

Forsten



LANDESFORSTVERWALTUNG NRW

Bodenschutzkalkung in Nordrhein-Westfalen

NRW.



Ministerium für
**Umwelt und
Naturschutz,
Landwirtschaft und
Verbraucherschutz**
des Landes
Nordrhein-Westfalen

Herausgeber: Ministerium für Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes
Nordrhein-Westfalen (MUNLV)
Schwannstr. 3, 40476 Düsseldorf

Redaktion: Referat III-5, MUNLV

Fachliche Bearbeitung: Dr. Asche

Bildnachweis: Dr. Asche, Jansen, Nolte, Schulte
LÖBF-Archiv

Gesamtherstellung: S.P.E.C.K.I.N., Mülheim an der Ruhr

Stand: Überarbeitete und erweiterte Fassung
August 2003

Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen –
Information für Waldbesitzer

Bodenschutzkalkung in Nordrhein-Westfalen





► Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorbemerkung	5
1 Einleitung	5
2 Säurebelastungen von Waldböden	6
2.1 Risiken der Säurebelastung	7
3 Bodenschutzkalkung	11
3.1 Ziele der Bodenschutzkalkung	11
3.2 Berücksichtigung möglicher Risiken	12
3.3 Auswahl zu kalkender Flächen	13
3.4 Von einer Bodenschutzkalkung auszusparende Flächen	16
3.5 Materialien für die Waldkalkung	17
3.5.1 Referenzanalysen	19
3.6 Ausbringungsmenge	22
3.7 Ausbringungszeit	24
3.8 Ausbringungskontrolle	24
3.9 Wiederholungskalkung	27
4 Flächenbilanz der Bodenschutzkalkung für die Jahre 1984 - 2001	28
5 Technik und Verfahren der Bodenschutzkalkung	29
5.1 Bodengebundene Ausbringungsverfahren	31
5.1.1 Ausbringung von Hand	31
5.1.2 Ausbringung mit Pendel- oder Kreiselstreuern	31
5.1.3 Ausbringung mit Verblasegeräten	33
5.2 Ausbringung mit Luftfahrzeugen	35
6.3.1 Ausbringung mit Hubschraubern	35
6.3.2 Ausbringung mit anderen Luftfahrzeugen	37

6	Wirkungskontrolle im Waldökosystem	38
6.1	Bodenfestphase	38
6.2	Sickerwasser	40
6.3	Wurzelsystem	43
6.4	Bodenleben	46
6.5	Baumernährung	49
6.6	Buchenfrüchte	53
6.7	Bodenvegetation, Naturverjüngung der Waldbäume	55
6.8	Waldkalkung und Bodenzustandserhebung im Wald	57
7	Förderung der Bodenschutzkalkung	61
8	Ausblick	61
9	Begriffserläuterungen	62
10	Literaturhinweise	67

► Vorbemerkung

Das vorliegende Heft soll Waldbesitzer und interessierte Mitbürger über das Thema „Bodenschutzkalkung im Wald“ informieren und als Planungs- und Entscheidungshilfe für derartige Vorhaben dienen.

Ausgehend von dem Problem der Säurebelastung der Waldböden werden Risiken der Bodenversauerung und Ziele der Bodenschutzkalkung aufgelistet, Ausbringungstechniken und Kompensationsmittel vorgestellt und bisherige Erfahrungen mit der Bodenschutzkalkung und deren Wirkungen auf das Ökosystem Wald am Beispiel aktueller Untersuchungsergebnisse beschrieben.

► 1. Einleitung

Anfang der achtziger Jahre wurden bundesweit Waldschäden in bisher nicht bekanntem Ausmaß beschrieben. Bei der Ursachenanalyse stellte sich bald heraus, daß die Einträge von Säuren und die dadurch bedingte beschleunigte Bodenversauerung **ein** wesentlicher **Faktor** für die Waldschäden sind (u.a. ULRICH, 1982). Äußere Kennzeichen dieser Beeinflussung sind u.a. zu beobachtende Verfärbungen der Nadel- und Blattmasse. Darüber hinaus ist durch die Auswaschung von Schad- und Nährstoffen aus dem Waldboden langfristig auch eine Beeinträchtigung der Gewässergüte unter Wald zu erwarten. Um die Emission von Säurebildnern zu reduzieren, wurden Gesetze und Verordnungen zur Luftreinhaltung verabschiedet bzw. verschärft (u.a. BimschG, TA-Luft, Großfeuerungsanlagen-Verordnung 1983, Emmissionsminderungsplan 1984 in NRW) und 1984 das „Waldhilfsprogramm“ in NRW ins Leben gerufen. In diesem Programm wurde u.a. die Durchführung und Förderung von **Bodenschutzkalkungen** zur Vitalisierung geschädigter und gefährdeter Waldökosysteme landesweit in allen Waldbesitzarten als schnell wirksame Hilfe für den Wald vorgesehen. Da in absehbarer Zeit die Säure- und Schadstoffeinträge auf unsere Böden höher sein werden als ihre Fähigkeit, diese Stoffe ökosystemneutral aufzunehmen, werden Bodenschutzkalkungen **als Überbrückungshilfe** notwendig bleiben. Nur so lassen sich nachteilige Folgen für Waldböden und Grundwässer mindern.

► 2. Säurebelastungen von Waldböden

Säurebelastungen von Waldböden können mehrere Ursachen haben. Die wichtigsten natürlichen Quellen sind Kohlensäureeintrag und -produktion in vom Menschen nicht beeinflussten Wäldern, die Bildung von Salpetersäure als Folge der Mineralisation von im Boden gespeichertem Stickstoff nach Störungen z.B. durch Sturmwurf oder Insektenkalamitäten und die Bildung und Verlagerung organischer Säuren.



Bild 1: Durch Übernutzung devastierter Wald

Eine wichtige, vom Menschen verursachte Säurequelle ist die Holz- bzw. Biomassenutzung. Mit der Biomasse werden basisch wirkende (Nähr-) Kationen aus den Wäldern exportiert. Im Boden verbleibt dabei eine entsprechende Säuremenge zurück. Wie hoch diese durch Biomassenutzung bedingte Säuremenge ist, hängt ganz entscheidend von der Nutzungsintensität ab. Bei einer hohen Nutzungsintensität (durch Holz, Grünäste, Streu u.a), die auch noch über lange Zeiträume durchgeführt wird, kann allein hierdurch der Wald devastiert und in eine andere Vegetationsform (z.B. Heide) überführt werden, und die Bodenentwicklung von

einer Braunerde hin zu einem Podsol extrem beschleunigt ablaufen. Historische Beispiele für eine so geführte intensive Biomassenutzung (z.B. Plaggennutzung, Streurechen) finden sich u.a. im Münsterland und auch im Eggegebirge (u.a. KAMLAH, 1929, HESMER, 1958).

Die derzeit praktizierte Biomassenutzung beschränkt sich in der überwiegenden Zahl der Wälder auf die Derbholznutzung. Die hierdurch bewirkten Entzüge basischer Kationen bzw. die im Boden zurückbleibende Säuremenge dürfte pro Jahr ca. **5 - 15 kg CaCO₃/(ha*a)** (= 0,1 - 0,3 kmol_c/(ha*a)) bei Stammholznutzung ohne Rinde und **10 - 25 kg CaCO₃/(ha*a)** (= 0,2 - 0,5 kmol_c/(ha*a)) bei Stammholznutzung mit Rinde betragen. Zusätzliche Nutzungen von Kronen- und Astholz für die Erzeugung von Energie aus nachwachsenden Rohstoffen, die politisch gefördert wird, würde zu zusätzlichen Entzügen basischer Kationen führen. Wird eine solche Holznutzung intensiv betrieben, können hierdurch ähnliche Säuremengen im Boden zurückbleiben, wie sie durch die Stammholznutzung bedingt sind (ca. **0,1 - 0,5 kmol_c/(ha*a)**).



Bild 2: Holznutzung

Die derzeit mengenmäßig bedeutendste Säurebelastung der Wälder bzw. Waldböden wird durch die Emission von säurebildenden Gasen - Quelle: Verkehr, Landwirtschaft, Industrie, u.a. - und die Deposition daraus gebildeter Säuren in die Wälder verursacht. **Ende der siebziger Jahre** betragen diese **Säureinträge im Mittel ca. 5,4 (3 bis 16) kmol_c/(ha * a)** (= 270 (150 - 810 kg CaCO₃/(ha*a))). Diese hohen

Einträge waren bzw. sind dadurch bedingt, daß Wälder mit ihren großen Oberflächen eine hohe Filterleistung für Luftverunreinigungen erbringen. Im Vergleich zum Freiland wird deshalb unter Laubwaldbeständen ca. die 2-fache und unter Nadelholzbeständen die 2 - 4-fache Menge deponiert. Diese hohe Filterleistung sorgt für saubere Luft - eine wichtige Leistung unserer Wälder - führt aber gleichzeitig zu einer sehr hohen Belastung der Wälder und Waldböden mit Säuren und anderen Stoffen. Durch die Luftreinhaltemaßnahmen, insbesondere im industriellen Bereich, ist die **Säuredeposition** in unseren Wäldern deutlich auf **heute ca. 2,8 (2 bis 7) kmol_c/(ha*a)** (= 140 (100 - 350 kg CaCO₃/(ha*a))) reduziert worden (UBA, 2002).

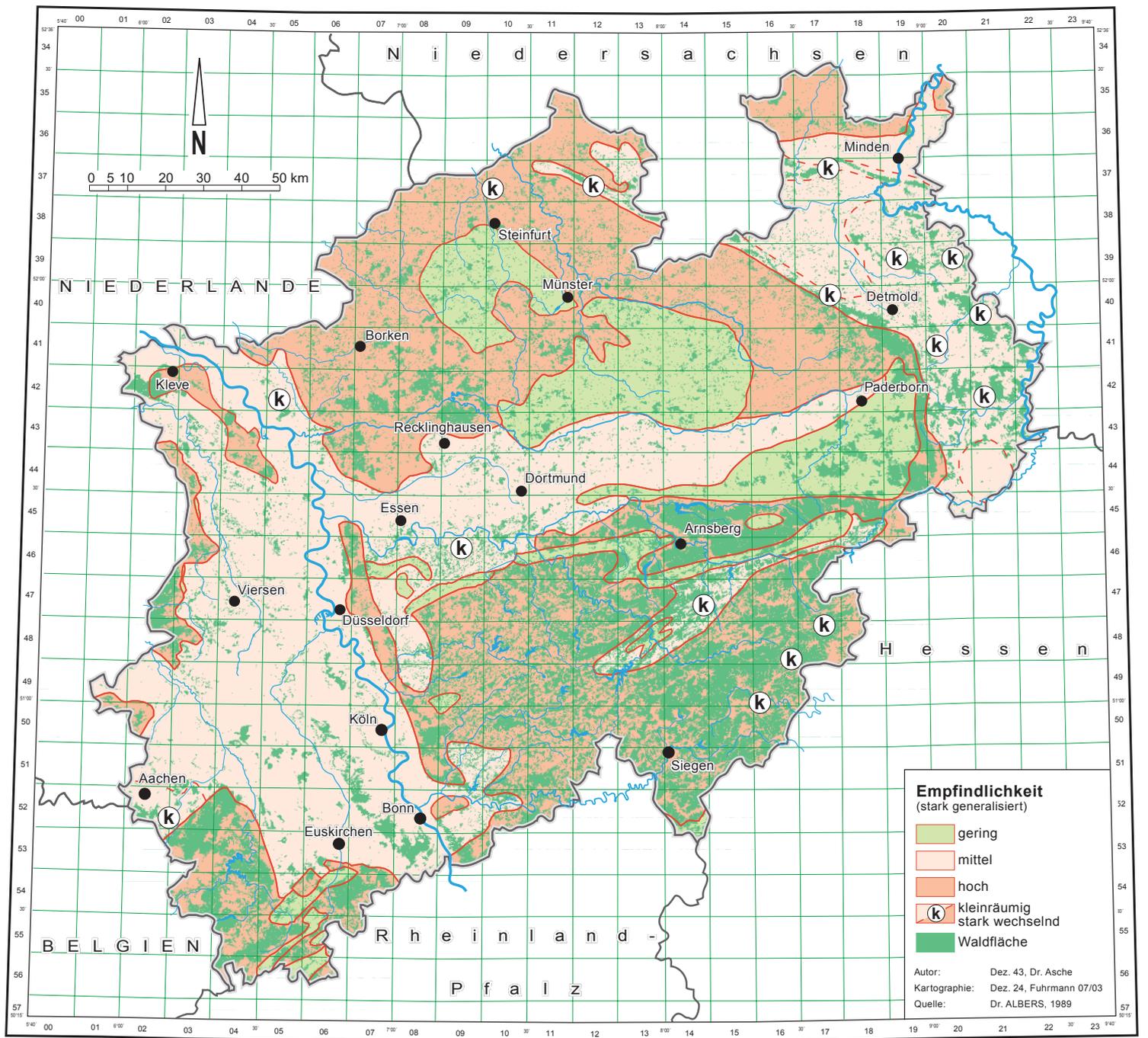


Bild 3: Beispiel einer Emissionsquelle

► 2.1. Risiken der Säurebelastung

Diese reduzierten Säurebelastungen der Waldböden liegen jedoch noch deutlich über der Rate, die Böden mehr oder weniger ohne nachteilige Veränderungen (das bedeutet: ökosystemneutral) durch Silikatverwitterung abpuffern können. Diese **Silikatverwitterungsrate** dürfte auf den meisten karbonatfreien Waldstandorten in NRW im Rahmen von **0,2 - 1 kmol_c/(ha*a)** (= 10 - 50 kg CaCO₃/(ha*a)) liegen. Die Empfindlichkeit der Böden gegenüber Säurebelastungen in NRW ist in der Abbildung 1 dargestellt. Die Grafik zeigt, daß auf weiten Flächen des Landes, ins-

Abb. 1: Empfindlichkeit der Böden gegenüber Säurebelastung in Nordrhein-Westfalen



© LÖBF NRW 2003



besondere im Bereich der Wälder, die Böden sehr empfindlich gegenüber Säurebelastungen sind. Folge von über der Säureneutralisationskapazität der Böden liegenden Säureeinträge ist eine chemische Drift, die zu Änderungen des funktionalen Zustandes der Waldböden und Wälder führt und u.a. folgende Risiken bedingt:

- verminderte Elastizität der Waldböden
- Änderung der Artenzusammensetzung
- Verlust anspruchsvoller Arten
- Störung der Stoffkreisläufe
- Bildung von Auflagehumus
- Nährstoffungleichgewichte bzw. -mangel bei den Waldbäumen
- verminderte Produktivität der Pflanzengesellschaft
- Belastung des Grundwassers mit Kationensäuren (u.a. Al, Mn, Fe)

Besorgniserregend ist, daß Bodenveränderungen bzw. funktionale Veränderungen im Waldökosystem als Folge der Bodenversauerung mit zunehmender Säurestärke (tiefe pH-Werte) und Säuremenge im Boden immer schwieriger zu kompensieren sind. Zudem besteht die Befürchtung, dass die Calciumversorgung für Vögel in Gebieten mit stark sauren Waldböden kaum noch ausreicht, um eine stabile Schale für die Eier bzw. das Gelege auszubilden. Deshalb ist es erforderlich die durch menschliche Tätigkeit bedingten Säurebelastungen durch waldökosystemangepaßte

Nutzungsstrategien (u.a. die Holznutzung auf das Stammholz konzentrieren, Stammholz möglichst im Wald entrinden, Brennholznutzung auf starkes Kronenholz begrenzen) so gering wie möglich zu halten und durch weitere Emissionsminderungen die Säureinträge weiter zu reduzieren.



Bild 4: Intensiv durchwurzelt basenarme Braunerde

▶ 3. Bodenschutzkalkung

Die Bodenschutz- bzw. Waldkalkung ist die wichtigste Bodenschutzmaßnahme um die weitere Versauerung von Böden zumindest zeitweise zu stoppen bzw. zu verlangsamen. Das Land NRW hat sich mit dem Waldhilfsprogramm 1984 frühzeitig dafür entschlossen Wälder großflächig mit Calcium- Magnesiumcarbonat zu behandeln. Bis 2002 sind so ca. 428.000 ha, dies entspricht ca. 47 v.H. der Landeswaldfläche gekalkt worden. Die Waldbesitzer können sich gegen die Säureinträge aus der Atmosphäre nicht wehren und werden daher durch das Land NRW mit erheblichen Mitteln für die Bodenschutzkalkung unterstützt (1984 - 2002: ca. 46 Mio. Euro).

▶ 3.1 Ziele der Bodenschutzkalkung

Ziele der Bodenschutzkalkung sind u.a.:

- deponierte Säuren zu neutralisieren,
- die Säure- und Kationensäuregehalte in der Bodenlösung und am Austauscherkomplex zu verringern,
- einen für das Wurzelwachstum günstigen bodenchemischen Zustand zu erhalten bzw. zu schaffen,
- ein Bodenmilieu zu erhalten bzw. zu schaffen, in dem Bodenwühler (insbesondere tiefgrabende Regenwürmer) aktiv sein können,
- die Nährstoff- und Basenversorgung von Blättern und Nadeln zu verbessern und dadurch das Puffervermögen der Bäume im Kronenraum gegenüber Säuren zu stärken,
- dem Wald entzogene basische Nährstoffe wieder zurückzugeben,
- Auflagehumusformen in Richtung Mineralbodenhumusformen zu verändern,
- die Entwicklung einer Krautschicht zu fördern,
- die natürliche Verjüngung der Bestände zu fördern.

Mit Hilfe der Bodenschutzkalkung sollen diese Ziele in angemessener Zeit und ökosystemverträglich erreicht werden. Daher wurde festgelegt, die Waldkalkung mit 3 t Kalk pro ha durchzuführen und Kalkformen zu wählen, die langsam aber nachhaltig ihre Wirkung entfalten. Hierdurch ist der Eingriff in den Wald relativ gering, aber auch die Verbesserung des Bodenzustandes oftmals nicht sofort zu erkennen.

► 3.2. Berücksichtigung möglicher Risiken

Als mögliche Risiken der Waldkalkung werden u.a. oftmals angeführt:

- eine über der Aufnahmekapazität der Bestände liegende Mineralisationsrate,
- die Belastung des Grundwassers mit Nitrat,
- eine Störung des Brutgeschäftes von Vögeln durch die Kalkausbringung,
- die direkte Schädigung von oberflächen- bzw. laufaktiven Insekten wie z.B. Waldameisen.



