlere Kohlenstoff- und Calciumvorräte im Mineralboden, statistische Kennwerte und Testergebnisse für die Jahre 1990, 1998 und 2004 sowie den gesamten Zeitraum nach Versuchsbehandlung (N = Anzahl der Mischproben, MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung, STF = Standardfehler des MW, p = Signifikanzniveau)

Jahr	Behandlung	N	C t/ha Mineralboden 0-10 cm				Ca kg/ha Mineralboden 0-40 cm					
			MW	SD	STF	p	MW	SD	STF	p		
1990	Kalkung	9	36,5	10,1	3,4	0,340	t-Test	60	29	10	0,000	Mann-Whitney-U
	Kontrolle	9	47,8	32,7	10,9			18	10	3		
1998	Kalkung	12	73,8	26,0	7,5	0,003	t-Test	1346	705	204	0,000	t-Test
	Kontrolle	12	44,6	16,5	4,8			307	505	146		
1998*	Kalkung	9	62,4	14,6	4,9	0,069	t-Test					
	Kontrolle	9	47,2	18,3	6,1							
2004	Kalkung	8	50,3	25,8	9,1	0,758	t-Test	1377	1181	418	0,000	Mann-Whitney-U
	Kontrolle	8	47,1	13,2	4,7			74	37	13		
Mittel	Kalkung	29	55,7	27,0	5,0	0,145	t-Test	956	958	178	0,000	t-Test
	Kontrolle	29	46,3	21,4	4,0			153	344	64		

* ohne Sellhorn

3.4 Calcium-, Magnesium- und Kaliumgehalte der Buchenblätter

Die Calciumgehalte der Buchenblätter der gekalkten Buchen liegen überwiegend im Bereich einer sehr hohen Calciumversorgung, die entsprechenden Gehalte in der Kontrolle mit Ausnahme der analysierten Buchenblätter in Eutin im mittleren bis geringen Bereich (s. Abb. 11) nach der Bewertung des ARBEITSKREISES STANDORTSKARTIERUNG (2003). Diese Unterschiede lassen sich für jedes Probennahmejahr signifikant absichern, ab 1997 hochsignifikant (s. Tab. 7).

Die Probennahme in der Fläche Eutin in den Jahren 1990 und 1997 erfolgte versehentlich für beide Parzellen aus ungekalkten Bereichen der Versuchsfläche, daher sind diese Werte aus der Auswertung ausgeschlossen worden.

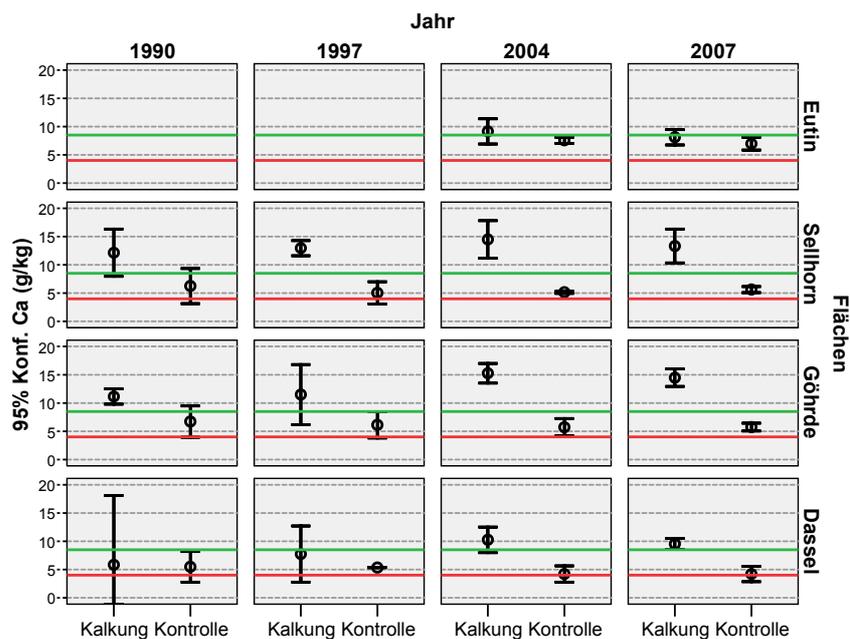


Abbildung 11: Konfidenzintervalle der Calciumgehalte in Buchenblättern für die Jahre 1990, 1997, 2004 und 2007 für die Flächen Eutin, Sellhorn, Göhrde und Dassel nach Kalkung und ungekalkter Kontrolle (unterhalb der roten Linie sehr geringe, oberhalb der grünen Linie sehr hohe Calcium-Versorgung der Buchenblätter)

Die Magnesiumgehalte der Buchenblätter auf den gekalkten Parzellen sind 1990 noch nahezu gleich im Vergleich zur Kontrolle, doch ab 1997 höher als diese (s. Tab. 7). Dies lässt sich für 1997 signifikant und 2004, 2007 sowie über alle Jahre hinweg hochsignifikant absichern. Ab 2004 liegen die Magnesiumgehalte der Buchenblätter in den gekalkten Parzellen im sehr hohen, die der Kontrollen im mittleren Bewertungsbereich (Bewertung nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Bei den Kaliumgehalten zeigt sich ein anderes Bild: Die Kaliumgehalte der Buchenblätter sind in den gekalkten Parzellen 1990 und 1997 noch im hohen, 2004 und 2007 nur noch im (oberen) geringen Bewertungsbereich. Die entsprechenden Werte der Kontrollparzellen behalten im Auswertungszeitraum ein einheitliches Niveau bei und liegen damit stets über den jeweiligen Werten der Kalkungsparzellen. Diese Unterschiede lassen sich ab 1997 über alle Jahre hochsignifikant absichern.

Tabelle 7: Mittlere Calcium-, Magnesium- und Kaliumgehalte in Buchenblättern, statistische Kennwerte und Testergebnisse für die Jahre 1990, 1997, 2004 und 2007 sowie den gesamten Zeitraum nach Versuchsbehandlung (N = Anzahl, MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung, STF = Standardfehler des MW, p = Signifikanzniveau)

Jahr	Behandlung	N	MW	SD	STF	p	
			g/kg				
1990							
Ca	Kalkung	9	9,71	3,93	1,31	0,028	T-Test
	Kontrolle	9	6,16	1,14	0,38		
Mg	Kalkung	9	0,93	0,47	0,16	0,703	T-Test
	Kontrolle	9	0,86	0,27	0,09		
K	Kalkung	9	6,90	1,68	0,56	0,436	T-Test
	Kontrolle	9	7,65	2,26	0,75		
1997							
Ca	Kalkung	12	10,73	2,77	0,92	0,000	T-Test
	Kontrolle	12	5,51	0,78	0,26		
Mg	Kalkung	12	0,89	0,26	0,09	0,042	T-Test
	Kontrolle	12	0,66	0,18	0,06		
K	Kalkung	12	7,02	2,05	0,68	0,006	T-Test
	Kontrolle	12	9,68	1,46	0,49		
2004							
Ca	Kalkung	16	12,29	3,05	0,76	0,000	T-Test
	Kontrolle	16	5,66	1,41	0,35		
Mg	Kalkung	16	2,82	0,37	0,09	0,000	T-Test
	Kontrolle	16	1,05	0,34	0,09		
K	Kalkung	16	5,47	0,53	0,13	0,000	T-Test
	Kontrolle	16	7,52	1,01	0,25		
2007							
Ca	Kalkung	16	11,36	2,91	0,73	0,000	T-Test
	Kontrolle	16	5,64	1,15	0,29		
Mg	Kalkung	16	2,20	0,40	0,10	0,000	T-Test
	Kontrolle	16	0,95	0,27	0,07		
K	Kalkung	16	5,43	1,07	0,27	0,000	T-Test
	Kontrolle	16	7,72	1,31	0,33		
Mittel							
Ca	Kalkung	50	11,25	3,17	0,44	0,000	U-Test
	Kontrolle	50	5,71	1,17	0,13		
Mg	Kalkung	50	1,93	0,90	0,13	0,000	U-Test
	Kontrolle	50	0,91	0,31	0,04		
K	Kalkung	50	6,00	1,46	0,21	0,000	T-Test
	Kontrolle	50	8,00	1,63	0,23		

4 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen insgesamt eine positive Wirkung der Kalkung auf die Vitalität der Buche: Über alle Versuchsflächen hinweg konnte für eine Beobachtungsperiode von 25 Jahren (Dhronecken 70 Jahre) eine knapp 1 m höhere Oberhöhe (H_{100}) für die gekalkten Buchen nachgewiesen werden. Auch die mittleren Kronenverlichtungen der gekalkten Buchen sind signifikant geringer als die der ungekalkten Kontrollen, allerdings sind die Unterschiede nicht sehr hoch. Geringere Vergilbungen der gekalkten Buchen konnten bei einer Versuchsfläche abgesichert werden. Die Blattgehalte der gekalkten Buchen sind für Calcium und Magnesium signifikant erhöht und befinden sich im Bewertungsbereich mittlerer bis sehr hoher Gehalte, wogegen die jeweiligen Blattgehalte der Buchen auf den ungekalkten Parzellen im geringen bis teilweise im mittleren Versorgungsbereich liegen.