Bild 5: Ameisennest

Auf diese Risiken wird im Rahmen der Bodenschutzkalkung Rücksicht genommen, indem die Kalkausbringung nur außerhalb der Vegetationszeit durchgeführt wird, waldbauliche Maßnahmen (u.a. Durchforstungen) und die Kalkung aufeinander abgestimmt werden und der für oberflächen- bzw. laufaktive Insekten besonders ungünstige Feinanteil (0 - 0,1 mm) abgeseibt wird bzw. nur erdfeuchtes Material für die Ausbringung zulässig ist. Dabei zeigen neuere Untersuchungen, daß durch diese Maßnahmen negative Effekte der Waldkalkung in Form erhöhter Nitratbelastungen für das Grundwasser (u.a. SCHÜLER, 1997, ASCHE, 1995) und Schäden an Waldameisen (EISENBEIS et al., 1997) vermieden werden können.

► 3.3. Auswahl zu kalkender Flächen

In Anbetracht der derzeitigen hohen Säureeinträge sind grundsätzlich alle Wälder auf basenarmen Gesteinen für Bodenschutzkalkungen vorzusehen. Vorrangig sollten die Wälder behandelt werden, deren Böden bereits übernatürlich stark versauert sind. Hilfsmittel zur Beurteilung der Kalkungsbedürftigkeit ist u.a. die Mächtigkeit und Struktur der Humusauflage:



Bild 6: Oberbodenversauerung, deutlich erkennbar an dem grauen Horizont unter dem Auflagehumus

MULL MODER ROHHUMUS

Kalkung zunehmend erforderlich →

Bodenchemische Kriterien für die Beurteilung der Kalkungsbedürftigkeit sind einmal der pH-Wert, die Calciumsättigung im Oh-Horizont, die Basensättigung der Austauscher im Mineralboden und das Calcium- / Aluminiumverhältnis (mol/mol) in der Bodenlösung.

Tab. 1: Kriterien für die Kalkbedürftigkeit von Waldböden

Kalkung erforderlich		
Ca-Sättigung im Oh-Horizont	< 10	v.H.
pH(in KCl) im Mineralboden	< 4,2	
Ca+Mg-Sättigung am Austauscher (Ake)	< 15	v.H.
Ca/Al-Verhältnis (mol/mol) in der Bodenlösung	< 1	
Kalkung dringend erforderlich		
Ca-Sättigung im Oh-Horizont	< 10	v.H.
pH(in H ₂ O) im Oh-Horizont	< 3,0	
pH(in H ₂ O) im Mineralboden	< 4,2	
pH(in KCl) im Mineralboden	< 3,8	
Ca+Mg-Sättigung am Austauscher (Ake)	< 5 - 15	v.H.
H+Fe-Sättigung am Austauscher (Ake)	> 2 - 5	v.H.
Ca/Al-Verhältnis (mol/mol) in der Bodenlösung	< 0,3	

Flächen, auf denen die in Tabelle 1 aufgeführten Kriterien erreicht bzw. unterschritten werden, können grundsätzlich für eine Bodenschutzkalkung herangezogen werden. Wasserschutzgebiete der Zonen II und III sollten bevorzugt mit einer Bodenschutzkalkung behandelt werden, um die zunehmende Versauerung dieser Flächen zu verlangsamen und so gleichzeitig mögliche Belastungen der Sickerwässer und Gefährdungen des Grundwassers mit Kationensäuren (z.B. Al) zu verhindern.

Einen Sonderfall stellen Waldflächen dar, die zwar aufgrund des Humus- bzw. chemischen Bodenzustandes als kalkungswürdig bzw. - notwendig eingestuft wurden, jedoch hohe Stickstoffvorräte im Boden, einen großflächigen Bewuchs mit vitaler Brombeere über 1 m Höhe, bzw. eine dichte Holunder-Schicht mit zahlreichen stickstoffzeigenden Pflanzen (z.B. große Brennessel, Knoblauchsrauke, Schwarzer und Roter Holunder, Brombeere, Himbeere) aufweisen. Die Bodenvegetation zeigt auf diesen Standorten eine erhöhte Stickstofffreisetzung durch Abbau (Mine-



Bild 7:
Vitale
Brennesseln
deuten auf
eine hohe
Stickstoff-
verfügbarkeit
im Boden



Bild 8:
Hohe Stickstoffverfügbarkeit fördert die Entwicklung einer dichten Holunder-Strauchschicht

ralisation) des Humus- bzw. Stickstoffvorrates im Boden an. Hierbei werden Nitrat aber auch Säuren freigesetzt. Eine Kalkung kann auf derartigen Flächen gebildete Säuren neutralisieren, gleichzeitig aber auch die Mineralisation weiter anregen. Auf derartigen Flächen muß daher zwischen negativen Effekten, wie z.B. erhöhtem Austrag von Nitrat und anderen Nährstoffen mit dem Sickerwasser und der Neutralisation gebildeter Säuren als gewünschte Wirkung einer Kalkung abgewogen werden. Ob und wie eine Kalkung auf derartigen Flächen durchgeführt werden kann, muß im Einzelfall überprüft und entschieden werden (ASCHE, 2001).

► 3.4. Von einer Bodenschutzkalkung auszusparende Flächen

Von einer Bodenschutzkalkung auszusparen sind folgende Flächen:

- alle Kalknullflächen, die mit Dienstanweisung des MUNLV vom 24.09.2001 (AZ: III-5 31-03.00) landesweit ausgewiesen wurden,
- alle Naturwaldzellen,
- alle nach § 62 LG geschützten Biotope
- alle Hoch- und Übergangsmoore im Waldbereich,
- alle Wälder, die auf basenreichen Gesteinen (z.B. Basalte, Karbonatgesteine) bzw. Böden stocken,
- Wälder auf Standorten mit einem geringen Grundwasserflurabstand (< 80 cm),
- Versuchsflächen, sofern hierdurch der Versuchsablauf gestört wird,
- alle Wälder in der Wasserschutzzone I,
- Waldflächen in Schutzgebieten (nach Naturschutzrecht, Wasserrecht), sofern die Schutzgebietsverordnung eine Bodenschutzkalkung für nicht zulässig erklärt.



Bild 9: Naturwaldzellen und ...



Bild 10: ...Moore werden von der Waldkalkung ausgespart

Bei der Durchführung der Kalkung ist darauf zu achten, daß ausgebrachte Stoffe nicht durch Wind oder Wasser auf Flächen verlagert werden, die von einer Kalkung auszusparen sind. Deshalb ist hier ein Sicherheitsabstand von 10 m zu diesen Flächen einzuhalten.

► 3.5. Materialien für die Waldkalkung

Für die Bodenschutzkalkung können verschiedene Materialien (Naturkalke, Gesteinsmehle, Industriekalke) eingesetzt werden. Voraussetzung ist:

- daß diese Stoffe nach Düngemittelverordnung (BGBI. I, 1991, 1993) in der jeweils gültigen Fassung für den Einsatz im Landbau bzw. Wald zugelassen sind,
- daß sie die dort beschriebenen Mindestanforderungen erfüllen,
- sie keine oder nur geringe Mengen an unerwünschten Begleitstoffen aufweisen (u.a. Schwermetalle, Tab. 3),
- sie bei vorgegebener chemischer Bindungsform einen möglichst hohe Anteil basisch wirksamer Bestandteile (Säureneutralisationskapazität (SNK)) pro Gewichtseinheit aufweisen.

Für alle Stoffe gilt darüberhinaus ein Mindestgehalt von 10 Gew.-% Magnesiumcarbonat ($MgCO_3$). Höhere Magnesiumgehalte der Kalke sind insbesondere bei einer unzureichenden Versorgung der Waldbestände mit diesem Nährstoff zu fordern.

Tab. 2: Anforderungen an Stoffe, die für die Bodenschutzkalkung geeignet sind

Eigenschaft	Anforderung
Korngröße	0 - 3 mm - 97 v.H.
Siebdurchgang bzw. Mahlfeinheit bei	2,0 mm - 92 v.H.
	1,0 mm - 70 v.H.
	0,1 mm < 25 v.H.
Restfeuchte	> 3 v.H.
Gesamtgehalte an Ca und Mg berechnet als Carbonat	> 90 v.H.
Gesamtgehalt an Sulfat-Schwefel	< 15 v.H.



Bild 11: Kalksorten (v.L.: Forsthüttenkalk, Granulat, Gesteinsmehl)

Für die Bodenschutzkalkung nicht zugelassen sind reine Branntkalke und Löschkalke, da sie sehr intensiv bzw. aggressiv nach der Ausbringung auf den Waldboden reagieren. Zudem kann eine Vermörtelung bzw. Puzzolanreaktion derartiger Stoffe auf der Fläche auftreten. Derartige Wirkungen von Kompensationsmitteln sind un-

erwünscht. Um Belastungen der Wälder mit Schadstoffen, wie z.B. Arsen und Schwermetallen, gering zuhalten, dürfen die Schwermetallgehalte eingesetzter Kalke die in Tabelle 3 aufgeführten Werte nicht übersteigen. Hier genannte Kriterien gehen z.T. über die Anforderungen der Düngemittelverordnung bewußt hinaus, um möglichst hochwertige Materialien für die Bodenschutzkalkung einzusetzen.

Tab. 3: Obergrenzen für Schwermetallgehalte und zugeführte Schwermetallmengen in Kalken, Düngemitteln und Bodenhilfsstoffen in mg pro kg bzw. g pro 3 t für die Bodenschutzkalkung

	Gehalt, max.	Menge je 3 t max.
Blei (Pb)	120 mg/kg	360 g / 3 t Kalk
Cadmium (Cd)	1,5 mg/kg	4,5 g / 3 t Kalk
Nickel (Ni)	20 mg/kg	60 g / 3 t Kalk
Quecksilber (Hg)	0,5 mg/kg	1,5 g / 3 t Kalk
Arsen (As)	20 mg/kg	60 g / 3 t Kalk
Kupfer (Cu)	35 mg/kg	105 g / 3 t Kalk
Zink (Zn)	200 mg/kg	600 g / 3 t Kalk
Chrom (Cr), gesamt	100 mg/kg	300 g / 3 t Kalk
Thallium (Tl)	2 mg/kg	6 g / 3 t Kalk

► 3.5.1. Referenzanalysen

Um einen Überblick bzw. eine Referenz über die stoffliche Zusammensetzung von Materialien zu erhalten, die für die Bodenschutzkalkung in Nordrhein Westfalen eingesetzt werden, wurden in Zusammenarbeit mit den Lieferanten, verschiedene, häufig eingesetzte Stoffe untersucht. Die Ergebnisse dieser Referenzanalysen sind in den Tabellen 4 und 5 zusammengestellt. Bei den hier verzeichneten Zahlen ist jedoch zu berücksichtigen, dass Abweichungen von den Analyseergebnisse vorkommen, da die Lagerstätten eine natürliche stoffliche Heterogenität aufweisen. Die Analysewerte zeigen jedoch, dass alle untersuchten Stoffe die geforderten Schwermetallgrenzwerte einhalten bzw. deutlich unterschreiten.

Tab. 4: Schwermetallgehalte von für die Bodenschutzkalkung zugelassenen Materialien

Kalkherkunft											
Element	Max. Gehalt	Hagen	KDI	Hohenlimburg	HKW	Kornelimünster	Grevenbrück	Belgien	Meißen	Scharzfeld	TAV-Asche
mg/kg											
Pb	120	1,6	<1,4	1,6	2,3	13,0	12,0	40,0	<1,4	43	31,0
Cd	1,5	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	1,0	<0,3	0,8	<0,3	<0,3	<0,3
Ni	20	4,7	4,1	4,2	3,9	5,3	5,5	4,6	3,0	4,0	6,4
Hg	0,5	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	n.b.	n.b.	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
As	20	0,8	0,6	1,2	1,5	n.b.	n.b.	<0,1	1,2	2,9	12
Cu	35	3,0	2,9	4,2	2,9	3,4	2,9	4,3	2,6	6,1	32
Zn	200	11,0	6,8	23	18	100,0	19,0	116,0	2,8	50,0	64,0
Cr	100	6,3	4,8	6,0	6,1	12,0	12,0	11,0	6,5	11,0	21,0
Tl	2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
g/kg											
Mn		2,0	1,8	3,6	3,4	4,4	1,5	0,7	0,2	0,4	1,1
Fe		5,6	5,2	11,0	10,0	2,1	7,4	3,0	1,3	2,2	74,0

n.b. - nicht bestimmt

Das wertbestimmende Merkmal der Kalke ist ihre SNK bzw. ihre Basizität. Diese hängt bei vorherrschender carbonatischer Bindungsform im wesentlichen von den Ca- und Mg-Gehalten ab. Aus der Tabelle 5 ist deutlich zu erkennen, dass alle untersuchten Stoffe die geforderte Basizität aufweisen. Die im Vergleich zu den Naturkalken verminderte Basizität der TAV-Asche ist dadurch bedingt, daß ein gewisser Teil des Ca bzw. Mg in sulfatischer Bindung als Neutralsalz vorliegt.



Bild 12: Kalkstein Steinbruch

Tab. 5: Magnesium-, Calciumgehalte und Basizität von für die Bodenschutzkalkung zugelassenen Materialien

	Mg (g/kg)	MgCO ₃ (g/kg) berechnet*	Basizität (mol _c /kg)	Ca (g/kg)	CaCO ₃ (g/kg) berechnet*	Basizität (mol _c /kg)	t/ha bei 58 kmol _c
Kalkherkunft							
Hagen	122	423	10,0	268	670	13,4	2,5
KDI	122	424	10,0	269	673	13,5	2,5
Hohenlimburg	106	369	8,8	280	700	14,0	2,6
HKW	101	351	8,3	275	688	13,8	2,7
Kornelimünster	137	475	11,2	250	624	12,5	2,5
Grevenbrück	132	456	10,8	244	608	12,2	2,6
Belgien	142	492	11,6	249	621	12,4	2,5
Meißner	129	449	10,6	255	636	12,7	2,5
Scharzfeld	146	506	12,0	241	602	12,0	2,5
TAV-Asche	61	213	5,0	288	718	14,4	3,0

- Summenwerte von MgCO₃ und CaCO₃ größer 1000 deuten daraufhin, dass ein gewisser Anteil des Mg bzw. Ca nicht in carbonatischer sondern in einer anderen Bindungsform (u.a. oxidisch, hydroxidisch, silikatisch) vorliegt.

► 3.6. Ausbringungsmenge

Für die Bodenschutzkalkung ist eine Ausbringungsmenge von i.d.R. **3 t Kalk** mit **einem Magnesiumanteil von mindestens 10 Gew.-% MgCO₃** pro Hektar vorgesehen. Ausnahmen von dieser Menge sind in begründeten Fällen zulässig. Diese Gabe entspricht bei einem Beispielkalk der Zusammensetzung 85 Gew.-% CaCO₃ und 10 Gew.-% MgCO₃ einer ausgebrachten SNK von ca. 58 kmol/ha. Aus der Tabelle 6 ist zu erkennen, daß mit steigendem Anteil von nicht wirksamen Begleitstoffen die SNK eines Kalkes deutlich zurückgeht. Um eine erwartete Wirksamkeit bzw. gewünschte Pufferwirkung der Kalke zu erreichen, müssen die Ausbringungsmengen bei erhöhten Begleitstoffanteilen daher erhöht werden (Tab. 6). Dabei ist außerdem bei den für die

Tab. 6: Mit einer Gabe von 3 t ausgebrachte SNK1 in kmol_c bei wechselnder Zusammensetzung der Kalke

Calcium als Gew.-% CaCO ₃	Magnesiumgehalt als Gew.-% MgCO ₃									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
50					47,8	51,3	54,9	58,4	62,0	65,6
55				47,2	50,8	54,3	57,9	61,4	65,0	
60			46,7	50,2	53,8	57,3	60,9	64,4		
65		46,1	49,7	53,2	56,8	60,3	63,9			
70	45,6	49,1	52,7	56,2	59,8	63,3				
75	48,6	52,1	55,7	59,2	62,8					
80	51,6	55,1	58,7	62,2						
85	54,6	58,1	61,7							
90	57,6	61,1								
95	60,6									

1= angenommene SNK: 20 mol_c/kg CaCO₃; 23,7 mol_c/kg MgCO₃

Lesebeispiel für Tab. 6: Um eine SNK von ca. 58 kmol_c mit 3 t Kalk auszubringen, kann dieser 85 Gew.-% CaCO₃ und 10 Gew.-% MgCO₃ oder aber 50 Gew.-% CaCO₃ und 40 Gew.-% MgCO₃ aufweisen.

Bodenschutzkalkung eingesetzten kohlensauren Kalken und Dolomiten ihr variierender Ca- und Mg-Gehalt bei der Ausbringungsmenge zu berücksichtigen. Dazu ist in der Tabelle 6 die SNK von Kalken verschiedener Zusammensetzung und in der Tabelle 7 die Kalkmenge angegeben, um die Basizität des zuvor genannten Beispielkalkes der Zusammensetzung 85 Gew.-% CaCO_3 und 10 Gew.-% MgCO_3 auszubringen. Kalke mit einem Anteil von weniger als ca. 80 Gew.-% basisch wirksamer Anteile sind i.d.R. für die Bodenschutzkalkung nicht geeignet. Um die CaCO_3 - bzw. MgCO_3 - Gehalte in die in der Landwirtschaft übliche Bezugsbasis CaO bzw. MgO umzurechnen, muß der entsprechende Wert mit 0,56 für CaO bzw. mit 0,48 für MgO multipliziert werden.

Tab. 7: Für die Ausbringung von ca. 58 kmol_c SNK/ha erforderliche Kalkmenge in t/ha

Calcium als Gew.-% CaCO_3	Magnesiumgehalt als Gew.-% MgCO_3									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
50					3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,7
55				3,7	3,4	3,2	3,0	2,8	2,7	
60			3,7	3,5	3,2	3,0	2,9	2,7		
65		3,8	3,5	3,3	3,1	2,9	2,7			
70	3,8	3,5	3,3	3,1	2,9	2,8				
75	3,6	3,3	3,1	2,9	2,8					
80	3,4	3,2	3,0	2,8						
85	3,2	3,0	2,8							
90	3,0	2,9								
95	2,9									

Lesebeispiel für Tab. 7: Um eine SNK von ca. 58 kmol auszubringen, können 3,6 t eines Kalkes der Zusammensetzung 75 Gew.-% CaCO_3 und 5 Gew.-% MgCO_3 oder 2,8 t eines Kalkes der Zusammensetzung 55 Gew.-% CaCO_3 und 40 Gew.-% MgCO_3 gewählt werden.