In Niedersachsen konnten DAMMANN et al. (2003) bereits bei Rotfichten bei der Untersuchung von acht Vergleichsflächen eine ähnliche Wirkung der Bodenschutzkalkung nachweisen. Auf den gekalkten Flächen stellten sich günstigere Benadelungsdichten, geringere Vergilbungen und erhöhte Grundflächenzuwächse im Vergleich zu den nicht gekalkten Kontrollen ein. Rotfichten mit dichterem Benadelung wiesen zudem bessere Zuwachsraten auf als Rotfichten mit höherem Verlichtungsgrad. Es wird aber auch von Versuchen zur Rotfichte und Tanne berichtet, wo die Bodenschutzkalkung keine oder nur vereinzelt positive Effekte hatte (ALDINGER u. KREMER 1985, ALDINGER 1983).

Nach KRAMER (1988) gibt es zahlreiche ertragskundliche Untersuchungen über den Einfluss des Standortes auf das Wachstum der Buche (u. a. RÖHE 1985). Danach beeinflussen die Nährstoffverhältnisse des Bodens, insbesondere der Stickstoffvorrat, den Zuwachs der Buchen stärker als beispielsweise den der Fichte. SPELLMANN u. MEIWES (1995) zeigten, dass im Voranbau- und Kalksteigerungsversuch Dhronecken durch Bodenbearbeitung ein begrenzter, durch Kalkung mit zunehmender Dosierung ein deutlicher Volumenzuwachseffekt erzielt werden kann. Gleichzeitig kam es zu einem Verlust an Feinhumusvorrat und Stickstoff im Auflagehumus, zumal bei der ersten Kalkung sich schnell auflösender Branntkalk ausgebracht wurde. Damit induzierte die Kalkung einen beschleunigten Abbau der Rohhumusdecken und eine Stickstoffmobilisierung. Die größte Wirkung zeigte sich beim Höhenzuwachs: Bis zum Ende des Dickungsstadiums lagen die Buchen der Variante mit der größten Kalkausbringungsmenge um 1,5 Ertragsklassen über den Buchen der Kontrolle.

Ein derart starker Effekt der Kalkung konnte auf den hier betrachteten Vergleichspaaren der Monitoringflächen aus dem Bodenschutzkalkungsprogramm mit praxisüblicher Ausbringung von kohlenstoffreichem Magnesiumkalk und ungekalkter Kontrolle nicht nachgewiesen werden. Die entsprechenden Versuchsflächen wurden in einem Bestandesalter zwischen 71 und 107 Jahren angelegt und liegen

demzufolge in einem Altersbereich weit jenseits der Kulmination des Höhenwachses der Buche, der je nach Standort bei ungefähr 40 Jahren liegt. Nach KRAMER (1988) ist die überlegene Höhenwuchsleistung von Bäumen auf guten Standorten vor allem auf das sehr hohe Jugendwachstum zurückzuführen. In höherem Bestandesalter sind deshalb durch meliorative Maßnahmen wie eine Kalkung nicht mehr so hohe Zuwachssteigerungen zu erwarten. Zudem sind die Kalkgaben in den betrachteten Vergleichsflächenpaaren geringer und milder in ihrer Wirkung als im Kalksteigerungsversuch Dhronneck. Dennoch entspricht der durchschnittlich nachgewiesene Höhenunterschied von 1,0 m im Alter 100 bei der Buche ungefähr einer viertel Ertragsklasse, dies wären rechnerisch bei Vollbestockung ungefähr 4 % mehr Derbholzmasse bei gekalkten gegenüber ungekalkten Beständen. In den Versuchen Sellhorn, Göhrde und Dassel ist zusätzlich Phosphor mit der Kalkung ausgebracht worden, dies kann ebenfalls zur Vitalitätssteigerung der Buchen beigetragen haben.

Da mit der Bodenversauerung ein Verlust an Nährstoffen durch Auswaschung verbunden ist, hat die Kalkung eine Verbesserung der Nährstoffversorgung der Waldbäume zum Ziel (MEIWES 1994, ULRICH 1995, BEESE 1996). Weiterhin soll durch die Kalkung eine Neutralisierung eingetragener Säurebildner, eine Stärkung der Pufferkapazität des Bodens zur Vermeidung einer weiteren Versauerung sowie eine moderate Aktivierung der Stoffumsätze im Auflagehumus erreicht werden (MEIWES 1994, LEUBE 2000). Die Erreichung dieser Ziele konnte in den hier untersuchten Versuchen zur Buche nachgewiesen werden.

Deutlich höhere Basensättigungen im Mineralboden und Calciumvorräte im Auflagehumus und Mineralboden der gekalkten gegenüber den ungekalkten Parzellen konnten in dieser Untersuchung belegen, dass die ausgebrachten Nährstoffe im Waldökosystem verbleiben. Die mit der Kalkung zugeführten Calciumvorräte finden sich in ähnlichen Größenordnungen im Auflagehumus und Mineralboden, wobei es im Zeitverlauf zu einer Verlagerung des Calciums von der Ol- und Of-Lage über die Oh-Lage in den oberen Mineralboden kommt. Von dort wird es über die Wurzeln aufgenommen, was sich an den hohen Nährstoffgehalten der gekalkten Buchenblätter zeigt. Die höhere Basensättigung und höheren Calciumvorräte im effektiven Wurzelraum (Auflage und Mineralboden bis 40 cm) in den Kalkungsflächen zeigen, dass die Bodenschutzkalkung zu einer Annäherung an die Wuchsverhältnisse mittlerer, unbelasteter Waldbestände geführt hat. Die Bodenschutzkalkung kann deshalb sowohl als konsequente Maßnahme zur Melioration versauerter Waldböden als auch zur Vorbeugung entkoppelter Stoffkreisläufe angesehen werden. Die nach einer Kalkung langfristige Speicherung von Calcium im Auflagehumus und oberen Mineralboden ist mehrfach belegt (ALDINGER 1987, SPELLMANN u. MEIWES 1995, HÖLSCHER et al. 1999, MEESENBURG et al. 2001, WAGNER 2007, MOORE et al. 2008). Wird jedoch die mit der Kalkung ausgebrachte Säureneutralisationskapazität mit der theoretisch zu kompensierenden Säuremenge (Eintrag über Deposition abzüglich Pufferrate) verglichen, so zeigt

sich mit Ausnahme des Kalksteigerungsversuches in Dhronneck, dass die ausgebrachten Kalkmengen noch nicht als ausreichend angesehen werden können, um ein mittleres Niveau der Nährstoffversorgung unbelasteter Waldböden wiederherzustellen.

In den ungekalkten Kontrollen kommt es über alle Versuche hinweg von 1990 bis 2004 zu einem Humusaufbau von durchschnittlich 10 t/ha Kohlenstoff, dies entspricht einer jährlichen Zunahme von rechnerisch 0,7 t/ha. Bei den gekalkten Parzellen dagegen wird zunächst Auflagehumus abgebaut (1998), wobei 2004 wieder das durchschnittliche Niveau von 1990 erreicht wird. Gleichzeitig findet auf den gekalkten Parzellen verstärkt eine Verlagerung von Kohlenstoff in den Mineralboden statt. Zum einen zeigt dies die kalkungsbedingte Förderung der biologischen Aktivität im Auflagehumus und oberen Mineralboden beziehungsweise deren Hemmung durch langfristige Säureeinträge bei den Kontrollen, zum anderen eine langfristige Festlegung von Kohlenstoff durch die Verlagerung in den Mineralboden im Zuge der Bodenschutzkalkung. MEESENBURG u. MEIWES (1999) berichten ebenfalls aus einer ungekalkten Level II-Fläche mit 160-jähriger Buche (B1 Solling) von einer Zunahme der Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus. 1/3 der Streu wird dort rechnerisch nicht mineralisiert, was zu jährlichen Kohlenstoffzunahmen von 0,5 t/ha führte. Diese Größenordnung wird in den hier untersuchten Flächen bestätigt. Untersuchungen an Rotfichten- und Tannenbeständen im Schwarzwald belegen ebenfalls einen durch Kalkung induzierten Humusabbau, welcher ebenfalls nicht mit einem Kohlenstoffverlust verbunden war, da der Kohlenstoff im Mineralboden angereichert wurde (ALDINGER 1987).