► 3.7. Ausbringungszeit

Die Ausbringungszeit ist so zu wählen, daß bei allen Maßnahmen der Bodenschutz-kalkung Beeinträchtigungen der Lebensgemeinschaften (vgl. 3.2) im Wald soweit wie möglich vermieden werden. Um dies zu gewährleisten, sind folgende Durchführungshinweise zu beachten:

- feinstaubhaltige Kalke dürfen nicht verblasen werden in
Höhenlagen < 400 m NN vom 15.03. bis 30.09.
Höhenlagen > 400 m NN vom 30.04. bis 30.09.
- Kalkungsmaßnahmen aus der Luft dürfen nicht durchgeführt werden in
Höhenlagen < 400 m NN vom 15.03. bis 30.07.
Höhenlagen > 400 m NN vom 30.04. bis 30.07.
- Vom 15.07. bis 30.09. dürfen nicht granuliert Materialien nur staubfrei ausgebracht werden (Korngröße < 0,1 mm maximal 1 % oder ausreichende Restfeuchte)

► 3.8. Ausbringungskontrolle

Um sicher zu stellen, dass die zugesagten Kalkmengen und -qualitäten auf den für die Kalkung vorgesehenen Waldflächen auch ausgebracht werden, sind verschiedene Kontrollen vorgesehen.

Für die Kontrolle der gelieferten Menge dienen die Lieferscheine und Wiegekarten. Die Verteilung des Kalkes auf der Fläche wird so überprüft, dass mindestens 30 gleichgroße Auffanggefäße (> 100 cm² Auffangfläche) repräsentativ mit einem Mindestabstand von 6 m auf einer Freifläche aufgestellt werden. Nach der Materialausbringung wird die aufgefangene Kalkmenge je Auffanggefäß bestimmt. Die Abweichung der ausgebrachten von der vertraglich vereinbarten Menge darf hierbei nicht mehr als 10 v.H. vom Mittelwert betragen. Werden größere Abweichungen festgestellt, so ist eine Nachbesserung erforderlich.

Für die Kontrolle der stofflichen Zusammensetzung der Kompensationsmittel werden bei jeder Kalkungsmaßnahme (z.B. Waldgebiet, Los) mindestens 3 repräsentative Materialproben genommen. Hierbei sollte die erste Probe möglichst früh



Bild 13: Quantitative Ausbringungskontrolle von Kalken

zu Beginn der Materiallieferung genommen werden, um bei gravierenden Abweichung von den Qualitätsanforderungen eine Ausbringung des Materials noch verhindern zu können. Die Proben für die Analyse sollten aus 5 - 10 Teilproben von je ca. 250 Gramm nach dem Zufallsprinzip aus dem angelieferten Material entnommen und in einem sauberen Gefäß (z.B. Plastikeimer) zu einer Mischprobe vereinigt werden. Von dieser Mischprobe werden Teilproben entnommen und in geeignete Transportbehälter verpackt. Eine Teilprobe wird dem Landesumweltamt für die Analyse mit einem Probenahmeprotokoll zugesandt eine andere als Rückstellprobe 6 Monate lang aufbewahrt.

Sollte die vertraglich vereinbarte Ausbringungsmenge oder die stoffliche Qualität gelieferter Kompensationsmittel geringer sein als gefordert, so sind Nachbesserungen oder Vertragsstrafen vorgesehen. Analyseergebnisse der im Jahre 2002 ausgebrachten Kompensationsmittel zeigen jedoch, dass die gelieferten Kalke die geforderten Eigenschaften aufwiesen.

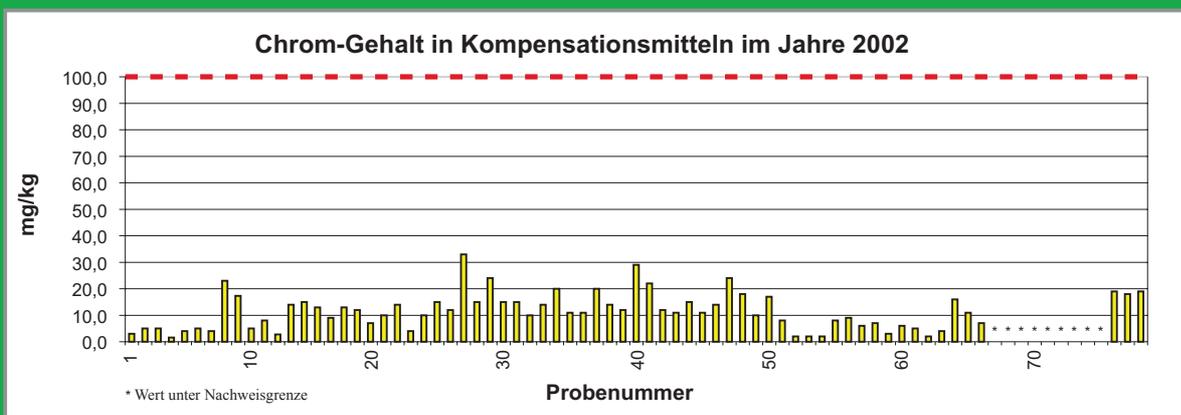
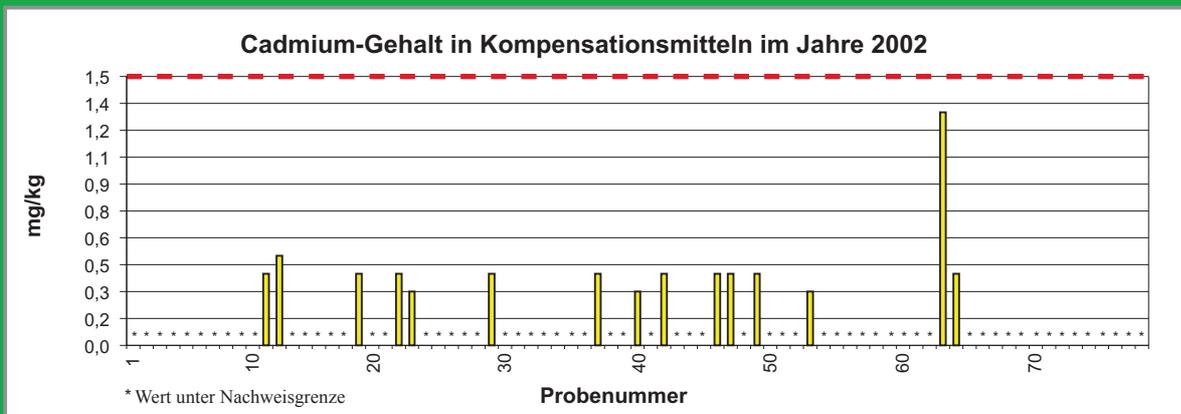
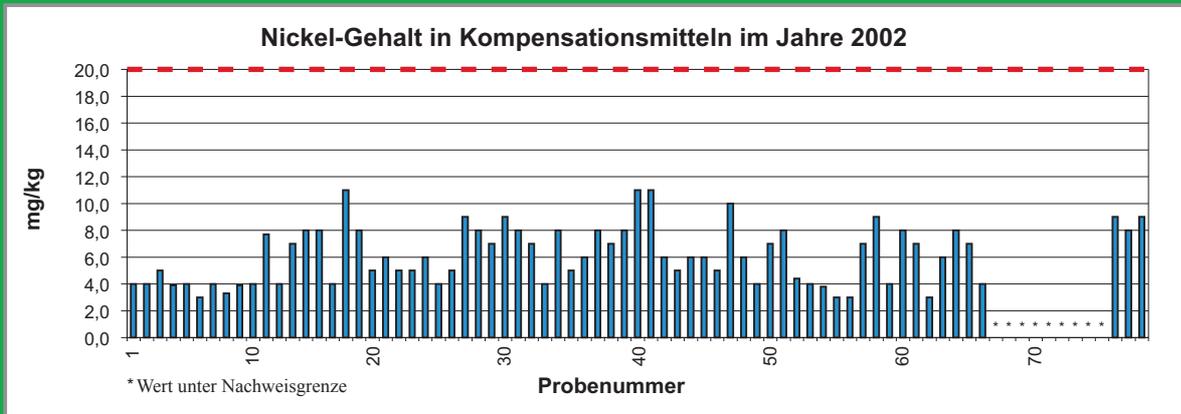
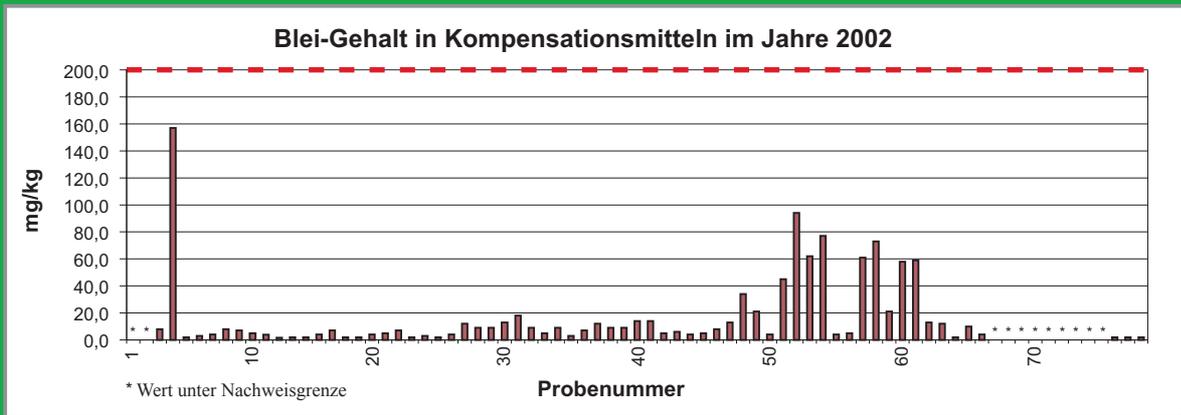


Abb. 2: Ergebnisse der stofflichen Kontrolle von Kompensationsmitteln im Jahr 2002 (Beispiele)

► 3.9. Wiederholungskalkung

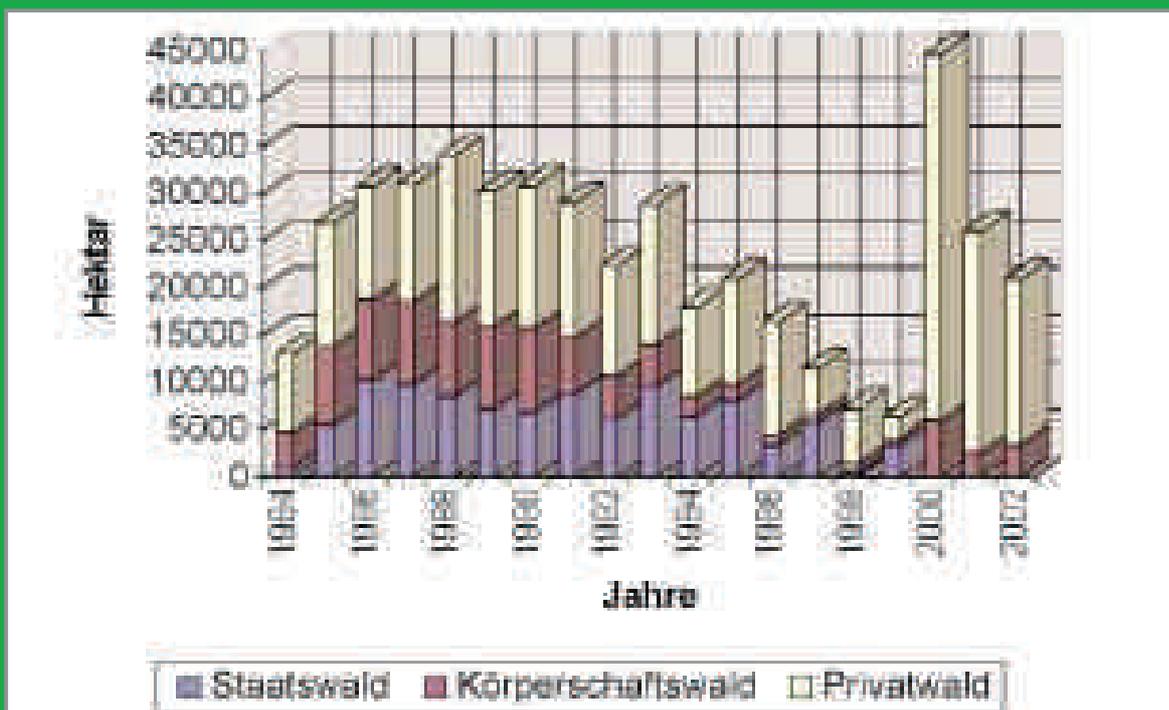
Eine Wiederholungskalkung ist nach frühestens 7 Jahren zulässig. Bei einer SNK von ca. 20 kmol_e/t Kalk, läßt sich mit der jeweiligen Rate der Säurebelastung der Zeitraum errechnen, wann der ausgebrachte Kalk aufgebraucht und eine Wiederholungskalkung sinnvoll ist. Je nach der Säurebelastung des jeweiligen Standortes dürfte die mit der Bodenschutzkalkung ausgebrachte Basizität nach 7 - 20 Jahren aufgebraucht sein. Wann und ob eine Wiederholungskalkung nötig und sinnvoll ist, ist anhand der unter Punkt 3.3 beschriebenen Kriterien zu überprüfen.

► 4. Flächenbilanz der Bodenschutzkalkung für die Jahre 1984 - 2002

Seit Beginn der Bodenschutzkalkung im Jahre 1984 wurden von der nordrhein-westfälischen Gesamtwaldfläche (ca. 915.800 ha) bis 2002 landesweit ca. 428.000 ha (= 47 v.H.; Abb. 2) gekalkt. Legt man Ergebnisse der Bodenzustandserhebung (BZE; 1989 - 1991) zugrunde, so sind ca. 75 v.H. der Waldböden in NRW unnatürlich stark versauert. Das bedeutet, daß trotz der großen Anstrengungen zur Vitalisierung unserer Wälder in den vergangenen Jahren noch beachtliche Waldflächen für eine Bodenschutzkalkung vorzusehen sind.

Betrachtet man die im Zeitraum 1984 bis 2002 **gekalkte Gesamtfläche** in Prozent der jeweiligen Waldfläche der drei Waldbesitzarten in NRW, so zeigt sich, daß im **Privatwald** (mit einem Waldflächenanteil von 65 v.H. = 593.000 ha) bisher **ca. 43 v. H.**, im Körperschaftswald (mit einem Waldflächenanteil von 19 v.H. = 179.000 ha) bisher **ca. 50 v.H.** und im Staatswald (Land und Bund mit einem Waldflächenanteil von 16 v.H. = 144.000 ha) bisher **ca. 70 v.H.** dieser Fläche gekalkt worden ist.

Gekalkte Waldfläche in NRW 1984 - 2002



► 5. Technik und Verfahren der Bodenschutzkalkung

Für die Bodenschutzkalkung können verschiedene Techniken und Verfahren eingesetzt werden. Sie lassen sich in bodengebundene Ausbringungsverfahren und Verfahren unter Einsatz von Luftfahrzeugen untergliedern. Der Umschlag der Kalke für die Ausbringung erfolgt dabei überwiegend als

Bodenumschlag:

Anlieferung des Kalkes an die zu kalkenden Flächen mit anschließender Zwischenlagerung. Beladung der Ausbringungsgeräte mit Handgeräten, Frontladern u.a.. Vorteil ist, daß die Streubehälter der Ausbringungsfahrzeuge schnell beladen werden können und eine hohe Leistung bei geringem

Standzeitrisiko - insbesondere bei Einsatz von Hubschraubern - ermöglicht wird. Kalkreste auf den Zwischenlagern sollten unbedingt beseitigt werden, da sie als störend empfunden werden.

Direktumschlag mit Transportkontainer bzw. vom LKW:

Anlieferung des Kalkes an die zu kalkenden Flächen. Das Material wird direkt aus den Lieferfahrzeugen oder mit einem Frontlader entnommen und in den Streubehälter des Ausbringungsfahrzeuges umgeschlagen. Materialverluste,



Bild 14: Kontainerumschlag

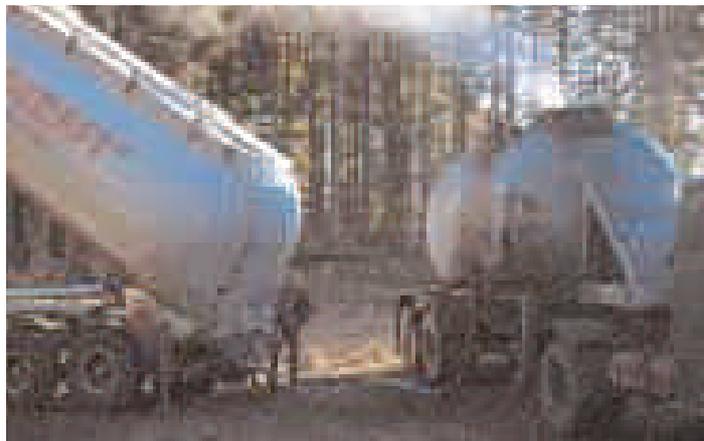


Bild 14 a: Direktumschlag mit Silofahrzeugen



Bild 15: Wechsel der Streubehälter bei Hubschrauberausbringung

Verunreinigungen und Platzbedarf für dieses Verfahren sind geringer. Der Organisationsaufwand ist hoch, da Materialbedarf und Anlieferung hier zeitnah erfolgen müssen („just in time“). Das Standzeitrisiko für Ausbringefahrzeuge - Hubschrauber wie auch für die eingesetzten Lastkraftwagen - ist hoch einzuschätzen; es kann jedoch durch entsprechende Mengenspuffer begrenzt werden.