Die zweimalige Zufuhr von magnesiumhaltigen Kalken auf den Versuchsfeldern Sellhorn, Göhrde und Dassel hat dazu geführt, dass Defizite in der Calcium- und Magnesiumversorgung der Buchenblätter ausgeglichen werden. Die nachgewiesene Kalkungswirkung hält auch zehn Jahre nach der letzten Kalkung noch an: ab 1997 werden für die Calciumgehalte, ab 2004 auch für die Magnesiumgehalte auf den Kalkungspartellen etwa doppelt so hohe Werte in den Blattgehalten verzeichnet wie auf den Kontrollpartellen. Über eine erfolgreiche Erhöhung der Calcium- und Magnesiumgehalte bei Buchenblättern nach Kalkung auf basenarmen Standorten berichten auch BÜTTNER et al. (1993) und ASCHE (1994).

Interkostale Vergilbungen stehen im engen Zusammenhang mit Magnesiummangel. BÜTTNER et al. (1993) nennen als Grenzwert für das Auftreten von Vergilbungserscheinungen an Buchenblättern einen Gehalt von 0,6 g/kg Magnesium in der Trockenmasse. Mitentscheidend für das Auftreten und die Intensität der Vergilbung sind Trockenheit und Strahlung. Obwohl Magnesiumgehalte unterhalb des genannten Grenzwertes auf der Kontrollfläche in Dassel im gesamten Auswertungszeitraum vorkommen, werden ab 1998 kaum noch Vergilbungen registriert.

Die Kalium-Gehalte der Buchenblätter der gekalkten Parzellen sinken im Beobachtungszeitraum ab. Eine Erklärung bietet der Kalium/Calcium-Antagonismus

der Wurzeln bei der Aufnahme dieser Ionen (HÜTTL 1991). Während auf den Flächen Sellhorn und Dassel die Buchen der gekalkten Parzellen ab 2004 nur gering mit Kalium versorgt sind bzw. Kalium-Mangel aufweisen, wird auf allen Kontrollparzellen eine gute bis sehr gute Kalium-Versorgung beibehalten. Aus der Literatur ergibt sich für Buche und Fichte kein einheitliches Bild über die Kalium-Gehalte in den Blattorganen nach Kalkung. Während BÜTTNER et al. (1993), ASCHE (1994) und MEESENBURG et al. (2001) explizit darauf verweisen, dass die Kalium-Gehalte der Buchenblätter durch die Kalkung nur gering beeinflusst wurden, wurde ein Rückgang der Kalium-Gehalte nach Kalkungsmaßnahmen in anderen Untersuchungen häufiger festgestellt (ALDINGER 1987, v. WILPERT 2003, WAGNER 2007, DAMMANN et al. 2008). Dieser Begleiterscheinung der Kalkung sollte weiter nachgegangen werden, um die Kalium-Versorgung bei der Kalkungsplanung angemessen berücksichtigen zu können. Die nach der Bodenschuttkalkung deutlich bessere Versorgung der Buchenblätter mit Calcium und Magnesium gegenüber teilweise kritischen Gehalten der Blätter des Kontrollkollektives unterstreicht jedoch den positiven Effekt und die Notwendigkeit der Bodenschuttkalkung.

Die Ergebnisse der in dieser Arbeit untersuchten Versuchsreihen konnten zeigen, dass die durchgeführten Kalkungen positive Wirkungen auf die Vitalität von Buchenbeständen und die Stabilität des Waldbodens hatten. Bei Kalkungsmaßnahmen sollten die standörtlichen Gegebenheiten, die Ertragssituation und die bereits ausgebrachten Kalkmengen unbedingt berücksichtigt werden, um die natürliche Leistungskraft der Waldstandorte möglichst wiederherzustellen und nachhaltig zu erhalten. Ergebnisse langfristig angelegter Versuche können hier zur Entscheidungsunterstützung beitragen.

Literatur

- ALDINGER, E. (1983): Gesundheitszustand von Nadelholzbeständen auf gedüngten und ungedüngten Standorten im Buntsandstein-Schwarzwald. AFZ 38, 794-796
- ALDINGER, E. (1987): Elementgehalte im Boden und in Nadeln verschieden stark geschädigter Fichten-Tannen-Bestände auf Praxiskalkungsflächen im Buntsandstein-Schwarzwald. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen Heft 19, Freiburg im Breisgau, 266 S.
- ALDINGER, E. u. KREMER, W.L. (1985): Zuwachsuntersuchungen an gesunden und geschädigten Fichten und Tannen auf alten Praxiskalkungsflächen. Forstw. Cbl. 104, 360-373
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, IHW-Verlag Eching bei München, 352 S.
- ASCHE, N. (1994): Elementgehalte von Buchenblättern auf ausgewählten Kalkversuchsflächen. AFZ 14, 792-794
- BEESE, F.O. (1996): Indikatoren für eine multifunktionale Waldnutzung. Forstw. Cbl. 115, 65-79
- BMVEL (2001): Dauerbeobachtungsflächen Waldschäden im Level II-Programm – Methoden und Ergebnisse der Kronenansprache seit 1983. Arbeitskreis „Krone“ der Bund-Länder Arbeitsgruppe Level II, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Referat 533, Bonn, 84 S. und Anhang

- BMVEL (2004): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI². Das Wichtigste in Kürze. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin
- BÜTTNER, G.; HARTMANN, G. u. THOMAS, M. (1993): Vorzeitige Vergilbung und Nährstoffgehalte des Buchenlaubes in Südniedersachsen. *Forst und Holz* 48, 627-630
- DAMMANN, I.; HELBIG, M.; PAAR, U.; GAWEHN, P.; EICHHORN, J.; SCHRÖCK, H.W.; MAYER, F.-J. u. ZIEGLER, CH. (2003): Ausgewählte Auswertungen zu regionalen Entwicklungen des Kronezustandes, Ergebnisse und Hypothesen zu Ursachen und Wirkungen. Workshop Integrierende Auswertung der Daten des Forstlichen Umweltmonitoring (Level I/II) vom 24.-26. Februar 2003 in Bonn-Röttgen, BMVEL/IFOM Projekt des BMBF, 155-181
- DAMMANN, I.; MINDRUP, M. u. SCHÖNFELDER, E. (2008, angenommen): Entwicklung der Kalium-, Calcium- und Magnesium-Nährstoffversorgung von ausgewählten Waldbeständen in Niedersachsen und ihre Bedeutung für die Biomassennutzung. *Forst und Holz*
- GAUGER, TH.; ANSHELM, F.; SCHUSTER, H.; ERISMAN, J.W.; VERMEULEN, A.T.; DRAAIJERS, G.P.J.; BLEECKER, A. u. NAGEL, H.-D. (2002): Mapping of ecosystem specific long-term trends in deposition loads and concentrations of air pollutants in Germany and their comparison with critical Loads and Critical Levels. Teil 1 Depositon Loads 1990 - 1999. Institut für Navigation der Universität Stuttgart und Umweltbundesamt (Final Report 299 42 210), 207 S.
- HÖLSCHER, D.; ASCHKE, N. u. BEESE, F. (1999): Langfristige Effekte einer Waldkalkung auf bodenchemische Parameter, mikrobielle Biomasse und Regenwurmbesatz. *Forstarchiv* 70, 127-132
- HÜTTL, R.F. (1991): Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. *Freiburger Bodenkundl. Abhandlungen, Habilitationsschrift*, 28, 440 S.
- KÖNIG, N. u. FORTMANN, H. (1996): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungs-Methoden des Umweltanalytik-Labors der Nieders. Forstl. Versuchsanstalt, Teil 1-3: Elementbestimmungsmethoden A-Z, Gerätekurzanleitung und Datenverarbeitung, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Göttingen, Reihe B, Bd. 46, 47, 48
- KÖNIG, N. u. FORTMANN, H. (1999a): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungs-Methoden des Umweltanalytik-Labors der Nieders. Forstl. Versuchsanstalt, 1. Ergänzung: 1996 - 1998 Teil 1-3: Elementbestimmungsmethoden A-Z, Untersuchungs- und Vorbereitungsmethoden, Gerätekurzanleitungen, Qualitätskontrolle, Datenverarbeitung. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Göttingen, Reihe B, Bd. 58, 59 und 60
- KÖNIG, N. u. FORTMANN, H. (1999b): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltanalytik-Labors der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt und des Zentrallabors II des Forschungszentrums Waldökosysteme. Teil 4: Probenvorbereitungs- u. Untersuchungsmethoden, Qualitätskontrolle und Datenverarbeitung. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Göttingen, Reihe B, Bd. 49, 1996, 435 S.
- KRAMER, H. (1988): *Waldwachstumslehre*, Parey Verlag, Hamburg Berlin, 374 S.
- LEUBE, F. (2000): Leitfaden Forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, Heft 21, 58 S.
- LEUSCHNER (1998): Mechanismen der Konkurrenzüberlegenheit der Buche. *Ber. d. Reinh.-Tüxen-Ges. Hannover* 10, 5-18
- LÖWE-ERLASS (2007): Langfristige, ökologische Waldentwicklung in den Niedersächsischen Landesforsten. RdErl. d. ML v. 20.3.2007 -405- 64210-56.1-
- MEESENBURG, H. u. MEIWES, K.J. (1999): Veränderung der Elementvorräte im Boden von Buchen- und Fichtenökosystemen im Solling. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 7, 109-114
- MEESENBURG, H.; MEIWES, K.J.; WAGNER, M. u. PRENZEL, J. (2001): Ecosystem effects after ameliorative liming of a catchment at the Harz mountains, Germany. *Plant nutrition*, 914-915
- MEIWES, K.J. (1994): Meliorationsmöglichkeiten. In: MATSCHULLAT et al. (1994): Gefahr für Ökosysteme und Wasserqualität. Springer Berlin, 415-431