Weitere Verfahren des Kalkumschlages sind der Umschlag mit auf LKW montierten Betonmischern (hohe Kosten, hoher Organisationsaufwand) oder mit Silofahrzeugen und Umschlag im geschlossenen System mit Druckluft ins Ausbringungsfahrzeug (hoher Organisationsaufwand, für erdgebundenes Verblasen des Kalkes geeignet).

► 5.1. Bodengebundene Ausbringungsverfahren

► 5.1.1. Ausbringung von Hand

Anlieferung und Beladung der Ausbringeegeräte: Der Kalk wird mit LKW an die zu kalkende Fläche in Säcken, Containern oder als Schüttgut geliefert. Beladung der Saatwanne mit Handgeräten.

Kalk bzw. Kompensationsmittel: Es kann jedes zugelassene Material (erdfeucht oder getrocknet) verwandt werden.

Ausbringung: breitwürfiges Ausbringen des Kalkes von Hand aus der Saatwanne.

Leistung	Gesamtkosten bei 3 t/ha
75 - 100 kg/Std. bzw. 30 - 40 Std/ha bei 3t Ausbringungsmenge	550 - 800 Euro/ha + MwSt

Verfahrensbeurteilung: Sehr hohe Arbeitsbelastung bei gleichzeitig geringer Flächenleistung. Der Organisationsaufwand ist gering. Dieses Verfahren ist lediglich für Versuchsflächen und Kleinstflächen von Bedeutung, die anderweitig nicht behandelt werden können.

► 5.1.2. Ausbringung mit Pendel- Kreisel oder Schleuderstreuer

Anlieferung und Beladung der Ausbringeegeräte: Der Kalk wird mit LKW an die zu kalkende Fläche als Schüttgut, in Containern oder Silofahrzeugen geliefert. Beladung der Streuer erfolgt mit Frontladern oder im Direktumschlag.

Kalk bzw. Kompensationsmittel: Es kann jedes zugelassene Material (erdfeucht oder getrocknet) verwandt werden.

Ausbringung: Ausstreuen des Kalkes in Streifen von 5 - 10 m in befahrbaren Beständen mit Geräten, die einen geringen Bodendruck verursachen.

Verfahrensbeurteilung: Einsatz in befahrbaren Lagen und Beständen; geringer Organisationsaufwand. Die gleichmäßige Kalkausbringung hängt von den



Bild 16:
Kalkausbringung
mit Kreiselstreuer



Bild 17:
Kalkausbringung mit
mit pferdegezogenem
Schleuderstreuer

Leistung	Gesamtkosten bei 3 t/ha
2,5 - 6 t/Std. bzw. 0,5 - 1 Std/ha bei 3 t Ausbringungsmenge	80 - 130 Euro/ha + MwSt

Gelände- und Bestandeseigenschaften ab. Steigungen über 20 %, Wasserläufe, Blocküberlagerung, u.a. begrenzen die Einsatzmöglichkeiten. Da bei diesem Verfahren eine intensive Befahrung der Bestände erfolgt, ist die Gefahr von Wurzelschäden und einer Bodenverdichtung hoch. Das Verfahren kann für den kleinparzellierten bäuerlichen Privatwald eine betrieblich angepasste Lösung sein, da hier eigene Schlepper sowie Transport- und Umschlagsgeräte kostengünstig eingesetzt werden können. In stadtnahen Wäldern kann die Akzeptanz der Bodenschutzkalkung durch Einsatz von pferdegezogenen Schleuderstreuern gesteigert werden.

► 5.1.3. Ausbringung mit Verblasegeräten

Anlieferung und Beladung der Ausbringeeräte: Der Kalk wird mit LKW an die zu kalkende Fläche in Silofahrzeugen geliefert. Mit Überdruckschläuchen wird der Kalk vom Lieferfahrzeug in das Druckgefäß des Verblasegerätes direkt umgeschlagen. Neue Verfahren erlauben auch den Einsatz erdfeuchter Materialien und die Beladung der Streufahrzeuge mit Frontladern. Die Ausbringungstechnik kann dabei auf verschiedenste Fahrzeuggrundtypen (Unimog, Forwarder, Kettenfahrzeuge, u.a.) montiert sein.

Kalk bzw. Kompensationsmittel: Neben feinvermahlenden, trockenen (Restfeuchte 2 - 4 v.H.), staubförmigen Kalken können mit weiterentwickelten Ausbringungsgeräten (Blas- Wurftechnik) auch erdfeuchte Kalke mit dem in Tab. 2 genannten Korngrößenspektrum eingesetzt werden. Das Problem, dass grobe Bestandteile bereits nach kurzer Distanz zu Boden fallen, während feinere Anteile wesentlich weiter in den Bestand gelangen, ist bei den weiterentwickelten Verblasegeräten deutlich verbessert.



Bild 18: Kalkausbringung mit weiterentwickeltem Verblasegerät



Bild 19: Roteichenbestand unmittelbar nach dem Kalkverblasen

Leistung	Gesamtkosten bei 3 t/ha
4 - 9 t/Std.	100 - 200 Euro/ha + MwSt

Ausbringung: Problemlos ist das Verblasen von Kalk in unterholzarmen Baumhölzern von Wegen und Rückegassen aus möglich. In Dickungen und Bestände mit reich gegliedertem Waldrand bzw. -trauf ist dieses Verfahren nicht geeignet. Die Ausbringungsbreite beträgt ca. 15 - 30 m. Um eine gleichmäßige Kalkverteilung zu erreichen, wird die entsprechende Fläche von zwei Seiten bzw. Wegen aus behandelt (gegenseitiges Verblasen) oder, es erfolgt ein streifenweises Verblasen, wobei sich die einzelnen Streifen überlappen.

Verfahrensbeurteilung: Einsatz in Wäldern mit einem dichten Wege und Rückewegnetz und Wäldern im Siedlungsbereich, die mit anderen Verfahren nicht bearbeitet werden können. Eine Befahrung von Beständen ist zu vermeiden (Stichwort: Bodendruck). Der Organisationsaufwand ist hoch. Die Anwendung dieser Verfahrenstechnik in der Vegetationszeit ist wegen möglicher Beeinträchtigungen, insbesondere von Insekten, (vgl. 3.7) nicht zulässig. Die Verblaseweite der Geräte reicht bis ca. 60 m. Hierbei ist die Querverteilung des Kalkes ungleichmäßig mit geringen Mengen im Nah- und Fernbereich

des Gerätes (bis ca. 5 m) und > ca. 40 m und hohen bzw. gewünschten Mengen in dem Zwischenbereich. Um die gleichmäßige Ausbringung zu erreichen, werden Flächen „gegenseitig“ bzw. „streifenweise“ behandelt. Kalke mit hoher Kornfestigkeit, die von leistungsstarken Geräten mit hoher Wurfenergie ausgebracht werden, können Schäden an der Spiegelrinde junger Bäume, jungen Trieben und Blättern, insbesondere im Nahbereich des Verblasegerätes, verursachen.

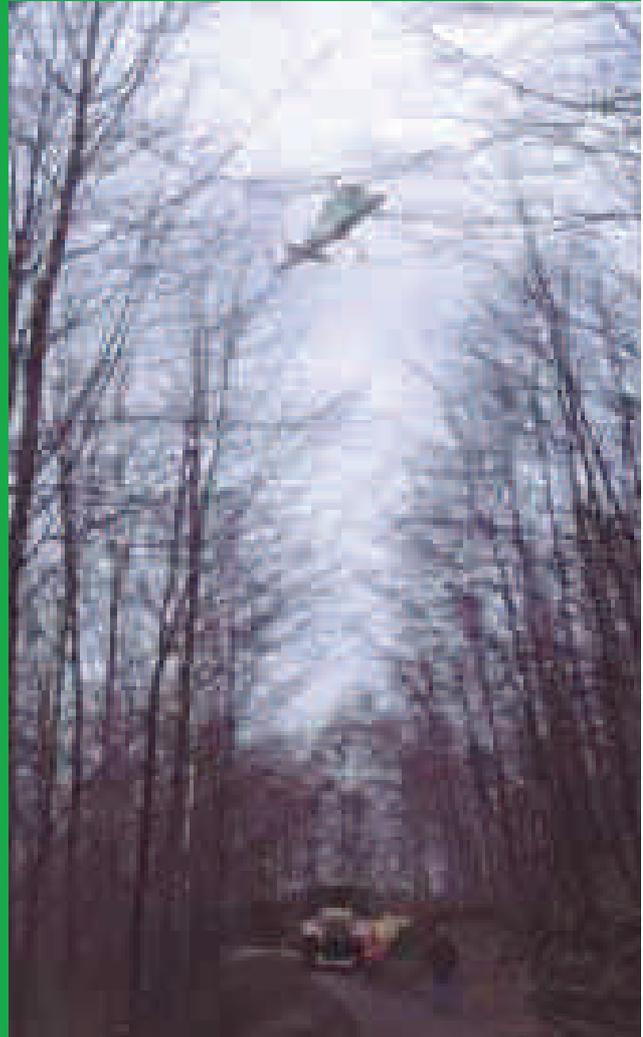
► 5.2. Ausbringung mit Luftfahrzeugen

► 5.2.1. Ausbringung mit Hubschraubern

Anlieferung und Beladung der Ausbringergeräte: Der Kalk wird mit LKW an die zu kalkende Fläche als Schüttgut, in Containern oder Silofahrzeugen geliefert. Hier kann je nach Größe der zu kalkenden Fläche ein zentraler oder mehrere dezentrale Umschlagplätze eingerichtet werden. Beladung des Streubehälters, der an einem langen Seil unter dem Hubschrauber hängt, erfolgt mit Frontladern. Hier wird z.T. mit mehreren Streubehältern gearbeitet, um die Standzeiten des Hubschraubers gering zu halten. Für die Ausbringung können verschiedenste Hubschraubertypen eingesetzt werden.

Kalk bzw. Kompensationsmittel: Es kann jedes zugelassene Material verwandt werden. Um die Staubwirkung gering zu halten sind trockene Materialien mit einem Staubanteil < 1 v.H. und erdfeuchte Stoffe (Restfeuchte > 3 v.H.) für die Hubschrauberausbringung zugelassen.

Ausbringung: Die zu kalkenden Flächen werden auf Karten (1 : 5000, bzw. 1 : 10000) genau verzeichnet. Sind die Grenzen nicht klar an Bestandeslinien oder Waldaußengrenzen zu erkennen, müssen die Außengrenzen für die Waldkalkung gut sichtbar signalisiert werden (u.a. Marken am Boden, Ballon). Das Material wird über den Beständen aus dem Streubehälter in ca. 20 - 25 m breiten Streifen gleichmäßig ausgebracht und gelangt direkt bzw. mit nachfolgenden Niederschlägen auf den Waldboden. Die durchschnittliche Ausbringungsleistung liegt je nach eingesetztem Hubschraubertyp zwischen 13 - 50 t / Std. bzw. 4 - 18 ha / Stunde.



Bilder 20/21/22:
Kalkausbringung mit Hubschrauber



Gesamtkosten bei 3 t/ha			
kohlensaurer Magnesiumkalk	Kalkgranulat	Forsthüttenkalk	Aschen aus Braunkohle (TAV)
120-180 Euro/ha + MwSt.	150-270 Euro/ha + MwSt.	140-170 Euro/ha + MwSt.	150-270 Euro/ha + MwSt.

Verfahrensbeurteilung: Sehr hoher Organisationsaufwand für Planung und Realisierung bei hoher Leistung. Die Kalkausbringung erfolgt sehr waldschonend, da eine Befahrung der Flächen unterbleibt. Besondere Anforderung (Standorte, Artenschutz, u.a.) können leicht berücksichtigt werden. Die Kalkausbringung auf der Fläche erfolgt gleichmäßig. Besonders geeignet ist dieses Verfahren daher in wenig erschlossenen Lagen der Mittelgebirge aber auch des Flachlandes. Da dieses Verfahren zudem preisgünstig angewandt werden kann, wird es derzeit auf ca. 95 v.H. der zu kalkenden Flächen eingesetzt.

► 5.2.2. Ausbringung mit anderen Luftfahrzeugen

Andere Luftfahrzeuge (z.B. Starrflügler) wurden bisher in NRW zur praktischen Waldkalkung nicht eingesetzt.

► 6. Wirkungskontrolle im Waldökosystem

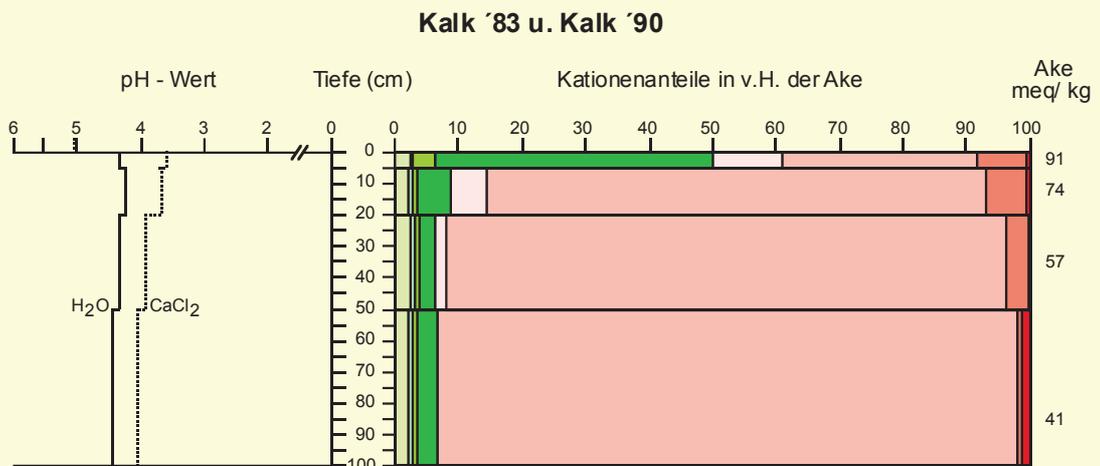
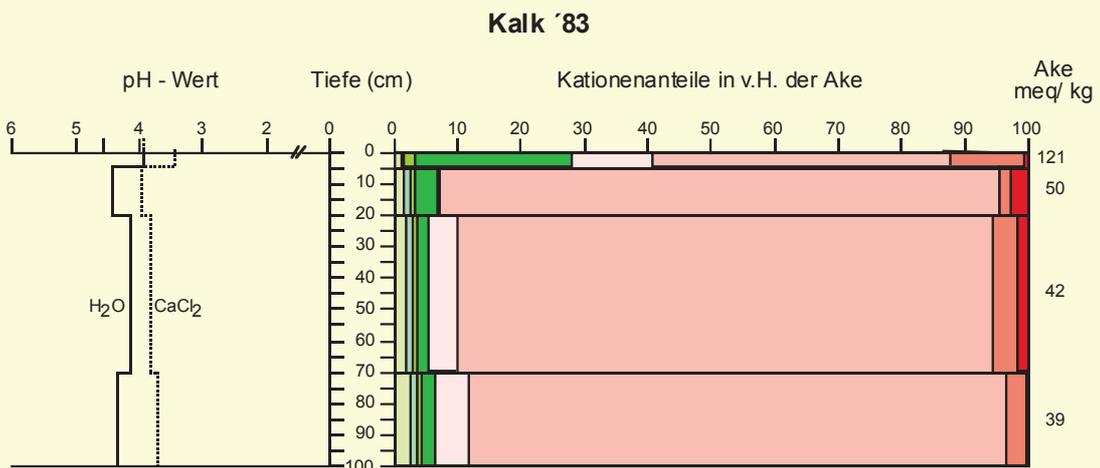
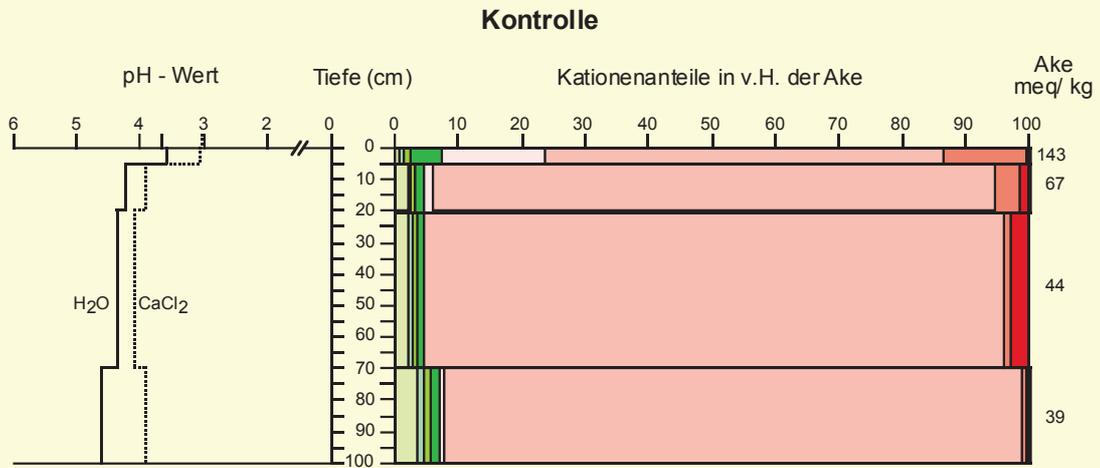
Um die Wirkung der Bodenschutzkalkung auf das Ökosystem Wald zu dokumentieren, um mögliche negative Effekte rechtzeitig zu erkennen und um zu überprüfen, ob die Ziele der Bodenschutzkalkung (Kap. 3.1) auch erreicht werden, wird seit Anfang der achtziger Jahre von der LÖBF eine Wirkungskontrolle durchgeführt. Hierzu wurden in NRW Versuchsflächen angelegt, auf denen die Wirkung des Kalkes auf die Bodenfestphase, die Humusform, das Sickerwasser, die Baumernährung, das Wurzelsystem, die Bodenvegetation und das Bodenleben untersucht und dokumentiert wird. Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden vorgestellt.

► 6.1. Bodenfestphase

In Wälder eingetragene bzw. dort gebildete Säuren werden im Mineralboden abgepuffert und hierbei in schwächere Säuren überführt bzw. neutralisiert. Bei dieser Säurepufferung wird eine äquivalente Basenmenge (i.d.R. irreversibel) verbraucht. Das bedeutet, daß jedes in den Boden gelangende Säureteilchen dort wirkt. Der Mineralboden kann je nach Bodeneigenschaften (Ausgangsgestein, Kationenaustauschkapazität, Basensättigung, u.a.) eine mehr oder weniger große Säuremenge puffern bzw. speichern. Diese Pufferung bzw. Speicherung erfolgt i.d.R. in Form austauschbarer Kationen (u.a. H, Al, Fe, Mn). Gleichzeitig verringert sich dabei der Anteil austauschbar gespeicherter (Nähr-)Kationen bis nur noch ein „eiserner Bestand“ (ca. 5 v.H. Basensättigung der Austauscher, HILDEBRAND, 1986) vorhanden ist (Abb. 3, Kontrolle). Ist dieser Zustand erreicht, weisen solche Böden eine hohe Säurestärke (pH-Werte < 4) und große Mengen adsorbierter Säure auf. Die Versauerung schreitet in solchen Böden in die Tiefe fort und hat in einigen Fällen in NRW bereits Grundwasserleiter erreicht.

Mit der Kalkung wird diesem Prozess entgegengewirkt. Dies ist an leicht erhöhten pH-Werten in der Humusaufgabe und den oberen Mineralbodenschichten messbar und an einer erhöhten Belegung der Austauscher dieser Schichten mit Ca und Mg (Basensättigung) zu erkennen (Abb. 3, gekalkte Flächen).

Abb. 3: Bodenchemische Kenndaten auf den Versuchsflächen in Monschau 1992



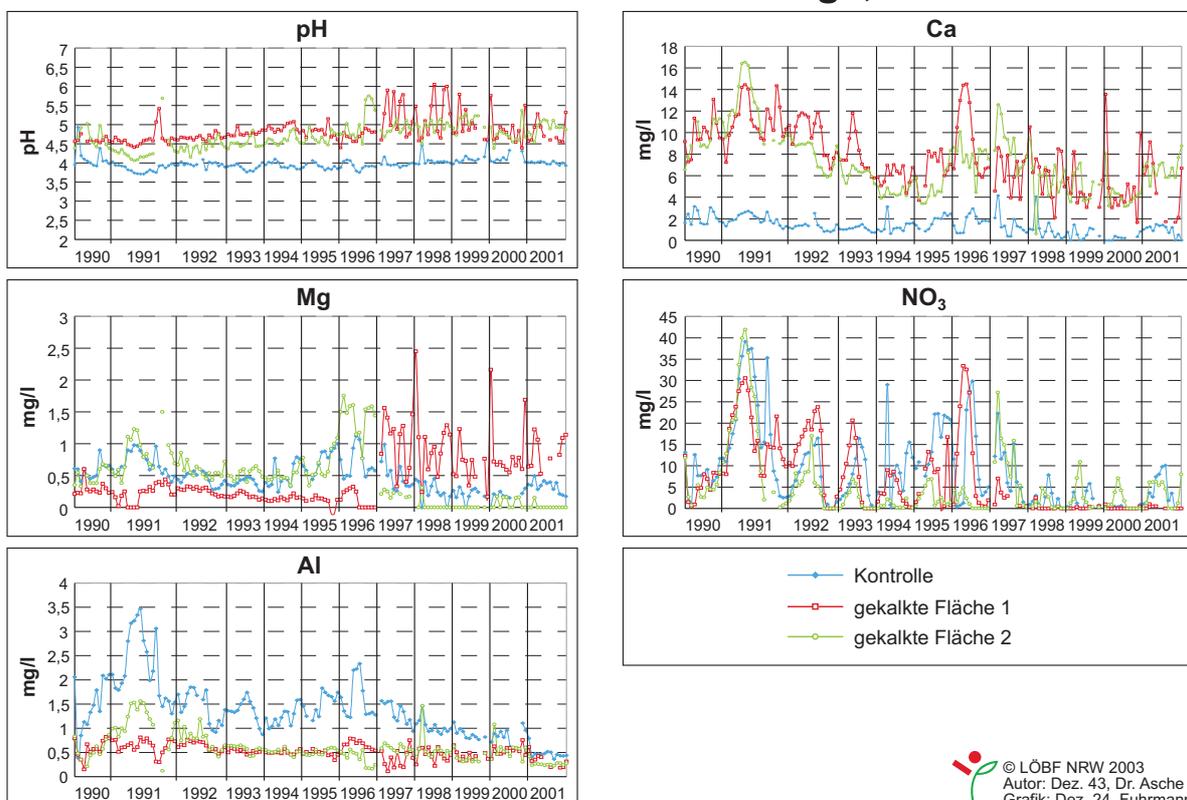
K
 Na
 Mg
 Ca
 H
 Al
 Fe
 Mn

Autor: Dez. 43 Dr. Asche Grafik: Dez. 14.4, Fuhrmann

► 6.2. Sickerwasser

Pflanzen nehmen mit ihren Feinwurzeln Wasser und Nährstoffe aus der den Boden durchsickernden Bodenlösung auf. In versauerten Böden liegt die Säurestärke der Bodenlösung um bzw. unter pH 4. Gleichzeitig sind die Konzentrationen wichtiger Nährelemente, wie z.B. Magnesium, Calcium, gering und Konzentrationen von

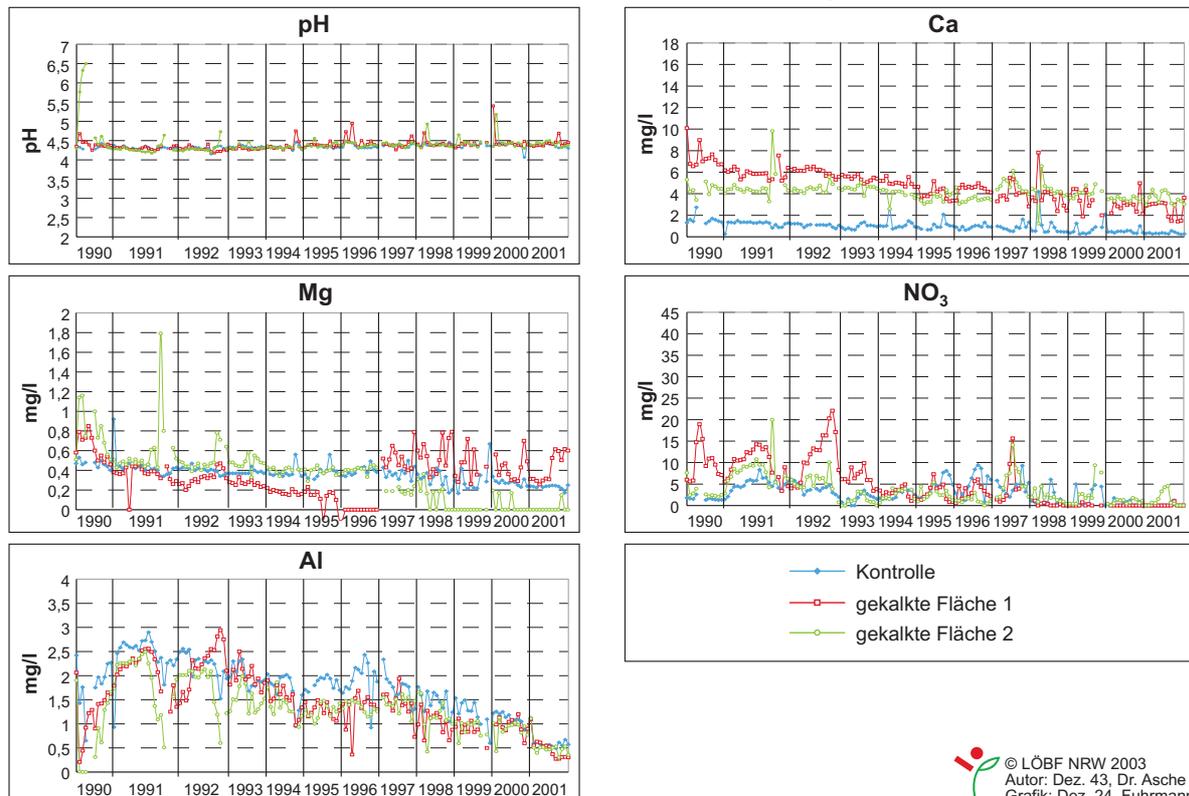
Abb. 4: Elementkonzentrationen in mg/l, Tiefe 10 cm



© LÖBF NRW 2003
Autor: Dez. 43, Dr. Asche
Grafik: Dez. 24, Fuhrmann

giftig auf Feinwurzeln und Bodentiere wirkendem Aluminium hoch. In der Abbildung 4 sind Konzentrationen ausgewählter Elemente als Zeitreihe in 10 cm Tiefe auf der Kontrollfläche und zwei gekalkten Fläche in Arnsberg zusammengestellt. Die Daten zeigen, daß auf der gekalkten Fläche die pH-Werte, und die Calcium-Gehalte der Bodenlösung deutlich höher und die Aluminium-Gehalte deutlich geringer sind als auf der Kontrollfläche. Auffällig ist, dass die Aluminium-Konzentrationen auf allen Flächen ab Ende 2000 deutlich zurückgingen. Die Nitrat-Konzentrationen weisen einen deutlichen Jahresgang mit hohen Gehalten im Sommer und

Abb. 5: Elementkonzentrationen in mg/l, Tiefe 90 cm



© LÖBF NRW 2003
Autor: Dez. 43, Dr. Asche
Grafik: Dez. 24, Fuhrmann

geringen im Winter auf. Ab dem Jahr 1998 wurden jedoch deutlich geringe Spitzenwerte auf den Versuchsflächen gemessen. Ein Unterschied zwischen nicht gekalkten und den gekalkten Flächen ist nicht ausgeprägt.

In der Tiefe 90 cm sind die durch die Kalkung bewirkten Änderungen der Bodenlösung (Abb. 5) nicht so deutlich ausgeprägt wie in 10 cm Tiefe. pH-Werte und Aluminium-Konzentrationen unterscheiden sich zwischen den Flächen nur wenig. Dabei deuten abnehmende Aluminium- und Nitrat-Gehalte auf eine verminderte Säurebelastung der Flächen hin. Deutlich höhere Konzentrationen auf den gekalkten Flächen wurden dagegen für Calcium gemessen. Das zeigt, dass das oberflächlich ausgebrachte Calcium bis in diese Tiefe verlagert wird und dort seine günstigen Wirkungen entfalten kann.

Im Gegensatz zu der Tiefe 10 cm überschreiten die NO₃-Konzentrationen Werte von 15 mg/l nur an einzelnen Terminen auf den gekalkten Flächen. Mit ca. 5 mg NO₃/l liegen die gemessenen Werte auf der Kontrollfläche bis 1993 unter denen der gekalk-

ten Flächen. Ab 1994 ist dieser Unterschied nicht mehr zu erkennen, wobei die Konzentrationen auf beiden Flächen zeitweise unter der Nachweisgrenze für Nitrat liegen. Wichtig ist, daß die hohen Nitratkonzentrationen des Oberboden nicht in dem Ausmaß in den Unterboden verlagert wurden. Offensichtlich ist ein erheblicher Teil des gebildeten Nitrates von der Vegetation und den Mikroorganismen aufgenommen und so vor einer Auswaschung aus dem Waldökosystem bewahrt worden.

Ein wichtiges Maß, ob Feinwurzeln oder auch Bodentiere durch giftig wirkende Stoffe, wie z.B. Aluminium, geschädigt werden können, ist das Calcium/-Aluminium (mol/mol) Verhältnis in der Lösung. Errechnet man diesen Kennwert für die hier vorgestellten Flächen und Bodenlösungen ergeben sich die in Tabelle 8 zusammengestellten Werte.

Tab. 8: Calcium/Aluminium-Verhältnis (Mol/Mol) in Sickerwässern auf Versuchsflächen in Arnsberg 1990 - 2001

Tiefe in cm	Nullfläche			Kalk A			Kalk B		
	x	min	max	x	min	max	x	min	max
10	0,75	0,13	4,23	10,86	1,49	50,85	9,83	0,28	51,95
30	0,70	0,10	7,28	12,24	3,49	52,00	22,54	0,22	382,17
90	0,40	0,11	2,83	2,65	1,29	21,70	4,49	0,84	282,08

Aus den Daten der Tabelle 8 ist zu erkennen, daß das Ca/Al-Verhältnis auf der Kontrollfläche im Mittel (x) unter dem kritischen Wert 1 liegt und Schäden an Feinwurzeln nicht ausgeschlossen werden können. Dies gilt insbesondere für die Tiefe von 90 cm, wo auch noch sehr geringe Konzentrationen organischer Stoffe gemessen werden, die die giftige Wirkung des Aluminiums abmildern. Auf den gekalkten Flächen liegt das Calcium/Aluminium-Verhältnis deutlich über dem Wert 1, sodaß die Gefährdung von Feinwurzeln und auch Bodentieren durch Aluminium gering ist. An diesen Kennwerten kann die gewünschte positive Wirkung der Kalkung klar erkannt werden.

► 6.3. Wurzelsystem

Als Ergebnis einer Literaturstudie kommt KAUPENJOHANN (1995) zu dem Schluß, daß die Wurzelsysteme der Waldbäume nach oberflächiger Kalkung verflachen. Sollten als Folge der Bodenschuttkalkung Waldbäume tatsächlich ihre Wurzeln im Oberboden verstärkt ausbilden und aus dem Unterboden zurückziehen (Wurzelsystemverflachung), so dürfte dies erhebliche negative Auswirkungen für die Stabilität der Waldbäume und die Wälder haben. Um diese These zu überprüfen, wurden auf den Versuchflächen in Obereimer jeweils 2 Buchen auf der ungekalkten und der gekalkten Fläche ausgewählt und Wurzelgrabungen durchgeführt (ASCHE, 1999).

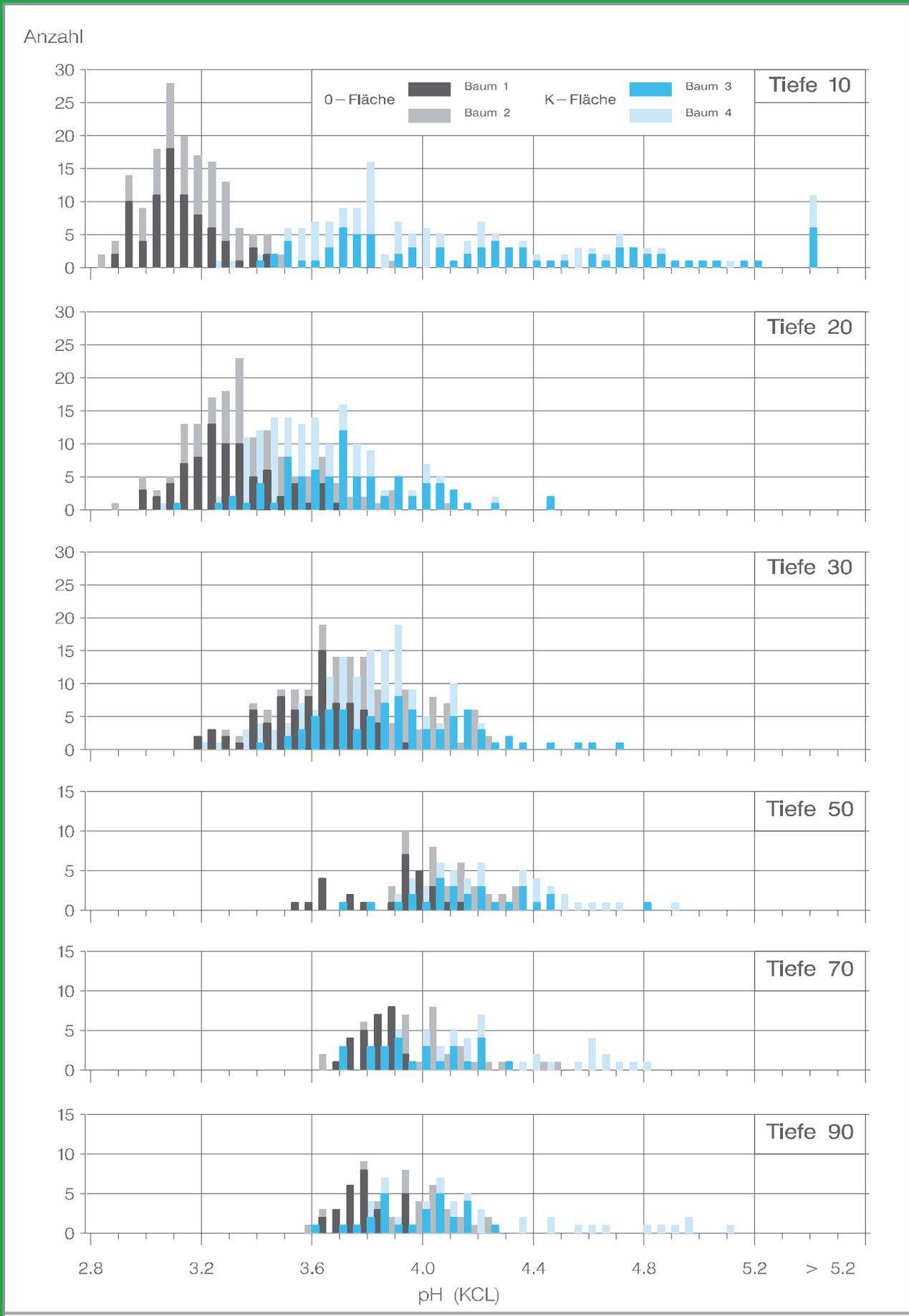
Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen (Abb. 6), daß sich die Säurestärke in den Wurzelgräben im Oberboden der Kontrollfläche zwischen pH(KCl) 2,8 und 3,5 bewegt und bis auf pH-Werte von 3,6 bis 4,3 in der Tiefe 90 cm ansteigen. Im Boden der gekalkten Fläche wurde eine deutlich andere Verteilung der pH(KCl)-Werte gefunden. Die gemessenen pH-Werte waren höher, insbesondere in der Tiefe bis 20 cm, und die Spannweite war mit ca. 2 pH-Einheiten deutlich größer, verglichen mit der Kontrollfläche.

Der Trend zu höheren pH-Werten im Unterboden auf der gekalkten Fläche im Vergleich zur Kontrollfläche ist aus Abb. 6 klar zu erkennen. Er ist statistisch hochsignifikant. Die räumliche Heterogenität der Bodenmatrix kann diese Unterschiede nur teilweise erklären.



Bild 23: Anlage eines Wurzelgrabens

Abb. 6: pH (KCl) Häufigkeiten in den Wurzelgräben



Dieses Ergebnis zeigt, daß oberflächlich ausgebrachter Kalk in erheblichem Umfang in tiefere Bodenschichten transportiert wird (vgl. Abb. 5) und hier zu einer Verminderung der Säurestärke führen kann.

Die Zählergebnisse der Wurzelverteilung wurden auf eine einheitliche Profildbreite von 1 m bezogen. Aus der Abb. 7 ist zu entnehmen, daß die höchste Feinstwurzel-dichte für alle Bäume in der Tiefe 10 - 40 cm angetroffen wurde. Die geringe Wurzelanzahl in der Tiefe 0 - 10 cm kann eine Folge des durch die Grabung gestörten

Oberbodens sein. Die Feinstwurzelzahlen der Bäume auf der gekalkten Fläche (K1, K2) sind im Vergleich zu den Bäumen auf der Kontrollfläche (01, 02) in der Tiefe 70 - 90 cm leicht erhöht. Möglicherweise deuten diese Zahlen auf eine bessere Tiefenerschließung des Bodens durch die Bäume auf der Kalkfläche hin.

Vergleicht man die Verteilung der Grobwurzeln im Boden für die untersuchten Bäume (Abb. 8), so sind klare Unterschiede der Tiefen- und Häufigkeitsverteilung

Abb. 7: Feinstwurzelverteilung bezogen auf 1 m Grabenlänge

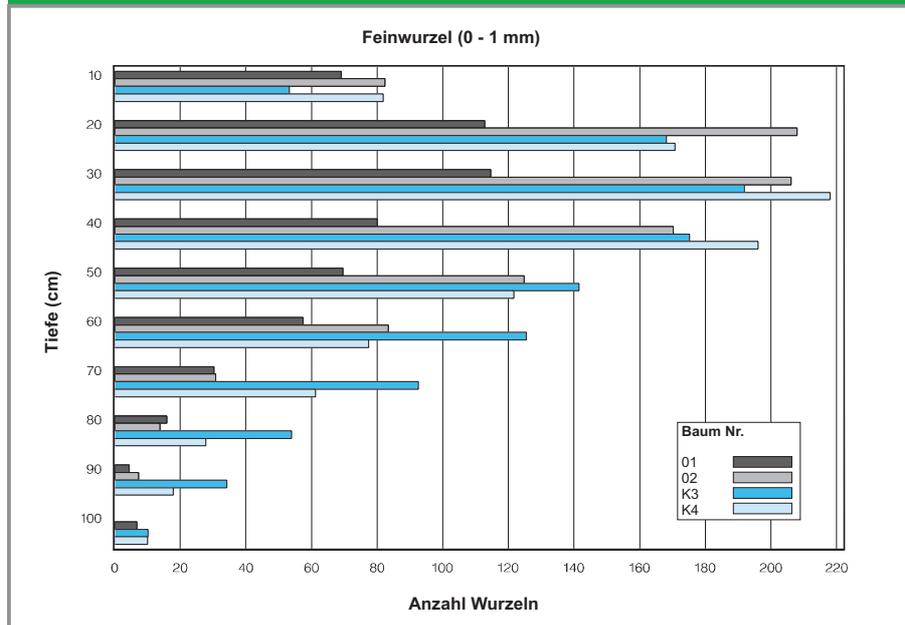


Abb. 8: Grobwurzelverteilung bezogen auf 1 m Grabenlänge

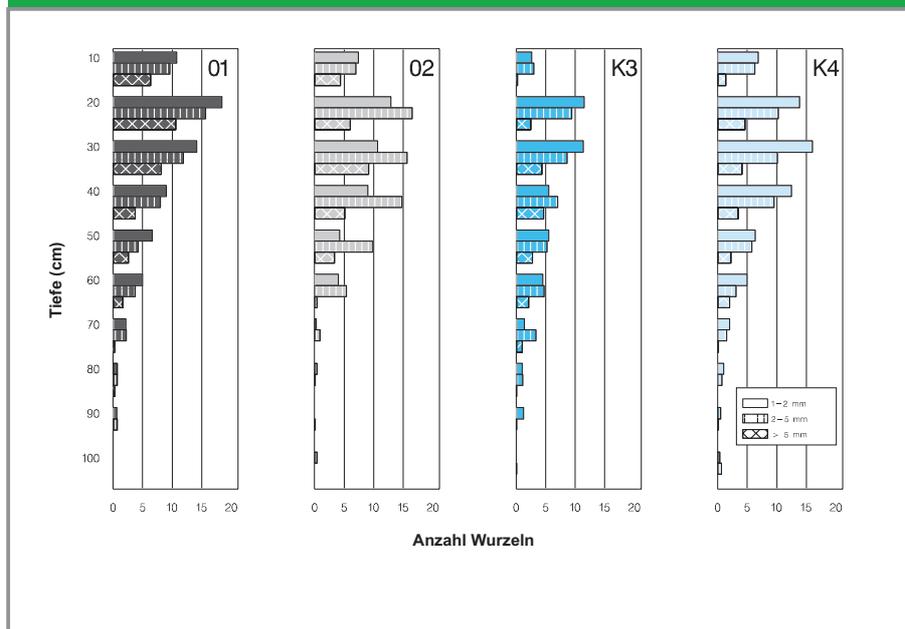




Bild 24: Wurzelzählung an der Bodenprofilwand

nicht zu erkennen. Das bedeutet, daß die unterschiedliche Flächenbehandlung bisher keinen Einfluß auf die Tiefenverteilung stärkerer Wurzeln hatte.

Die Ergebnisse dieser Wurzelgrabung zeigen, daß Buchen auf einer gekalkten Fläche in einem Zeitraum von ca. 15 Jahren kein flacheres Wurzelsystem ausgebildet haben als Bäume auf einer vergleichbaren, unbehandelten Fläche.

► 6.4 Bodenleben

Die im Boden lebenden Tiere und Mikroorganismen beeinflussen bzw. tragen wesentlich zum Streuabbau, der Humusbildung, der Lockerung, Umlagerung, Durchlüftung und Drainage von Böden bei. Die Leistung dieser Lebewesen kann deutlich daran erkannt werden, dass auf basenreichen Standorten eine arten- und zahlenreiche Zersetzergemeinschaft i.d.R. die Streu der Wälder sehr schnell abbaut bzw. in den Mineralboden einmischt und so einen lockeren Boden mit der Humusform Mull bildet. Auf basenarmen, sauren Böden ist diese Zersetzergemeinschaft durch andere Arten charakterisiert und weniger leistungsfähig als auf basenreichen Böden. Folge ist, dass die organischen Abfälle nicht mehr intensiv in den Mineralboden eingemischt werden und sich eine Humusauflage ausbildet. Unter ungünstigen Bedingungen bildet sich Rohhumus mit einer brechbaren Feinhumuslage, die auf die geringe Aktivität der Zersetzergemeinschaft hinweist. Oftmals weist der Mineralboden eine plattige kompakte Struktur auf, die ungünstig für die Bodendurchlüftung, die Wasserspeicherkapazität und das Wurzelwachstum ist.

Von den zahllosen Lebewesen der Zersetzerkette kommt den Regenwürmern eine besondere Bedeutung zu. Ihr Anteil an der tierischen Biomasse in Wäldern auf Kalkstein kann bis zu 50 v.H. betragen. Durch ihre Aktivität leisten sie die Vermischung der Streu mit dem Mineralboden (Ton-Humus-Komplexe), schaffen ein Krümelgefüge und legen gleichzeitig das für die Durchlüftung wichtige Grobporensystem an und erneuern es ständig. Diese Leistung der Regenwürmer wurde bereits von DARWIN (1881) beschrieben.

Die Regenwürmer können in drei ökologische Gruppen eingeteilt werden:

- Die Gruppe der epigäischen (u.a. *Lumbricus rubellus*, *Dendrobaena octaedra*) besiedelt die organische Auflage und durchwühlt den Mineralboden nur an der Grenze zum Auflagehumus. Sie ernähren sich überwiegend saprophag (humusfressend).
- Die Gruppe der endogäischen (u.a. *Octolasion lacteum*, *Aporrectodea rosea*) besiedeln den Mineralboden. Sie ernähren sich überwiegend geophag (bodenfressend).
- Die Gruppe der anözischen (u.a. *Lumbricus terrestris*) besiedeln ausschließlich den Mineralboden und legen tiefe, dauerhaft bewohnte Röhren an. Ihre Nahrung ist organisches Material, das sie von der Oberfläche in ihre Wohnröhren hineinziehen.



Bild 25: Erfassung der Regenwürmer



Bild 26: Gefundene Regenwürmer auf der Probefläche

Um zu erfahren, wie die Regenwurmpopulationen auf Kalkversuchsflächen ausgebildet sind, wurden hierzu gezielte Untersuchungen durchgeführt (POTTHOFF u. ASCHE, 2003). Ein Ergebnis dieser Untersuchungen ist (Tab. 9), dass auf den Null-Flächen mit z.T. sehr tiefen pH-Werten nur wenige der epigäischen Gruppe zugehörige Würmer gefunden wurden. Auf den gekalkten Flächen bei

etwas verminderter Säurestärke war die Anzahl der dieser Gruppe zugehörigen Regenwürmer im Vergleich zur Kontrolle deutlich erhöht. Auf den Kalkflächen in

Tab. 9: Regenwürmer auf Kalkversuchsflächen

Anzahl Würmer pro m², Frühjahrsbestand

Fläche	Kalkmenge	pH(H ₂ O)*	Ökologische Gruppen**		
			epigäisch	anözisch	endogäisch
Obereimer	0	3,49 3,40 - 3,50	0	0	0
	12 t	4,64 4,09 - 4,93	51,3 32 - 84	0	60,7 0 - 260
	6 t Asche	4,56 4,02 - 5,14	83,3 52 - 124	0	3,3 0 - 8
Monuschau	0	3,97 3,82 - 4,16	5 0 - 12	0	0
	6 t	4,22 3,94 - 4,57	12,5 0 - 224	2,5 0 - 72	13,5 0 - 212
	12 t	4,15 3,85 - 4,65	9,25 0 - 12	0,25 0 - 4	0,25 0 - 4
Kleve	0	3,5 3,43 - 3,53	4 0 - 8	0	0
	6 t	3,61 3,51 - 4,14	14 0 - 48	0	0
	9 t	3,86 3,63 - 4,27	15 0 - 44	0	0
Bad Driburg	Kalk-Buchenwald	6,52 5,08 - 7,10	12 24 - 140	16 0 - 24	52 16 - 116

* Angeben: Median, minimaler und maximaler Wert

** Angeben ist der Mittelwert und der gemessene kleinste und größte Wert (kleine Zahlen)

Obereimer wurden darüber hinaus auch Würmer der endogäischen Gruppe gefunden. Überraschend ist, dass auf den Kalkflächen in Monschau sogar einzelne tiefgrabende, der anözischen Gruppe zugehörige, Würmer nachgewiesen werden konnten. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Befunden in einem Buchenwald auf Kalkgestein mit pH-Werten um 6,5, so wird deutlich, dass insbesondere die Anzahl der Würmer der ökologischen Gruppen anözischen und endogäischen dort deutlich höher ist als auf den untersuchten Kalkungsflächen. Jedoch zeigen die Ergebnisse auch, dass als Folge der Kalkung die Lebensmöglichkeiten für die Regenwürmer deutlich verbessert wurden. Dies ist auch an einer lockereren Humusaufgabe im Vergleich zu den Null-Flächen im Wald zu erkennen. Ziel der Bodenschutzkalkung ist dabei nicht, eine Kalk-Buchenwald typische Regenwurmfauna in anderen Waldgesellschaften anzustreben.

► 6.5. Baumernährung

Mit ihren Wurzeln nehmen Waldbäume Wasser und darin gelöste Nährelemente auf. Der Ernährungszustand - Mangel, optimale Ernährung, Luxusversorgung - läßt sich anhand der Elementgehalte und ihrer Verhältnisse zueinander in Blättern bzw. Nadeln der Bäume einschätzen. Auf Versuchsflächen in Obereimer, Kleve, Monschau und Hilchenbach werden seit 1991 ausgewählte Rotbuchen kontinuierlich auf ihren Ernährungszustand untersucht. Dabei wurden die auf den gekalkten Flächen 1982 und 1990 jeweils 2 mal 6 t Forsthüttenkalk/ha ausgebracht.

Die in Tabelle 10 zusammengestellten Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, daß die **Calcium-Gehalte (Ca)** der Blätter auf den Kontrollflächen mittlere Werte von 3,6 - 6,4 mg/g TS aufweisen. Die



Bild 27: Ernte von Buchenblättern mit Zapfenpflückern

dabei gemessene Abweichungen von diesem Mittelwert kann z.T. sehr groß sein. Sie spiegelt kleinstandörtliche Eigenschaften, unterschiedliche klimatische Schwankungen zwischen den untersuchten Jahren und physiologische Zustände der Bäume (z.B. Mastjahr) wider. Auf den gekalkten Flächen sind die Ca-Gehalte der Blätter 2 bis 3 mal so hoch wie auf den Kontrollflächen. Der Bereich zwischen dem kleinsten und größten gemessenen Wert ist hier auch deutlich erhöht.

Die **Magnesium-Konzentrationen** (Mg) der Buchenblätter auf den Kontrollflächen lagen (Tab. 10) unter dem von BERGMANN (1988) mit 1,5 mg/g TS angegebenen Wert einer ausreichenden Mg-Versorgung. Die Schwankung um diesen Mittelwert ist auch bei diesem Element sehr groß. Sehr geringe mittlere Mg-Gehalte wurden dabei auf der Fläche in Hilchenbach gemessen. Bei einer mittleren

Tab. 10: Gehalte ausgewählter Nährelemente in Buchenblättern in mg/g TS auf Versuchsflächen in NRW 1991 - 2000

Angegeben ist der Mittelwert und der gemessene kleinste und größte Wert (kleine Zahlen)

	Arnsberg		Monschau		Hilchenbach		Kleve	
	Nullfläche	Kalk	Nullfläche	Kalk	Nullfläche	Kalk	Nullfläche	Kalk
Ca	4,2 2,6-5,6	11,3 4,8-16,1	6,3 4,0-10,1	10,5 7,4-14,9	3,6 1,6-6,0	9,3 5,9-14,5	3,8 2,1-5,4	9,3 5,9-12,3
Mg	0,79 0,37-1,2	1,6 0,60-2,8	0,90 0,45-1,7	1,4 0,75-2,4	0,51 0,32-0,98	0,91 0,4-1,7	1,0 0,55-1,8	1,7 0,82-3,2
Mn	0,86 0,53-1,3	0,57 0,31-0,88	1,1 0,65-1,8	0,53 0,20-0,91	1,9 1,2-2,6	1,4 0,73-2,9	1,2 0,66-1,8	1,2 0,58-2,2
K	6,5 3,5-11,3	4,1 1,7-6,9	6,6 3,6-11,0	5,4 3,3-8,4	3,7 1,5-5,7	4,1 1,9-7,2	6,1 4,1-9,2	5,4 2,9-7,5
N	24,1 19,8-31,2	19,0 9,2-23,8	22,9 19,4-29,7	21,9 17,3-28,3	21,8 19,0-24,7	21,9 18,7-27,3	26,0 23,5-29,1	25,1 22,0-28,5
Asche- gehalt*	4,2 23,3-63,0	11,3 6,1-68,7	6,3 31,5-50,4	10,5 43,2-69,0	3,6 14,0-32,7	9,3 28,8-50,6	3,8 25,3-50,3	9,3 44,2-67,3

* Analysedaten der Jahre 1996 - 2000

Mg-Versorgung mit ca. 0,5 mg/g TS, die auf den Kontrollflächen z.T. noch deutlich unterschritten wurde, können Wuchsstockungen aufgrund von Mg-Mangel nicht ausgeschlossen werden. Auf den gekalkten Flächen haben die Buchen deutliche höhere mittlere Mg-Gehalte als auf der Kontrollfläche und erreichen den Bereich einer ausreichenden Versorgung. Lediglich die Bäume in Hilchenbach bewegen sich mit mittleren Gehalten von ca. 0,9 mg/g TS noch im Bereich einer unzureichenden Mg-Ernährung.

Hohe Blattgehalte an **Mangan** (Mn) weisen auf eine Säurebelastung der Buchen im Wurzelraum hin. Die Daten der Tabelle 10 zeigen, daß die Mn-Gehalte der Bäume auf den gekalkten Flächen unter denen der Kontrollflächen liegen. Dies bedeutet, daß durch die Kalkung die Säurebelastung der Bäume im Wurzelraum deutlich vermindert werden konnte (vgl. 6.2). Auf der Fläche in Kleve ist dieser Zusammenhang an dem Mittelwert nicht zu erkennen. Hier wurden gleiche mittlere Mn-Gehalte der Blätter auf der Kalk- und der Kontrollfläche gefunden, was auf eine weiterhin hohe Säurebelastung der Bäume hinweist.

Kalium (K) ist für die Regulation des Wasserhaushaltes der Bäume sehr wichtig. Die Daten der Tab. 10 zeigen, daß die K-Gehalte auf den Kontrollflächen höher liegen als auf den gekalkten Flächen. Auffällig ist dabei der weite Streubereich der Werte. In Hilchenbach mit den geringsten K-Gehalten auf der Kontrollfläche wurden auf der gekalkten Fläche im Mittel etwas höhere Werte gemessen. Dieser Befund scheint darauf hinzudeuten, dass auf diesem stark versauertem Standort durch die Kalkung auch die K-Verfügbarkeit für die Buchen verbessert wurde. Legt man den von BERGMANN (1988) vorgeschlagen Grenzwert (10 mg/g TS) zugrunde, sind alle Bäume unzureichend mit K versorgt. Nach neueren Untersuchungen (HÜTTL, 1992) dürften die gemessenen Gehalte - auch auf den gekalkten Flächen - für ungestörte physiologische Abläufe der Bäume noch ausreichend sein.

Stickstoff (N) ist einer der wichtigsten Pflanzennährstoffe. Er wird heute in großen Mengen in Wälder eingetragen und kann dann von den Bäumen für ihr Wachstum genutzt werden. Auf den Kontrollflächen sind die Bäume ausreichend bis sehr gut mit Stickstoff versorgt (Tab. 10). Hierbei schwanken die gemessenen Gehalte zwischen den untersuchten Bäumen und den einzelnen Jahren beträchtlich. Auf den ge-

kalkten Flächen wurden - trotz der hohen Stickstoffeinträge aus der Luft und einer verbesserten Nährstoffumsetzung als Folge der Kalkung - geringere (aber optimale) mittlere Gehalte in den Buchenblättern gemessen als auf der Kontrollfläche. Dies ist besonders wichtig, da dieses Ergebnis zeigt, dass die Bäume nicht nur mit wichtigen Mineralstoffen auf den gekalkten Flächen besser versorgt sind, sondern auch der Stickstoffhaushalt der Bäume durch die Maßnahme stabilisiert wird.

Der **Aschegehalt** ist ein summarischer Kennwert. Er umfasst alle nach der Oxidation / Verbrennung zurückbleibenden Mineralstoffe und ist ein Maß für die „Mineralstoffpumpe“ der Waldbäume. Dieser Kennwert (Tab. 10) zeigt, dass auf den Kontrollflächen im Mittel geringere Aschegehalte gemessen wurden als auf den gekalkten Flächen. Das belegt, dass die Buchen benötigte Mineralstoffe leichter und in größeren Mengen auf den gekalkten Flächen aufnehmen konnten als auf den Kontrollen. Dieses

Tab. 11: Nährelementverhältnisse auf nicht gekalkten Flächen (1991 - 2000)

Fläche	K/Ca	N/P	N/K	N/Mg	N/Ca	N/S
Arnsberg	1,6	18,7	3,9	32,6	5,8	14,0
Monschau	1,1	21,4	3,7	27,2	3,8	13,6
Hilchenbach	1,1	17,2	6,5	46,7	6,9	14,7
Kleve	1,7	22,9	4,5	27,5	7,2	14,1

Ergebnis stimmt mit dem überein, dass für einzelne Elemente beschrieben wurde. Für ein gutes und störungsfreies Baumwachstum ist nicht nur die Menge des einzelnen Nährelementes wichtig, sondern auch, daß die Nährstoffe in einem ausgewogenen Verhältnis von den Pflanzen aufgenommen bzw. für ihre Lebensprozesse genutzt werden können (Tab. 11). Eine normale, ausgewogene Ernährung kennzeichnen folgende Verhältnisse: N/P 12 - 17, N/K 2,5 - 3,3, N/Mg 12 - 22, N/Ca 1,8 - 3,3. Ein Mangel bzw. eine unausgewogene Ernährung ist durch folgende Kennzahlen charakterisiert: N/P >24, N/K > 4,7, N/Mg > 24 und N/Ca > 6,2. Nahezu alle Daten der Tabelle 11 zeigen, dass die Bäume auf den nicht gekalkten Flächen nicht ausgewogen ernährt sind. Dies gilt insbesondere für das N/Mg- und das N/Ca-Verhältnis. Hier deuten die Daten auf einen Mangel an Ca bzw. Mg oder aber auf eine sehr hohe Stickstoffversorgung der Bäume hin. Das N/K- und das N/P-Verhältnis

liegt zwischen einer normalen, ausgewogenen Versorgung und dem Mangelbereich. Als Folge der Kalkung haben sich die Nährelementverhältnisse in den Blättern in Richtung einer ausgewogeneren Nährstoffversorgung entwickelt (Tab. 12). Das N/Ca- und das N/Mg-Verhältnis liegt auf den Kalkflächen in einem normalen, ausgewogenen Bereich. Wenig verändert hat sich das N/K-Verhältnis während das K/Ca-Verhältnis sich verengt hat.

Tab. 12: Nährelementverhältnisse auf zweimal gekalkten Flächen (1991 - 2000)

Fläche	K/Ca	N/P	N/K	N/Mg	N/Ca	N/S
Arnsberg	0,4	14,6	5,0	13,6	1,8	14,1
Monschau	0,5	15,4	4,1	16,2	2,1	13,3
Hilchenbach	0,4	14,2	5,7	26,4	2,4	14,0
Kleve	0,6	20,1	5,0	17,3	2,9	14,4

► 6.6. Buchenfrüchte

Für die langfristige Entwicklung der Wälder ist die erfolgreiche Verjüngung der Waldbäume eine Grundvoraussetzung. Dabei zeigen verschiedene Erhebungen, dass die Verjüngung der Waldbäume um so besser möglich ist, je besser die jeweiligen Standortbedingungen und je vitaler die Bäume sind. Im Bereich der Hunau wurden im Herbst 2000 Bucheckern mit jeweils fünffacher Wiederholung in Netzen in einem gekalkten und einem nicht gekalkten Buchenbestand aufgefangen und auf wichtige Merkmale untersucht. Die Ergebnisse zeigen (Tab. 13), dass die Bucheckern auf der mit 3 t/ha gekalkten Fläche deutlich verminderte Mn-Gehalte und erhöhte Ca-



Bild 28: Buchenfrüchte

und Mg-Konzentrationen im Vergleich zu der Kontrollfläche aufweisen. Die anderen dargestellten Elemente unterscheiden sich auf den betrachteten Flächen nur wenig.

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal für das Saatgut der Waldbäume ist deren 1000 Korngewicht und der Anteil der lebensfähigen Samen. Die Untersuchung der Buch-

Tab. 13: Gehalte ausgewählter Nährelemente in mg/g TS in Bucheckern im Bereich der Hunau im Jahre 2000
 Angegeben ist der Mittelwert und der gemessene kleinste und größte Wert (kleine Zahlen)

	Hunau	
	Nullfläche	Kalk
Ca	3,1 2,44-3,78	4,0 3,78-4,43
Mg	1,4 1,30-1,56	1,7 1,3-1,87
Mn	0,38 0,30-0,48	0,21 0,19-0,23
K	6,2 5,98-6,30	5,9 5,87-6,35
N	28,5 26,0-31,0	28,4 27,0-29,0
Aschegehalt	29,3 27,0-31,0	30,3 28,0-33,0

eckern auf diese Merkmale zeigte (Tab. 14), dass die Samen auf der gekalkten Fläche im Mittel um ca. 25 v.H. schwerer sind, als die Samen von der nicht gekalkten Fläche. Der Anteil der lebensfähigen Samen unterscheidet sich zwischen den Flächen nicht. Dieser Befund zeigt, dass die Bucheckern im Mittel auf der gekalkten Fläche nicht nur besser mit wichtigen Nährstoffen, sondern auch noch signifikant schwere und damit besser mit Reservestoffen versorgt sind, als Samen auf nicht gekalkten Flächen. Hierdurch dürfte die Verjüngung von Buchen auf gekalkten Flächen deutlich verbessert sein.

Tab. 14: Vitalitätsmerkmale von Bucheckern im Bereich der Hunau im Jahre 2000
 Angegeben ist der Mittelwert und der bestimmte kleinste und größte Wert (kleine Zahlen)

	Hunau	
	Nullfläche	Kalk
1000 Korn Gewicht in g	218,0 200,4-237,2	272,3 244,0-306,5
Samen lebensfähig in %	80,2 72,3-85,9	79,7 69,6-90,5
Samen nicht lebensfähig in %	19,8 14,1-27,8	20,3 9,5-30,4
Holkorn in %	0,6 0-1,5	1,3 0,5-2,5

► 6.7. Bodenvegetation, Naturverjüngung der Waldbäume

Stark versauerte Böden weisen i.d.R. eine Bodenvegetation aus säuretoleranten Arten (u.a. Drahtschmiele, Heidelbeere, Dornfarn, Bürstenmoos) mit oftmals geringen Deckungsgraden in geschlossenen Beständen auf. Als Folge der Kalkung wird das geringe walddgesellschaftstypische Arteninventar oftmals erweitert (u.a. Fuchskreuzkraut, Sauerklee, Hainsimse, Frauenfarn,

Waldhabichtskraut, Harzer Labkraut). Anspruchsvolle Arten der Bodenvegetation (u.a. Sauerklee) können sich dann dauerhaft auf behandelten Flächen ansiedeln und erhöhte Deckungsgrade erreichen, wenn die im Oberboden gespeicherte Säuremenge neutralisiert wurde. Auf derartigen Flächen findet auch ein allmählicher Umbau des Auflagehumus in Mineralbodenhumus statt, was ganz wesentlich durch die auf diesen Flächen aktiven, tiefgrabenden Regenwürmer geleistet wird (ASCHE und HALVERSCHEID, 1998).



Bild 29: Vor 40 Jahren gekalkter Buchenbestand



Bild 31: Mullhumus und tiefer humoser Oberboden auf gekalkter Teilfläche

Bild 30: Moderhumus und geringmächtiger humoser Oberboden auf ungekalkter Teilfläche



Die natürliche Verjüngung unserer Waldbaumarten wird durch die Waldkalkung deutlich gefördert (TRÜMPER, 1937). Dies konnte anhand gezielter Versuche gezeigt (BECKER, 1983, GEHRMANN u. ULRICH, 1983) werden und ist im Wald auf zahlreichen Flächen zu erkennen. Ein sehr eindrückliches Beispiel, wie die Waldkalkung die Naturverjüngung der Buche in den Hochlagen des Sauerlandes fördert, findet sich auf der Hunau. Auf gekalkten Flächen findet sich eine üppige Verjüngung aus Buche und Fichte, wogegen auf den nicht gekalkten Flächen nur einzelne Fichtensämlinge angekommen sind.



Bild 32: Vitale Buchen- und Fichtennaturverjüngung auf gekalkten Flächen im Hochsauerland (Hunau)



Bild 33: Bodenvegetation auf nicht gekalkter Fläche (NWZ) im Hochsauerland (Hunau)

4 x 4 km erfaßt. Das bedeutet, dass jeder Punkt rechnerisch eine Fläche von 1600 ha repräsentiert. Von den 498 erfaßten Punkten lagen 102 in gekalkten Flächen. Dies entspricht einer geschätzten Kalkungsfläche von ca. 163.000 ha bis zum Jahr 1990. Sie stimmt gut mit anderen Statistiken überein (vgl. 4.).

Um die Wirkung der Waldkalkung auf die in der BZE erfaßten Böden herauszuarbeiten, wurden für eine weitere Auswertung nur die Punkte berücksichtigt, die einen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 5$ und eine Basensättigung der Austauschschicht < 40 v.H. in der Tiefe 0 - 5 cm aufwiesen. Diese Bedingung erfüllten 429 Punkte. Von diesen Punkten sollen 325 nicht gekalkt sein, während 102 nach vorliegenden Unterlagen gekalkt worden sind.

Die Auswertung ergab, dass Flächen ohne Kalk in der O_F -Lage deutlich niedrigere $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte aufweisen, als die gekalkten Flächen (Abb. 9).



Bild 34: Vitaler Buchenwald

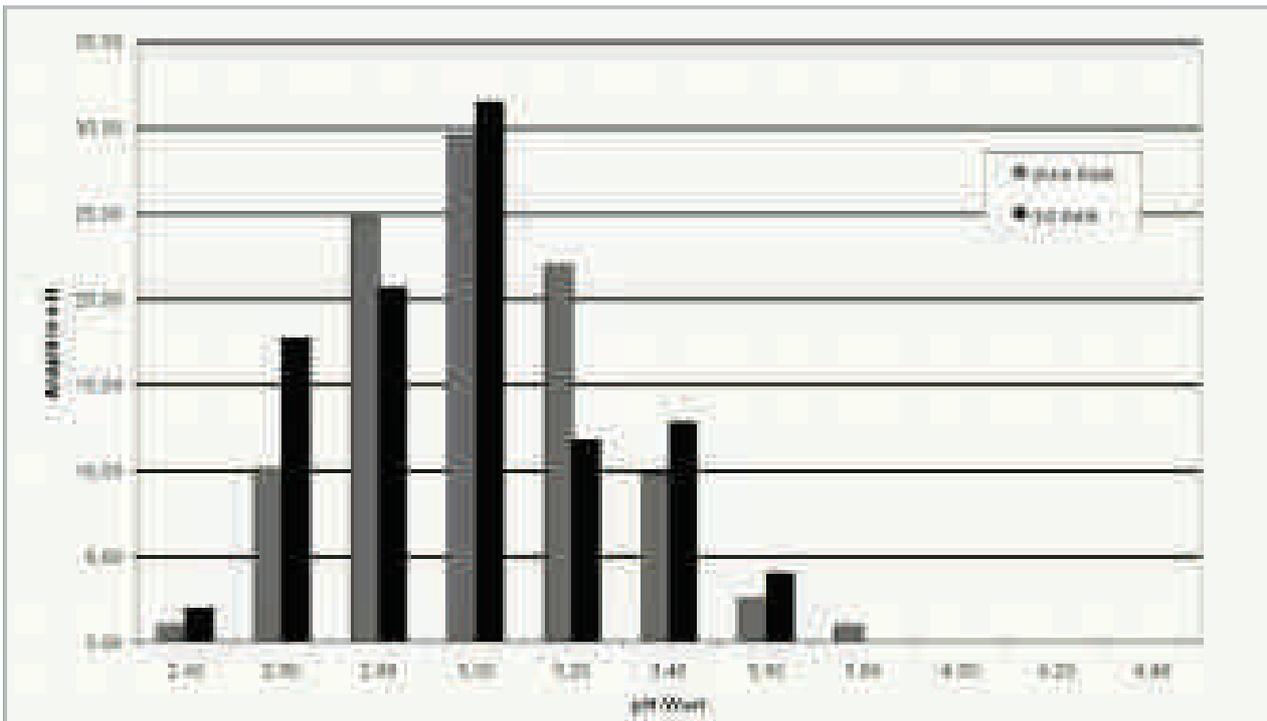


Abb. 11: pH(KCl)-Werte in 0 - 5 cm Tiefe

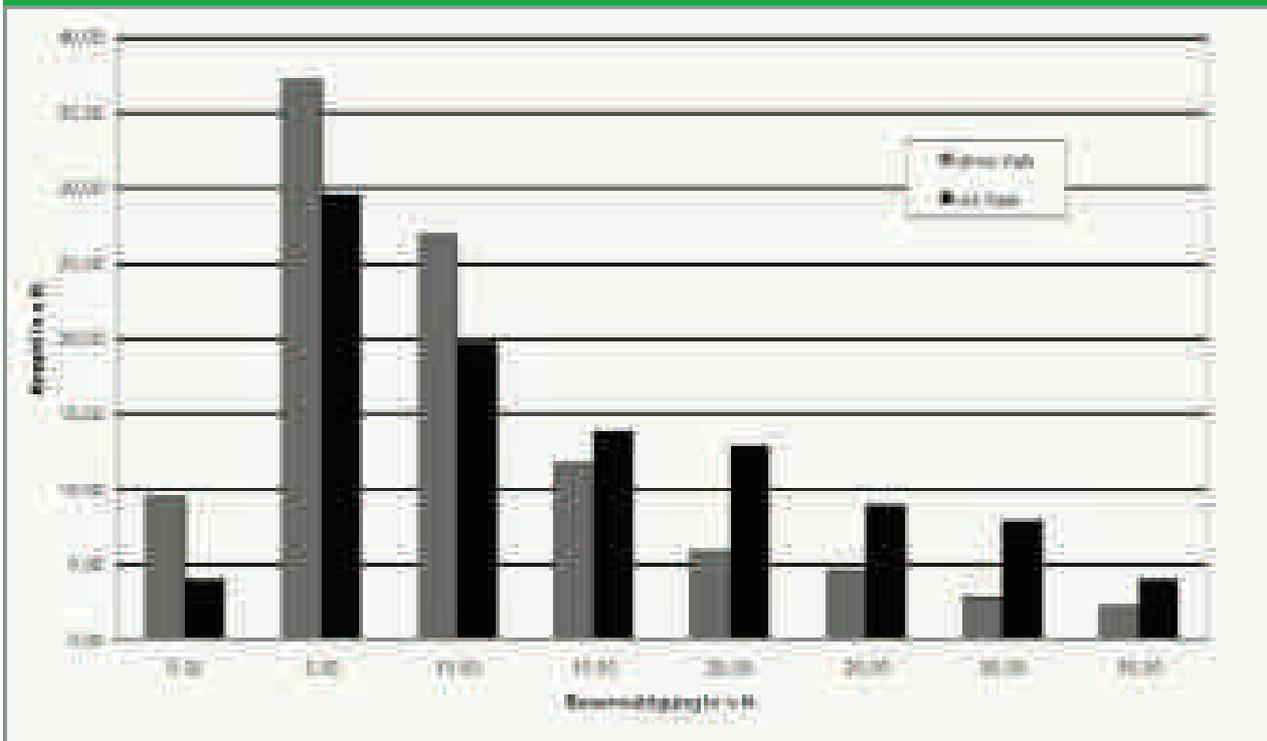


Abb. 12: Basensättigung in v.H., Tiefe 0 - 5 cm

Die höheren pH-Werte auf den gekalkten Flächen in der O_F-Lage finden ihre Entsprechung in deutlich erhöhten Ca und Mg Gehalten in der O_F-Lage im Vergleich zu den nicht gekalkten Flächen (Abb. 10). In der O_H-Schicht sind die in

der O_F-Lage beschriebenen Unterschiede zwischen gekalkten und nicht gekalkten Flächen deutlich schwächer ausgeprägt aber immer noch zu erkennen.

In der oberen Mineralbodenschicht 0 - 5 cm liegen nahezu alle pH(KCl)-Werte unter pH 3,8 und damit in einem Bereich, in dem eine Kalkung als dringend erforderlich angesehen wird (vgl. 3.3). Unterschiede in der Säurestärke zwischen gekalkten und nicht gekalkten Flächen sind kaum zu erkennen (Abb. 11).

Die Basensättigung der Austauscher in der Tiefe 0 - 5 cm zeigt demgegenüber einen Trend zu etwas höheren Werten auf den gekalkten Flächen. (Abb. 12).

Fazit:

Die Bodenschutz- bzw. Waldkalkung mit 3 t/ha hat nach den Ergebnissen der BZE nur einen mäßigen Einfluß auf den chemischen Bodenzustand. Dieser Einfluß ist anhand geeigneter Parameter im Wald jedoch zu erkennen.

► 7. Förderung der Bodenschutzkalkung

Kommunal- und Privatwald können im Rahmen der „Waldbaulichen Maßnahmen zur Eindämmung der neuartigen Waldschäden“ für die Durchführung einer Kompensationskalkung einschließlich Boden-, Blatt- und Nadelanalysen einen Zuschuß von 90 v.H. der zuwendungsfähigen Ausgaben (ohne Mehrwertsteuer) erhalten. Hierzu ist ein entsprechender Förderungsantrag an die jeweils lokal zuständige Untere Forstbehörde (Forstamt) zu richten. Die Vorbereitung und Durchführung von Bodenschutzkalkungen wird von den Forstämtern organisiert. Sie stehen auch für weitere Informationen vor Ort zur Verfügung.

► 8. Ausblick

Die Bodenschutzkalkung kann nicht die dringend erforderlichen Maßnahmen zur Luftreinhaltung ersetzen. Derzeit ist die Bodenschutzkalkung aber die einzige Möglichkeit in unserer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Forstwirtschaft, die durch Säureeinträge beschleunigte Bodenversauerung und dadurch bedingte Risiken und Schäden in den Waldökosystemen abzumildern. Gleichzeitig wird hierdurch auch das Vordringen der Säuren in tiefe Bodenschichten verhindert und so auch ein effektiver Schutz für ein weiterhin qualitativ hochwertiges Trinkwasser aus bewaldeten Wassereinzugsgebieten gewährleistet. In ihrer Wirkung kann die Bodenschutzkalkung dabei durch gezielte waldbauliche Maßnahmen unterstützt werden. Solange die Säurebelastungen der Waldböden höher liegen, als ihre Säureneutralisationskapazität, wird die Kalkung als Übergangsmaßnahme zum Boden- und Grundwasserschutz erforderlich bleiben.

► 9. Begriffserläuterungen

Biozönose:

Gemeinschaft der in einem Lebensraum regelmäßig vorkommenden Pflanzen- und Tierarten, die untereinander und mit ihrer abiotischen Umwelt in Wechselwirkung stehen.

Boden:

Der oberste Bereich der festen Erdrinde. Hier werden die Gesteine durch die Einwirkung von Stoffen und Energien aus der Atmosphäre und durch Lebewesen umgewandelt. Je nachdem wie die Gesteine, das Klima und die Lebensgemeinschaften in einem Raum ausgebildet sind, entwickeln sich unterschiedliche Böden mit zahlreichen Eigenschaften

Bodenversauerung:

Bedingt durch den Eintrag säurebildender Substanzen (saurer Regen) aber auch durch natürliche Umsetzungs- und Abbauvorgänge findet eine Zunahme der Säuremenge bzw. Säuresättigung im Boden statt. Als Folge davon können Nährstoffe wie Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Kalium (K) ausgewaschen werden, womit diese für die Pflanzenernährung nicht mehr zur Verfügung stehen. Schreitet die Versauerung über einen längeren Zeitraum fort, so wird Aluminium (Al), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) mobilisiert. Vor allem Aluminium wirkt bereits in geringen Konzentrationen giftig auf das Feinwurzelsystem unserer Waldbäume; aber auch Bodenlebewesen werden hierdurch beeinträchtigt.

Calciumcarbonat:

(CaCO₃) als Kalkstein in der Natur weit verbreitet.

Carbonat:

(CO₃) Salz der Kohlensäure.

Chlorose:

Verminderung oder Verlust des grünen Blattfarbstoffes Chlorophyll; eine Ursache dürfte ein Mangel an Nährelementen (z.B. Mg) sein.

Deposition:

Ablagerungen von luftgetragenen Stoffen auf Oberflächen (z.B. auf Pflanzen, Boden)

- nasse... indirekter Transport von Luftverunreinigungen in und an der Oberfläche von Wassertropfen, Schnee, Hagel, Nebel, etc. aus der Luft auf die Erdoberfläche bzw. Wälder
- trockene... direkter Transport von Luftverunreinigungen (Gasen, Stäuben) auf Vegetation, Boden, Wasser.

Elastizität:

von Ökosystemen besteht, wenn auch katastrophale Streßsituationen, die aber für den Standort typisch sind kompensiert werden können. Sie wird stark von den Bodeneigenschaften und den verfügbaren Diasporen mitbestimmt.

Emission:

Ausstoß von Schadstoffen an der Quelle - durch Kamine, Auspuffrohre usw.

Gleichgewicht:

Als im Gleichgewicht befindlich sollte man ein Ökosystem nur dann bezeichnen, wenn man es mit Recht stabil nennen darf oder wenn die gegenwärtige Phase seines regelmäßigen bzw. längerfristigen Entwicklungskeislaufes gut ausgebildet ist.

Humusform:

Humusprofil gleicher Horizontfolge, ähnlicher Horizontmächtigkeit und Art der Horizontbegrenzung. Humusformen, die noch keinen durchgehenden Oh-Horizont entwickelt haben, werden als Mineralboden-Humusformen (u.a. Mull) bezeichnet. Humusformen, die einen Oh-Horizont entwickelt haben, werden als Auflage-Humusformen (u.a. Moder, Rohhumus) beschrieben.

Immission:

Einwirken von Luftschadstoffen auf Mensch, Tier, Pflanze, Boden und Sachgüter.

Kompensationskalkung (Bodenschutz-, Waldkalkung):

Ausbringung von Kalk, um ein weiteres Absinken des pH-Wertes des Waldbodens durch Säureeintrag zu verhindern und somit den negativen Folgen einer weiteren Bodenversauerung entgegenzuwirken.

Mykorrhiza:

(Pilzwurzel) Lebensgemeinschaft von Pilzen mit Wurzeln höherer Pflanzen z.B. Bäumen. Zwischen Pilz und Wurzel kommt es zu einem Stoffaustausch, der für beide Partner von Vorteil ist: der Pilz liefert Wasser- und Nährstoffe, der Baum stellt im Gegenzug Zucker zur Verfügung.

Nitrat:

(NO₃) Salz der Salpetersäure.

Ökosystem:

Wirkungsgefüge von Lebewesen und unbelebten Bestandteilen der Umwelt, die untereinander und mit ihrer Umwelt Energie, Stoffe und Informationen austauschen. Ökosysteme sind offene Systeme.

Ozon:

(O₃) Entsteht durch Einwirkung ultravioletter Strahlung in der oberen Erdatmosphäre, wird aber auch bei gleichzeitigem Auftreten von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen unter Sonneneinstrahlung gebildet.

pH-Wert:

Konzentration der freien Wasserstoffionen (H⁺) in einer Lösung, die deren Säuregrad bestimmt. Der Neutralpunkt liegt bei pH 7. Der pH-Wert ist eine logarithmische Größe mit der Basis 10; ein Absinken bzw. Ansteigen um eine Einheit zeigt somit an, daß die Lösung um den Faktor 10 saurer bzw. alkalischer geworden ist.

Pufferungsvermögen:

Unter Pufferung versteht man das Konstanthalten des pH-Wertes trotz Zufuhr von H⁺ oder OH⁻-Ionen.

Säuren:

Chemische Verbindungen, die in Wasser gelöst H⁺-Ionen abgeben. Je größer die Konzentration der abgegebenen Wasserstoffionen wird, desto stärker ist die Säure, umso niedriger wird der pH-Wert.

Schwefeldioxid:

(SO₂) farbloses Gas; Es entsteht vor allem bei der Verbrennung von Kohle und Öl. Emissionsquellen sind Kraft- und Heizwerke, Industrieanlagen sowie in geringerem Umfang Haushalte. In der Luft wandelt sich SO₂ teilweise in Schwefelsäure um und war bzw. ist dadurch Hauptverursacher des „Sauren Regens“.

Schwefelsäure:

(H₂ SO₄) ist eine klare, farb- und geruchlose, ölige Flüssigkeit und starke Säure.

Schwermetalle:

Metalle mit einer Dichte über 4,5 g/cm³. Es gibt lebensnotwendige Schwermetalle wie Zink, Kupfer, Mangan und (wahrscheinlich) nicht lebensnotwendige wie z.B. Quecksilber, Blei und Kadmium. In höheren Konzentrationen haben Schwermetalle schädliche Wirkungen. Schwermetalle reichern sich im Boden und in Pflanzenteilen an. Mit zunehmender Bodenversauerung werden diese Elemente mobil und können zu Schäden an Wurzeln führen oder aber mit dem Sickerwasser ins Grundwasser gelangen.

Silicate:

Salz der Kieselsäure (H₄SiO₄); häufigste Minerale der Erdkruste.

Sulfat:

(SO₄) Salz der Schwefelsäure.

Stabilität:

sie spricht man einem Ökosystem zu, dessen Artengefüge bei Störungen von außen im wesentlichen gleich bleibt, sowohl was die grünen Pflanzen als auch was Mikroorganismen und Tiere anbetrifft. Seine Stoffkreisläufe müssen dementsprechend abgepuffert und sein Wasserumsatz zumindest langfristig ausgeglichen werden können. Wichtig ist außerdem, daß einzelne vorübergehend verschwindende Arten die Möglichkeit behalten, aus der näheren oder weiteren Umgebung wieder einzuwandern.

Stickstoffoxide:

(NO_x) Entstehen bei allen Verbrennungsvorgängen, vornehmlich beim Kraftfahrzeugverkehr, als Verbindung zwischen dem Stickstoff der Luft und dem Sauerstoff wie z.B.:

- Stickstoffmonoxid NO
- Stickstoffdioxid NO₂.

▶ 10. Literaturhinweise

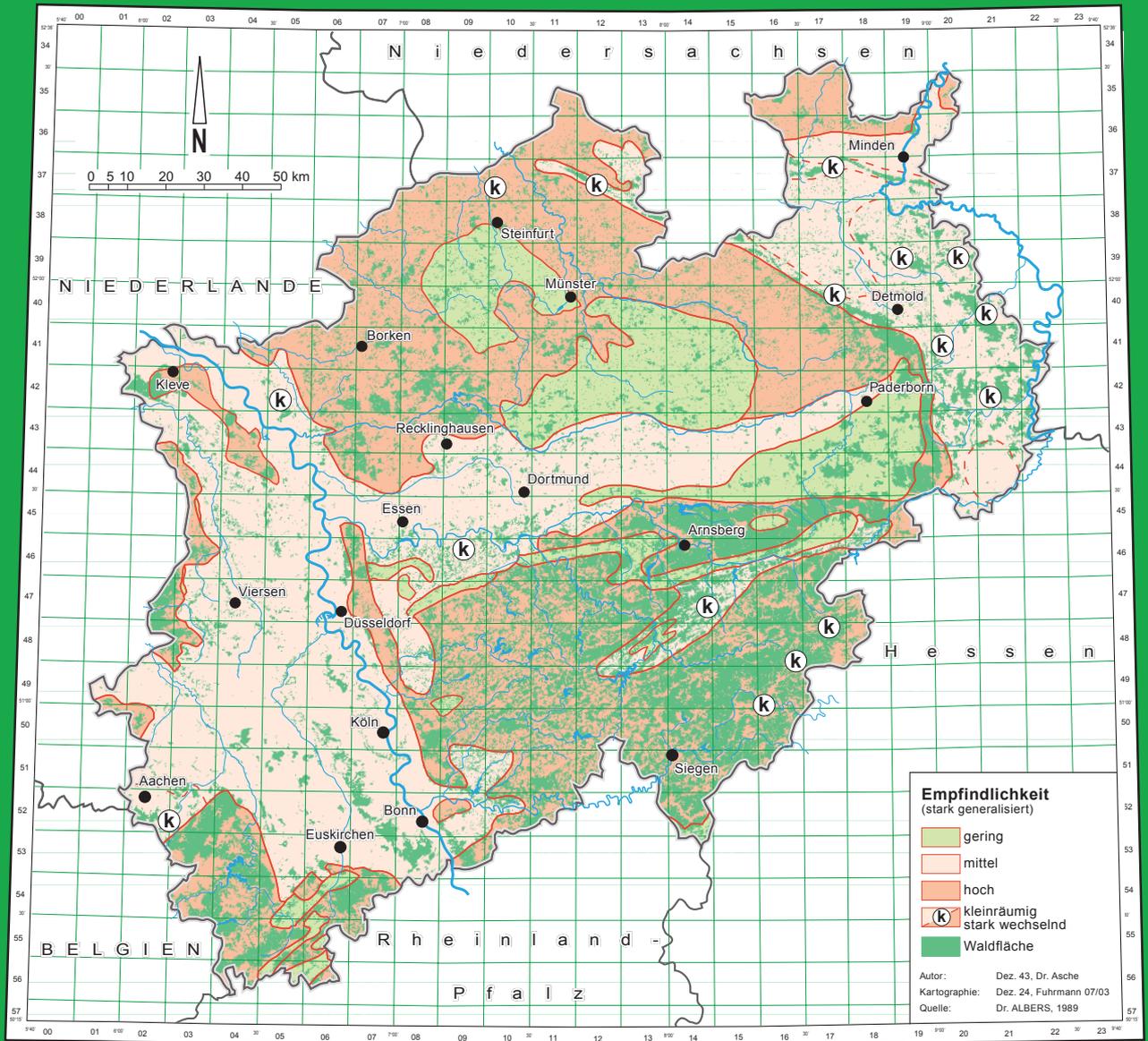
- Bundesgesetzblatt, 1991, Tl. 1: Düngemittelverordnung, S. 1450 - 1490.
- Bundesgesetzblatt, 1993, Tl. 1: Erste Verordnung zur Änderung der Düngemittelverordnung, S. 93 - 93.
- Rheinland-Pfalz, 1992: Merkblatt Bodenschutzkalkung (Merkblatt Nr. 9, 2. Auflage), Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten, Mainz.
- Asche, N., 1992: Einblicke in den Stoffhaushalt oligotropher Übergangsmoore im Ebbegebirge und ihre Berücksichtigung bei der Waldkalkung. Allg. Forst- u. J.-Ztg., 163. Jg. 10, S. 177 - 182.
- Asche, N., 1995: Effects of liming on forest soil, soil solution and beech nutrition. A case study in North West Germany. Poster, LÖBF Recklinghausen.
- Asche, N., 1999: Bodenschutzkalkung und das Wurzelsystem der Rotbuche (*Fagus Sylvatica*). Eine Fallstudie im Sauerland. Forstw. Cbl. 118, S. 294 - 301.
- Asche, N., 2001: Stark saure Waldböden mit hohen Stickstoffvorräten. Ist die Bodenschutzkalkung ein Risiko oder dringend erforderlich? Berichte Freiburger Forstlicher Forschung, Heft 33, S. 199 - 208.
- Asche, N., Nolte, N., 1997: Waldkalkung mit Asche. Erste Ergebnisse eines Praxisversuches mit Braunkohlenaschen im Sauerland. AFZ/Der Wald, 1, S. 16 - 20.
- Asche, N., Halverscheid, U., 1998: Langfristige Wirkung einer Kalkung auf Bodenvegetation, Humusform und pH-Wert. AFZ/Der Wald 6, S. 288 - 290.
- Bartels, U., Asche, N., 1993: Verfahren zur Charakterisierung von Düngemitteln für die Waldkalkung. Chemie in Labor und Biotechnik, 44. Jg. 5, S. 218 - 221.
- Becker, A., 1983: Weitere Aussaatversuche haben Tendenz bestätigt. In: Sonderheft der LÖLF-Mitteilungen, Erweiterte Neuauflage, S. 15a.
- Bergmann, W., 1988: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen; Entstehung und Diagnose. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Darwin, C.R., 1881: The formation of vegetable mould through the actions of worms, with observations of their habits. Murray, London.
- Eisenbeis, G., Fritsch, N., Lenz, R., Weber, M., 1997: Bodenfauna und Waldkalkung. In: Waldschäden, Boden- und Wasserversauerung durch Luftschadstoffe in Rheinland-Pfalz, S. 47 - 66, Herausgeber: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz.

- Gehrmann, J., Ulrich, B., 1983: Der Einfluß des Sauren Niederschlages auf die Naturverjüngung der Buche. In: Sonderheft der LÖLF-Mitteilungen, Erweiterte Neuauflage, S. 32 - 36.
- Hesmer, H., 1958: Wald und Forstwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Verlag M. & H. Schaper, Hannover.
- Hildebrand, E.E., 1986: Zustand und Entwicklung der Austauschereigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen. Forstw. Cbl. 105, S. 60 - 76.
- Hüttl, R.F., 1992: Die Blattanalyse als Diagnose- und Monitoringinstrument in Waldökosystemen. Freiburger Bodenkundl. Abh., 30, S. 31 - 59.
- Kamlah, A., 1929: Kalkungsversuche in Oberförsterei Altenbeken. AFJZ, 61. Jg. 44, S. 209 - 223.
- Kaupenjohann, M., 1995: Wirkung der Kalkung auf Bäume und Bodenvegetation. AFZ/Der Wald 17, S. 942 - 945.
- Nolte, N., 2001: Flüsternder Hubschrauber kalkt nordrhein-westfälische Wälder. In: 1. Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes. Herausgeber: Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, Düsseldorf, Selbstverlag, S. 67 - 70.
- Potthoff, M., Asche, N., 2003: Regenwürmer auf Kalkversuchsflächen. Eine Fallstudie in Nordrhein-Westfalen. In Vorbereitung.
- Schüler, G., 1997: Stabilitätserhöhung im Ökosystem Wald durch Bodenschutz, Kompensation von Nährstoffverlusten und naturnahe Waldwirtschaft. In: Waldschäden, Boden- und Wasserversauerung durch Luftschadstoffe in Rheinland-Pfalz, S. 74 - 96, Herausgeber: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz.
- Trümper, K.H., 1937: Vierzig Jahre erfolgreiche Kalkanwendung in der Forstwirtschaft. Eine bodenkundliche, waldbauliche und wirtschaftliche Studie. Aus der Schriftenreihe des Kalkdienstes Nr.1, Meschede.
- UBA, 2002: Umweltbundesamt Berlin: Final Report 29942210, Deposition Loads 1990 - 1999.
- Ulrich, B., 1983: Luftverunreinigungen und Ökosphäre. Versuch einer Gesamtschau. In: Sonderheft der LÖLF-Mitteilungen, Erweiterte Neuauflage, S. 3a - 14a.



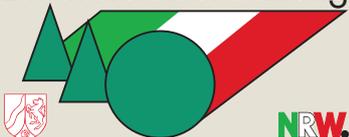


Empfindlichkeit der Böden gegenüber Säurebelastung in Nordrhein-Westfalen



© LOBF NRW 2003

Landesforstverwaltung



NRW