- MOORE, J.D.; DUCHESNE, L. u. OUMET, R. (2008): Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand. *Forest Ecology and Management* 255, 3460-3468
- MRLU (1997): Verbindlichkeit der Leitlinie zur Erhaltung und nachhaltigen Entwicklung des Waldes in Sachsen-Anhalt (Leitlinie Wald). RdErl. des Ministeriums für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalts. MBl LSA Nr. 51/1997 vom 17.11.1997, 1871-1894
- NLF (2007): Das LÖWE-Programm. 15 Jahre langfristig ökologische Waldentwicklung. Niedersächsische Landesforsten, Braunschweig
- RiBES 2002: Richtlinie für die Bewirtschaftung des Hessischen Staatswaldes. www.Hessenforst.de/service/download/RiRibes.pdf
- RÖHE, P. (1985): Untersuchungen über das Wachstum der Buche in Baden-Württemberg, Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden- Württemberg, Stuttgart, Bd. 61
- SPELLMANN, H. u. MEIWES, K.J. (1995): Positive Auswirkung der Kalkung. Kalksteigerungs- und Bodenbearbeitungsversuch Dhronecken 148. *AFZ* 50, 71-73
- SVERDRUP, H.; WARFINGE, P.; BLAKE, L. u. GOULDING, K. (1995): Modelling recent and historic soil data from the Rothamsted Experimental Station, UK using SAFE. *Agriculture, Ecosystems and Environm.* 53, 161-177
- ULRICH, B. (1995): Der ökologische Bodenzustand – seine Veränderung in der Nacheiszeit, Ansprüche der Baumarten. *Forstarchiv* 66, 117-127
- WAGNER, M. (2007): Analyse und Modellierung langfristiger Auswirkungen einer hoch dosierten Kalkungsmaßnahme auf den Stoffaustrag im Einzugsgebiet der Steilen Bramke (Oberharz). Cuvillier Verlag Göttingen, 160 S.
- WILPERT, K. v. (2003): Drift des Stoffhaushalts im Fichten- Düngerversuch Pfalzgrafenweiler. *AFJZ* 174, 21-30
- WOLFF, B.; ERHARD, M.; HOLZHAUSEN, M. u. KUHLOW, T. (2003): Das Klima in den Forstlichen Wuchsgebieten Deutschlands. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holz-wirtschaft Hamburg*, Nr. 211
- WOLFF, B.; RIEK, W.; BARITZ, R. u. HENNIG, P. (1997): Deutscher Waldbodenbericht 1996. BMELF Bonn, 141 S.

Korrespondierender Autor:

Dr. Jan Evers
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
37079 Göttingen
Grätzelstr. 2
E-Mail: Jan.Evers@nw-fva.de
URL: www.nw-fva.de

Inge Dammann
Axel Noltensmeier
Ralf-Volker Nagel
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt