

Merkblätter der Forstlichen
Versuchs- und
Forschungsanstalt
Baden-Württemberg

50/2000

BodenSchutzkalkung im Wald

INHALT

1 EINLEITUNG

2 WARUM MÜSSEN WIR WALDBÖDEN KALKEN?

3 WAS SOLL DIE KALKUNG BEWIRKEN?

4 WO SOLL GEKALKT WERDEN?

5 NUTZEN UND RISIKEN VON KALKUNGSMABNAHMEN

6 TECHNISCHE DURCHFÜHRUNG VON KALKUNGS- UND
DÜNGUNGSMABNAHMEN

GEEIGNETE KALKE UND DÜNGEMITTEL
AUSBRINGUNGSTECHNIK
ZEITPUNKT DER AUSBRINGUNG
DÜNGERPROBEN
DOKUMENTATION

7 ZUSAMMENFASSUNG

1 Einleitung

Waldkalkung und Walddüngung werden seit 15 bis 20 Jahren nicht mehr mit der Zielrichtung einer Steigerung des Holzzuwachses durchgeführt, sondern um Waldökosysteme und deren Funktionen langfristig zu stabilisieren. Vorrangig sind Gesichtspunkte des Boden- und Gewässerschutzes sowie die Minderung von Ernährungsengpässen, die als Sekundärfolge von nutzungs- und depositionsbedingten Standortveränderungen eintreten. Das zentrale Problem für die Ökosystemstabilität ist aktuell eine mehr oder weniger rasch fortschreitende Bodenversauerung und -entbasung, die durch externe Säureeinträge und interne Säureproduktion angetrieben wird. Kalkungsmaßnahmen sind in erster Linie auf eine Kompensation dieser Säurewirkungen ausgerichtet. Für die Waldkalkung werden prinzipiell magnesiumhaltige Dolomitkalken verwendet, um neben der Stärkung der Säureneutralisationskapazität von Böden die Ernährung mit Magnesium, dem Element, bei dem die räumlich ausgedehntesten Mangelareale bestehen, zu stützen.

Wenn akute Ernährungsengpässe nadelanalytisch nachgewiesen sind, kann zusätzlich zur Grundkalkung das Mangel-element in leicht verfügbarer Form verabreicht werden. Diese Notwendigkeit ergibt sich zunehmend bei der Kaliumversorgung. Auch im Fall einer zusätzlich zur Grundkalkung verabreichten Düngung hat diese meliorativen und kompensatorischen Charakter und ist weniger auf eine Ertragssteigerung ausgerichtet. Die Maßnahmen sind in jedem Fall so ausgelegt, dass anthropogen bedingte Ernährungsengpässe behoben werden, aber die Versorgung mit den verabreichten Nährelementen nicht in den luxurierenden Bereich angehoben wird.

2 Warum müssen wir Waldböden kalken?

Langjährige Messungen von Stoffeinträgen in Wäldern und Stoffhaushaltsmessungen lassen großflächig Säure- und Stickstoffeinträge erkennen, die auf nicht kalkhaltigen Böden über kritischen Belastungen liegen, die in Waldböden gepuffert oder zurückgehalten werden können. Stoffflussmessungen zeigen hohe Nettoausträge an basischen Kationen aus Waldböden, die zu Bodenversauerung und zur zunehmenden Einschränkung von Ausgleichs- und Pufferfunktionen der Waldböden führen. Die Geschwindigkeit, mit der Versauerungsprozesse in Waldböden während der vergangenen Jahrzehnte abgelaufen sind, lässt sich anhand des Vergleichs zwischen früheren bodenchemischen Messgrößen und deren heutiger Ausprägung einschätzen. Ein Vergleich zwischen 1927 im Schwarzwald und Odenwald gemessenen pH-Werten und der bei der BZE im gleichen Bereich festgestellten Säurestärken zeigt, dass auf den meisten entkalkten oder silikatischen Substraten diese in wenigen Jahrzehnten um 1 bis 2 pH-Stufen zugenommen haben (Abb.1).

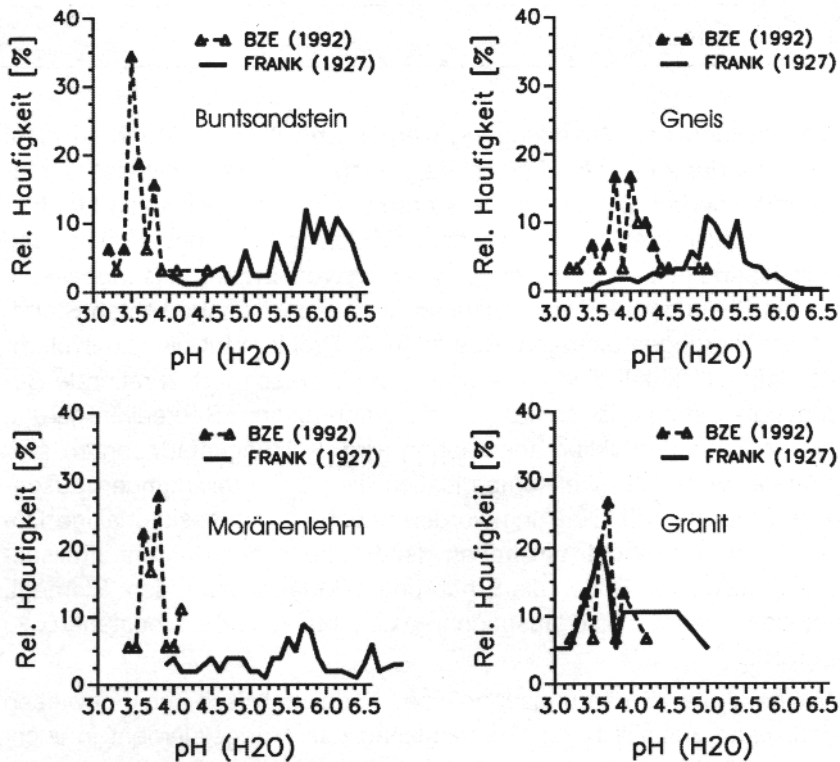


ABB.1: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von pH(H₂O)-Werten im Mineralboden in 0 - 5 cm Tiefe von 1927 und 1992 auf Buntsandstein, Gneis, Moränenlehm und Granit. Mit Ausnahme der Granitstandorte ist eine deutliche Zunahme der Säurestärke festzustellen.

Die Folge von Säureeinträgen und zunehmender Bodenversauerung ist die Auswaschung von basischen Elementen wie Magnesium, Calcium und auch Kalium. Da diese Elemente das Puffervermögen der Böden für Säuren bestimmen, bedeutet deren Verlust eine Verminderung der Pufferkapazität. Andererseits sind dies essentielle Makronährelemente für Wälder, so dass im Zuge von Bodenversauerung und Entbasung Störungen in der Bestandesernährung auftreten. In den 80er Jahren war großflächig vorkommender Magnesiummangel in den Hochlagen der Mittelgebirge ein Schlüsselfaktor flächig auftretender Waldschäden.

Bei der Anfang der 90er Jahre durchgeführten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) wurde der Entbasungszustand anhand des Summenparameters "Basensättigung" (Summe der im Boden austauschbar gespeicherten basischen Kationen) erfasst. Abb. 2 zeigt,

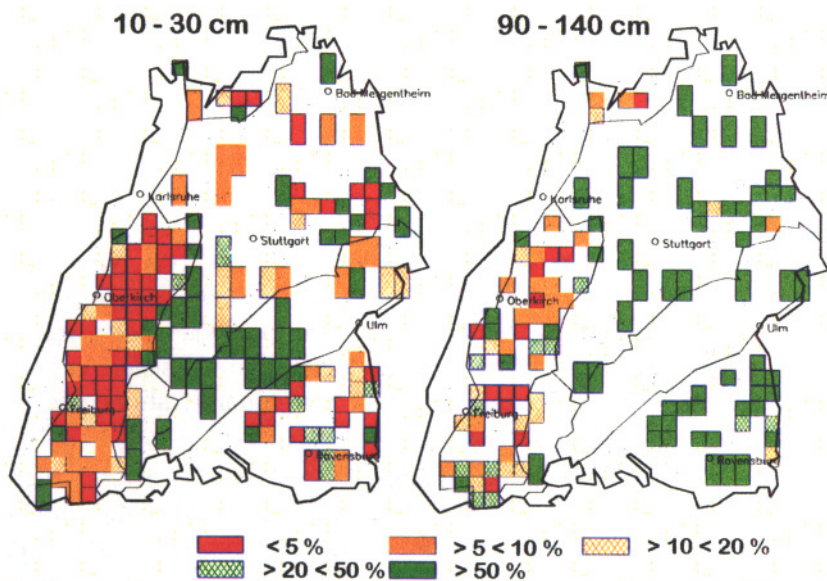


Abb. 2: Basensättigung (prozentualer Anteil der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium an der Austauscherbelegung) in 10 – 30 cm und 90 – 140 cm Bodentiefe. Die Verarmungszone mit Werten von < 10 % reicht im Schwarzwald großflächig tiefer als die Rhizosphäre.

dass in Baden-Württemberg innerhalb der Rhizosphäre auf allen entkalkten oder silikatischen Substraten der Anteil an austauschbar gespeicherten Basen großflächig niedriger als 10 % der Austauscherbelegung ist. Auch unterhalb der Rhizosphäre ist in den Wuchsgebieten Schwarzwald und Odenwald die Entbasung großflächig so weit fortgeschritten, dass ähnlich niedrige Basensättigungen vorliegen. Das bedeutet, dass hier eine akute Gefährdung für die Qualität des Grundwassers besteht, da Säureinträge nicht oder kaum mehr im Boden gepuffert werden.

Bodenversauerung und Entbasung wirken sich aber nicht nur auf die chemischen Eigenschaften von Waldböden aus, sondern auch auf deren Eignung als Lebensraum für Bodenmikroorganismen, die durch ihre strukturbildende und strukturstabilisierende Wirkung, aber auch durch ihre Bedeutung für die stabile Speicherung von Stickstoff, die ökologischen Eigenschaften von Waldböden wesentlich bestimmen. Unterhalb eines pH-Wertes von 5 sind die Lebensmöglichkeiten von leistungsfähigen Vertretern der Bodenmakrofauna wie z.B. von Regenwürmern stark begrenzt. Bei stärkeren Versauerungsgraden wird auch die Aktivität von Bakterien stark reduziert, so dass nur noch weniger leistungsfähige Pilze den Elementkreislauf bestimmen.

Die ökosystemaren Risiken durch Bodenversauerung und Entbasung können folgendermaßen zusammengefasst werden:

Risiken für Boden und Bestandesernährung

Bei hohen Säurestärken werden Silikate, vor allem Tonminerale, zunehmend instabil und aufgelöst. Außerdem werden Austauscherflächen von Tonmineralen durch Einlagerung von Aluminiumhydroxiden blockiert. Beides führt zu einer weitgehend irreversiblen Verminderung der Speicherkapazität für pflanzenverfügbare Nährelementkationen wie Magnesium oder Kalium.

Aufgrund der Bodenversauerung sind die Austauscher durch Kationsäuren wie Aluminium belegt. Der Anteil von Magnesium, Kalium und Calcium an der Kationensumme der austauschbaren Ionen ist gering, sie werden mit der Bodenlösung ausgewaschen.

Die antagonistische Wirkung von ionarem Aluminium und die Verknappung von pflanzenverfügbarem Ca, Mg und K führen dazu, dass sich die Lebensbedingungen für Pflanzenwurzeln im Mineralboden verschlechtern. Damit wird der Nährelementkreislauf auf die obersten Bodenhorizonte, im Extremfall auf die organische Auflage reduziert. Die Wasser- und Nährstoffspeicherungspotentiale des Mineralbodens werden dadurch zunehmend ausgeblendet und die Versorgung der Bestände ist verstärkt witterungsabhängigen Schwankungen unterworfen (z.B. K-Mangel in Trockenphasen).

Leistungsfähige Bodenorganismen wie Bakterien und insbesondere Regenwürmer finden bei hohen Versauerungsgraden nur noch residuale Lebensmöglichkeiten im Mineralboden. Die Folgen sind eine Verschlechterung der Bodenstruktur, der Bodenbelüftung und der Speicherkapazität für Stickstoff.

Als Folge traten seit den 80er Jahren regional durch großräumige Standortseigenschaften abgegrenzte Mg- und mit Zeitverzögerung K-Mangelareale auf.

Risiken für das Grundwasser

Je tiefer eine vom Oberboden ausgehende Versauerung in den Unterboden fortschreitet, desto wahrscheinlicher wird, dass versauerungsbedingte Lösungs- und Reaktionsprodukte in das Grundwasser gelangen.

Gefahrenpotentiale in Wassereinzugsgebieten im Wald gehen aus von:

- > Ionarem Aluminium, das Fischtoxizität in Vorflutern und Gesundheitsrisiken im Trinkwasser verursacht.
- > Mangan und Eisen, die durch Trübungen technische Probleme bei der Trinkwasseraufbereitung auslösen.
- > Nitratausträge ins Grundwasser als direkte Folge der Stickstoffeinträge aus der Luft und als Folge stickstoffbedingter Versauerungs- und Eutrophierungsprozesse.

3 Was soll die Kalkung bewirken?

Diese negativen biologischen, chemischen und ökosystemaren Folgen von Bodenversauerung, Entbasung und Stickstoffübersättigung sollen durch Waldkalkungen kompensiert werden und ggf. verlorengegangene Standortpotentiale vorsichtig regeneriert werden.

Ziel ist eine Verbesserung und Stabilisierung des Nährelementkreislaufes, die begrenzenden Faktoren des Streuabbaus sollen beseitigt, das Puffervermögen der Waldböden für Säureinträge gestärkt und Austauschgleichgewichte in Richtung einer Speicherung von austauschbaren basischen Kationen verschoben werden. Dabei sollen langfristig die Kohlenstoffvorräte, die zunehmend in untätigen, stark versauerten Humusaufgaben gespeichert sind, in stabile, biologisch wertvolle Mineralbodenhumusvorräte überführt werden. Dabei wird die Säurestärke im Wurzelraum allmählich vermindert, was die biologische Aktivität erhöht.

Erhöhte biologische Aktivität führt wiederum zu einer Verbesserung der Bodenstruktur, die sich in einer Vergrößerung des biogenen Makroporenraumes äußert. Durch eine Verbesserung der bodenbiologischen Aktivität und der langfristigen Erhöhung des Kohlenstoffvorrates im Mineralboden wird eine Erhöhung der Stickstoffspeicherkapazität des Bodens angestrebt.

Die Kalkung stellt wie andere externe Einflüsse und Bewirtschaftungsmaßnahmen einen technologischen Eingriff in Ökosystemabläufe dar und kann Nebenwirkungen verursachen. Deshalb darf der anhand chemischer Kriterien definierbare Kalkungsbedarf nicht in einer einmaligen Kalkungsmaßnahme umgesetzt werden, sondern muss auf viele niedrig dosierte Kalkungen aufgeteilt werden.

4 Wo soll gekalkt werden?

Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung zeigen, dass chemische Bodeneigenschaften offensichtlich durch Depositionswirkungen stark nivelliert sind und eine Differenzierung nach Standortseigenschaften abgeschwächt ist. Trotzdem lässt sich die Dringlichkeit von Bodenschutzkalkungen anhand bodenchemischer Kennwerte im Oberboden (bis 20 cm Bodentiefe) in drei Stufen einteilen:

- > **Dringend meliorationsbedürftige Standorte**, deren Basenvorrat bis auf einen eisernen Bestand reduziert ist (Basensättigung < 5 %) und pH(KCl)-Werten < 3. I.d.R. ist eine Reduktion der Austauschkapazität durch Tonmineralzerstörung und Reduktion von Mineralbodenhumus eingetreten. Durch räumliche Entkoppelung des C-Kreislaufes tragen diese Standorte umsetzungsschwache Auflagehumusformen. Diese können jedoch z.T. aufgrund von Stickstoffeinträgen in Richtung phänologisch günstigerer Humusformen verändert werden.
- **Meliorationsbedürftige Standorte** mit nicht ausreichenden Basensättigungen (Basensättigung < 15 %) und pH(KCl)-Werten < 3,8. Auf diesen Standorten kommen alle Humusformen vor.
- > **Nicht meliorationsbedürftige, gut gepufferte Standorte** mit ausreichender Basensättigung (Basensättigung > 15 %) und pH(KCl)-Werten > 4, die i.d.R. in Bohrstocktiefe freien Kalk aufweisen.

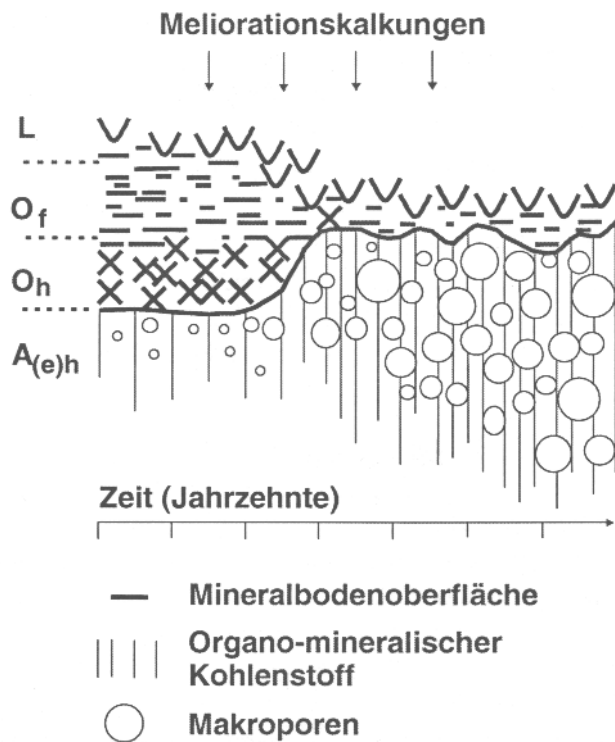


Abb. 3: Schematisierte Wirkungsweise der Kalkung. Durch Anregung der Mineralisierung wird ein Teil der organischen Auflage abgebaut. Durch die dabei entstehenden Nahrungsketten wird der Mineralboden gelockert und strukturiert (= "biogen aufgehöhrt"). Im Idealfall wird also Auflagehumus in Mineralbodenhumus umgewandelt.

Im Bereich der kristallinen Mittelgebirge Schwarzwald und Odenwald, aber auch im Bereich der Altmoränenlandschaft Oberschwabens, ist von einem großflächigen Meliorationsbedarf auszugehen. In den vom Bodensubstrat her stärker differenzierten Regionen des Neckarlandes und der Jungmoränenlandschaft herrschen unterschiedliche Übergangsstadien der Bodenversauerung, die eine geringere Intensität der Waldkalkung erforderlich machen, und bei denen eine Abgrenzung zu nicht meliorationsbedürftigen Standorten erschwert ist.

Durch den höheren Auskämmeffekt von Nadelbaumkronen für luftgetragene Schadstoffe sind Säureeinträge in Nadelwäldern deutlich höher als in Laubwäldern. Diese Tatsache und die höhere interne Säureproduktion in Nadelwäldern bedingen, dass der Meliorationsbedarf in Nadelwaldökosystemen gegenüber Laubwäldern höher ist. Aktuelle Ergebnisse aus der bodenchemischen Inventur in Laubholzbeständen haben jedoch gezeigt, dass auch in Laubholzbeständen depositionsbedingte Standortsveränderungen so weit vorangeschritten sind, dass sich daraus ein Meliorationsbedarf durch Bestandeskalkungen ergibt. Dies trifft in erster Linie für die Substratgruppen der Sande und tiefgründig entkalkten Lehme zu.

Die "Vorerkennung" der Meliorationsbedürftigkeit von Waldböden anhand von Standortseinheiten ist nur eingeschränkt möglich, da die Feldansprache von Standortseinheiten neben dem Substrat und dessen Schichtung hauptsächlich auf Informationen aus Humusform und Vegetation beruht. Diese sind jedoch durch die aktuellen Stickstoff- und Säureeinträge schwer interpretierbar. Anhand der Ökoserien- und Standortseinheitendefinition kann eine Abgrenzung zwischen nicht meliorationsbedürftigen und meliorationsbedürftigen Standorten vorgenommen werden. Dabei können Standortseinheiten mit überdurchschnittlicher Trophiestufe ("+"-Einheiten) und Ökoserien, die kalkhaltige Substrate umfassen, als nicht meliorationsbedürftig eingestuft werden.

In Beständen, deren Meliorationsbedarf mit feldbodenkundlichen Kriterien nur zweifelhaft bewertet werden kann, ist vor der Planung von Kalkungsmaßnahmen eine Erfassung des chemischen Oberbodenzustandes durch Bodenanalysen durchzuführen.

Wenn, z.B. durch Vergilbungserscheinungen, ein Verdacht auf Nährelementmangelsituationen besteht, sind zusätzlich Nadelanalysen durchzuführen. Die Unterscheidung zwischen dringend meliorationsbedürftigen und meliorationsbedürftigen Standorten kann ebenfalls nur anhand von Bodenanalysen erfolgen. Da in beiden Gruppen prinzipiell ein Meliorationsbedarf gegeben ist, liegt der Unterschied lediglich in der Notwendigkeit einer relativ hohen Zahl von Wiederholungsmaßnahmen auf dringend meliorationsbedürftigen Standorten. Vor der Durchführung von Wiederholungskalkungen sollten in jedem Fall Bodenproben gewonnen werden, um abzuschätzen, inwieweit die bei der vorhergehenden Kalkung verabreichte Basizität durch zwischenzeitliche Säureinträge aufgebraucht ist. Informationen zur Durchführung der Probenahme finden sich in den "Richtlinien für die Probenentnahme von Boden- und Pflanzenmaterial".

Ausschlussstandorte für Kalkungs- bzw. Düngungsmaßnahmen

Zahlreiche Flächen innerhalb des Waldes sind nach Naturschutz- (z.B. FFH-Gebiete, Naturschutzgebiete, Naturdenkmale und Biotope) oder Wasserrecht sowie nach dem Landeswaldgesetz (§30a LWaldG) geschützt. Eingriffe in diese geschützten Biotope sind nur erlaubt, wenn sie den Schutzzweck nicht gefährden. Bei den heute durchgeführten Kalkungsmaßnahmen steht der vorsorgende Bodenschutz im Vordergrund. Sie wirken in der Regel einer durch immissionsbedingte Säureinträge verursachten Artenverarmung entgegen. Im Einzelfall können Waldkalkungen jedoch zu einer Beeinträchtigung geschützter Biotope führen, weshalb eine Abstimmung mit den zuständigen Fachbehörden vor Durchführung der Maßnahmen in geschützten Bereichen erforderlich ist. Die Hinweise im Sammelordner "Kartierung, Schutz und Pflege von Waldbiotopen in Baden-Württemberg" sind zu beachten.

Ausschlussstandorte für Kalkungsmaßnahmen sind:

- > Wasserschutzgebiete der Zone 1
- > Waldschutzgebiete (Bannwälder und Schonwälder)
- > Versuchs- und Beobachtungsflächen
- > Spezielle Biotope (Auerwildhabitate)
- > Standorte seltener Pflanzen- und Tiergesellschaften (Missen, Moore, Blockhänge, Trockenrasen)

Von diesen Flächen ist ein ausreichender Mindestabstand von 100 m einzuhalten.

5 Nutzen und Risiken von Kalkungsmaßnahmen

Durch langfristig angelegte Dolomitzkalkungen (nachfolgend als Kalkungen bezeichnet) lässt sich die Filterfunktion des Bodens in Bezug auf Säureinträge erhalten bzw. regenerieren. Als ein positiver Nebeneffekt der Kalkung wird die Verbesserung der Stickstoffspeicherung im Waldboden durch verstärkte Bildung von Mineralbodenhumus erwartet. Bei der Waldkalkung ist die Dosierung der Einzelmaßnahmen so niedrig zu wählen, dass Risiken wie z.B. Nitrifikationsschübe begrenzt oder ausgeschlossen werden.

Durch Bodenversauerung und Entbasung des Wurzelraums ist die Ernährung von Wäldern nicht mehr gleichmäßig sichergestellt. Dieser Mangel soll i.d.R. nicht durch Verabreichung des jeweiligen Mangellements in leicht verfügbarer Form behoben werden, sondern durch Kalkung, die eine grundsätzliche Umstimmung des Bodenchemismus und damit eine Stabilisierung der Speicherung von basischen Elementen und gleichzeitig eine Aktivierung der bodenbiologischen Aktivität verursacht. Durch Verwendung von Dolomit bei der Waldkalkung wird neben pH-Erhöhung und Stabilisierung der austauschbaren Basenvorräte eine Verbesserung der Magnesiumernährung erreicht.

Standörtlich und nadelanalytisch abgrenzbare oder nachgewiesene Engpässe in der Waldernährung (wie z.B. die sich seit ca. 10 Jahren verstärkenden Kaliummängel) werden im Zuge der Kompensationsmaßnahmen durch ernährungswirksame Komponenten des verwendeten Kalks (Magnesiumgehalt des Dolomit) oder entsprechende Beimischungen (z.B. Kaliumsulfat oder Rohphosphat) berücksichtigt.

Durch moderate Kalkungen können die aktuellen Säureinträge abgepuffert werden; bei etwas höheren Dosierungen kann die Pufferleistung des Waldbodens regeneriert werden. Neben der Säurepufferung werden durch eine leichte Anhebung des pH-Wertes

die Lebensbedingungen für Bodenorganismen verbessert, was die biologische Stickstoffspeicherung im Boden unterstützt.

Geogene und standörtliche Unterschiede im Bodenchemismus werden durch eine Differenzierung der Dosierung von Kalkungsmaßnahmen berücksichtigt. Dies insbesondere im Bereich geogen heterogener Regionen, wie z.B. in den Keuperregionen des Neckarlandes, oder der Jungmoräne im Südwestdeutschen Alpenvorland.

Mit Kalkungen werden folgende **Ziele** verfolgt:

- > Neutralisierung aktueller Säureeinträge an der Bodenoberfläche.
- > Biologische Einarbeitung organischer Substanzen vom Auflagehumus in den Mineralboden (A_n-Horizont) sowie eine Erhöhung der Austauschkapazität im Wurzelraum.
- > Langfristige Vertiefung des durch Feinwurzeln erreichbaren Wurzelraumes.
- Erhöhung der Basensättigung (Mg, K, Ca) im oberen Mineralboden
- Erhöhung der Pufferkapazität.
- > Als Nebeneffekt eine Erhöhung der N-Speicherkapazität.
- > Verbesserung der Magnesiumversorgung der Bäume.
- > Langfristiger Erhalt der Wasserqualität in Waldeinzugsgebieten.

Risiken:

Durch die Anhebung der Bodenreaktion an der biologisch besonders aktiven Bodenoberfläche (Auflagehumus und Ah-Horizont) wird die Mineralisierung organisch gebundener Stickstoffvorräte und deren Nitrifikation kurzfristig gefördert, was zu einer Nitratverlagerung im Boden führt. Dieses Risiko steigt mit der Fortdauer der Stickstoffeinträge an. Es ist durch vorsichtige Dosierung beherrschbar.

Es können auch kurzfristig erhöhte Feinwurzelichten an der Bodenoberkante auftreten, solange dort durch die Oberflächenkalkung das bodenchemische Milieu überproportional verbessert ist.

Gesamtbeurteilung:

Die Risiken von Kalkungsmaßnahmen sind zeitlich begrenzt. Die Entscheidung auf eine Waldkalkung zu verzichten würde bedeuten, den Waldboden ungeschützt der weiteren Bodenversauerung und Entbasung zu überlassen und damit den weiteren Verlust von essentiellen, aber auch gesamtgesellschaftlich unverzichtbaren Bodenfunktionen zuzulassen. Gemessen an damit verbundenen Risiken (z.B. Gefährdung der Grundwasserqualität) sind die Risiken moderat dosierter Waldkalkungen als gering einzuschätzen. Somit überwiegen die Vorteile der Kalkungsmaßnahmen. Dies trifft dann im besonderen Maße zu, wenn begleitend ein Baumartenwechsel zu standortgerechten Baumarten erfolgt.

Die Düngung mit Neutralsalzen hat den ökosystemaren Nachteil, dass sie die Kationen starker Basen in Verbindung mit Anionen starker Säuren in das System einbringen und damit den Säure-/Basenstatus von Waldböden grundsätzlich nicht verändern. Eine bodenchemische und bodenbiologische Meliorationswirkung, wie sie durch die moderate pH-Anhebung nach Kalkung eintritt, ist hierdurch also nicht möglich. Gravierende Probleme entstehen durch die sehr hohe Löslichkeit von Neutralsalzen. Wenn in der Bodenlösung schubweise sehr hohe Ionenstärken vorliegen, werden dadurch unregelmäßige Austauschreaktionen angestoßen, die zu einer pulsartigen Mobilisierung von austauschbar im Boden gespeichertem Aluminium führt. Solche Aluminiumschübe beinhalten ein ernst zu nehmendes Risiko für Waldernährung und Oberflächengewässer. Aluminium kann die Aufnahme von essentiellen Nährelementen wie Magnesium und Kalium behindern. Wenn über das Sickerwasser Aluminiumschübe die Vorflut erreichen, werden in Oberflächengewässern die dortigen Biozönosen geschädigt.

6 Technische Durchführung von Kalkungs- und Düngungsmaßnahmen

Geeignete Kalke und Düngemittel

Kohlensäure Magnesiumkalke

Die dargestellten Nutzen und Risiken von Waldkalkungen und Düngungen verdeutlichen, dass insbesondere die Ausbringung magnesiumreicher Dolomite den meliorativen und kompensatorischen Zielen bei geringem ökologischem Risiko gerecht werden. Sie bieten den Vorteil eines Naturprodukts, das in weitgehend unveränderter Form und kostengünstig eingesetzt werden kann. Daneben können aber auch Kalke, die

bei industriellen Verarbeitungsprozessen entstehen oder verwendet werden und hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und Löslichkeit den Naturkalken entsprechen, grundsätzlich in Erwägung gezogen werden.

Um die angestrebten Meliorations- und Kompensationsziele zu erreichen, ist es aufgrund der geogenen Variabilität der natürlich vorkommenden magnesiumreichen Kalke erforderlich, Mindeststandards für die chemische Zusammensetzung des Ausbringungsmaterials zu definieren.

Für dolomitische Kalke worden in Baden-Württemberg folgende Mindestgehalte für Magnesium in Oxidäquivalenten und den Gesamtkarbonatanteil gefordert:

>Magnesiumoxidanteil (MgO)	> 12 %
>Gesamtkarbonatanteil	> 90 %

Durch diese Anforderung wird sowohl eine Verbesserung der Magnesiumversorgung als auch eine hohe Säurepufferung gewährleistet. In kohlensaurer Kalken sind keine hohen Schwermetallgehalte zu erwarten. Die Grenzwerte für Schwermetalle der Güte- und Prüfbestimmungen für Düngekalke (RAL Düngekalk) sind einzuhalten.

In Abhängigkeit von den standörtlichen Voraussetzungen und unter Berücksichtigung vorliegender Bodenanalysen wird von der Abteilung Bodenkunde und Waldernährung eine Dosierungsempfehlung abgeleitet. Im Regelfall beträgt diese

- 3 Tonnen dolomitischer Kalkstaub/Kalkgranulat

je Hektar. Auf stärker versauerten Substraten wird eine Dosierung von bis zu 4 t/ha empfohlen. Auf stark wasserdurchlässigen Standorten wird die Aufwandsmenge auf 2.5 t/ha reduziert.

Da im Gegensatz zur landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung eine Einarbeitung des Kalkes in den Mineralboden nicht möglich ist bzw. aus Gründen der Risikominimierung ausgeschlossen werden muss, ist ein Tiefentransport von Basizität in den Mineralboden nur durch hohe Lösungsraten des Kalkes sicherzustellen. Diese wird in erster Linie durch die spezifische Oberfläche und damit durch die Korngröße bestimmt. Ein Anteil der

- Feinfraktion (Korndurchmesser < 0.1 mm) von über 90 %

gewährleistet hohe Lösungsraten und damit eine in den Mineralboden reichende Tiefenwirkung von Kalkungsmaßnahmen. Bei Granulaten, deren Feinfraktionsanteil ebenfalls über 90 % liegen muss, werden die Primärkörner durch Bindemittel für die Ausbringung konditioniert.

Erdfeuchte Kalke weisen im Gegensatz zu den Stäuben und Granulaten höhere Anteile der Grobfraktion (Korndurchmesser > 0.1 mm) und höhere Wassergehalte auf. Soll eine vergleichbare Meliorationswirkung eines Materials erreicht werden, das den vorgeschriebenen Anteil der Feinfraktion einhält, muss die Dosierung erdfeuchter Kalke erhöht werden.

Dem nachfolgend dargestellten Berechnungsmodus liegt als Referenz eine Bezugsdosierung von 3 t dolomitischem Kalkstaub je Hektar mit mindestens 90 % Feinfraktionsanteil zugrunde. Bei der Ausbringung von erdfeuchten Kalken ist ebenfalls 2.7 t Feinsubstanz auszubringen, wobei eine Unterschreitung von 50 % Feinfraktionsanteil nicht toleriert wird. Der Beitrag der Grobfraktion ($0 > 0.1$ mm) zum Basizitätseintrag wird im Vergleich zur Feinsubstanz mit 20 % bewertet und bei der Mengenberechnung berücksichtigt. Damit ist eine hinreichende Berücksichtigung der größeren Kornfraktionen gewährleistet.

> Dosierung in t/ha	$2.7 \text{ t} / (\text{Feinfraktion in \%} / 100)$ $0.2 * \text{Grobfraktion in t}$
---------------------	---

Die errechnete Dosierung ist um den prozentualen Wassergehalt zu erhöhen:

Dosierung in t/ha	$2.7 \text{ t} / (\text{Feinfraktion in \%} / 100)$ $0.2 * \text{Grobfraktion in t}$ $(1 + \text{prozentualer Wassergehalt} / 100)$
-------------------	---

Für das Korngrößenspektrum von erdfeuchten Kalken lässt sich die Dosierungshöhe in Abhängigkeit vom Anteil der Feinfraktion unter Berücksichtigung des Grobfraktionsanteiles und Wassergehaltes darstellen. Beispielhaft ist dies in Abbildung 4 für einen Wassergehalt von 7 % dargestellt. Abb. 4: Ausbringungsmenge für erdfeuchte Kalke dargestellt in Abhängigkeit vom Anteil der Feinfraktion bei einem Wassergehalt von 7 % dargestellt.

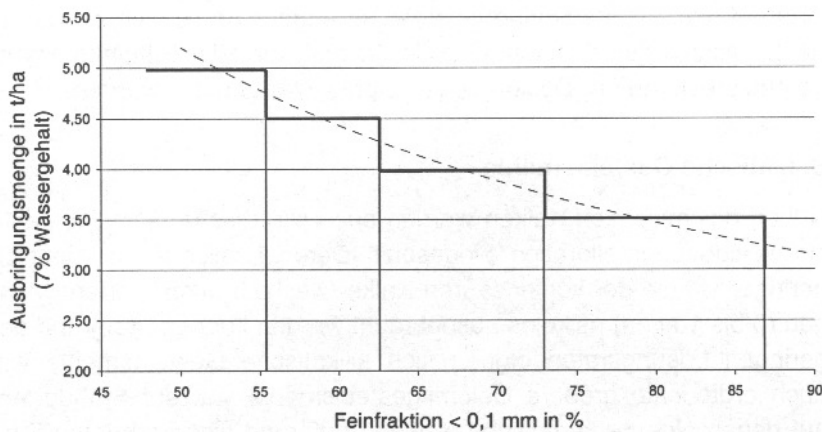


ABB.4: Ausbringungsmenge für erdfeuchte Kalke dargestellt in Abhängigkeit vom Anteil der Feinfraktion bei einem Wassergehalt von 7%

Durch die Berücksichtigung des Feinfraktionsanteiles und des Wassergehaltes in der Berechnung der Aufwandsmenge können materialspezifische Besonderheiten berücksichtigt werden. Zur praxisgerechten Handhabung wird die Funktion in Dosierungsstufen von 0.5 t aufgelöst. Die Aufwandsmenge in t/ha ergibt sich durch die Zuordnung des Berechnungswertes zur Dosierungsstufe innerhalb eines Intervalles von ± 0.25 t/ha um den Stufenmittelwert.

Exemplarisch zeigt die nachfolgende Tabelle die Dosierung je ha für trockene Ware und erdfeuchte Kalke mit 4 % bzw. 7 % Wassergehalt in Abhängigkeit von den Feinkornanteilen.

Dosierung in t/ha	Prozentualer Anteil Fraktion $\varnothing < 0,1$ mm bei einem Wassergehalt von		
	0 %	4 %	7 %
5.0	50 - 51	50 - 53	50 - 55
4.5	52 - 58	54 - 60	56 - 62
4.0	59 - 67	61 - 70	63 - 72
3.5	≥ 68	≥ 71	≥ 73

Wird eine von der Bezugsdosierung von 3 t/ha abweichende Kalkstaub-/Kalkgranulatausbringungsmenge empfohlen, so muss der in die Berechnungsformel eingehende Wert für die Mindestfeinkornmenge entsprechend der Dosierungsempfehlung angepasst werden.

Silikatische Gesteinsmehle

Neben dolomitischen Kalken werden auch silikatische Gesteinsmehle zur Waldbodenmelioration eingesetzt. Deren Löslichkeit ist deutlich geringer als die der kohlen-sauren Kalke, weshalb auch größere Mengen (5 bis 10 t/ha) risikolos ausgebracht werden können. Aufgrund der geringen Lösungs-raten eignen sich silikatische Gesteinsmehle wie auch erdfeuchte gröbere Dolomitgesteinsmehle v.a. auf Standorten, auf denen eine herkömmliche Kalkung aufgrund eines erhöhten Risikopotenzials ausscheidet, wie z.B. in Trinkwasserschutzgebieten der Zone 2. Um mit der vorgeschlagenen Dosierung von 5 bis 10 t/ha eine mit einer 3 t-Dolomitmalkung vergleichbare Menge an Basizität zu verabreichen, sollte die Summe der basisch wirkenden Bestandteile in Oxidäquivalenten (K_2O , CaO und MgO) mindestens 15 % (HCl-Aufschluss) betragen. Natriumgehalte werden hierbei nicht berücksichtigt, da diese aufgrund der geringen Bindungsfestigkeit von Natrium im Boden keine nachhaltige Erhöhung der Pufferkapazität begründen.

In silikatischen Gesteinsmehlen können durch hydrothermale Anreicherungsprozesse höhere Schwermetallgehalte auftreten. Entsprechend den kohlen-sauren Kalken müssen auch die zur Ausbringung vorgesehenen silikatischen Gesteinsmehle die in der RAL Düngekalke formulierten Grenzwerte für Schwermetallgehalte einhalten.

Magnesiumdünger

Am zweckmäßigsten und ökologisch unbedenklichsten ist die Zugabe von Magnesium in Form dolomitischer Kalke. Bei akutem Magnesiummangel, insbesondere in Kulturen, kann auch die Zufuhr schnell löslicher, sulfatischer Magnesiumdünger gerechtfertigt sein. Hierzu zählen z.B. Kieserit (Magnesiumsulfat) oder Forstkieserit (Kieserit und Kaliumsulfat), die in einer Dosierung von 0.5 bis 0.8 t/ha ausgebracht werden. Bei der Düngung von Kulturen beträgt die Aufwandsmenge 50 bis 80 g Kieserit je Pflanze.

Kaliumdünger

Da Kalium in den kohlen-sauren Kalken und auch in einigen silikatischen Gesteinsmehlen nur in geringen Anteilen enthalten ist, muss bei analytisch nachgewiesenem Mangel Kalium zugeführt werden. Leicht lösliche Kaliumdünger sind z.B. Kalimagnesia oder reines Kaliumsulfat. Zur Verbesserung der Kaliumversorgung ist eine Ausbringung von 500 kg Kaliumsulfat (K_2O -Anteil von mindestens 50 %) vorzusehen. Über die in den technischen Merkblättern für die handelsüblichen Kaliumdünger angegebenen

K₂O-Garantiewerte lässt sich die Dosierung für Alternativprodukte wie z.B. Patentkali errechnen.

Die Verabreichung von Kalium- und Magnesiumdüngern muss im Wald auf sulfatische Neutralsalze beschränkt werden, da Waldbäume gegenüber Chlorid empfindlich sind. Da diese ernährungswirksamen Substanzen physiologisch sauer reagieren, sollte begleitend oder zeitlich vorausgehend eine Grunddüngung mit Kalk oder silikatischem Gesteinsmehl erfolgen.

Phosphatdünger

Biologisch inaktive Rohhumusaufgaben weisen i.d.R. weite C/P-Verhältnisse (> 200) auf. Zur Reaktivierung biogener Stoffumsätze kann deshalb eine Phosphatdüngung angezeigt sein, für die sich insbesondere fein vermahlene, weicherdeige Rohphosphate eignen. Aufgrund der im Vergleich zu den technisch hergestellten Phosphaten (wie z.B. Superphosphat) niedrigen Löslichkeit, ist ihr Einsatz mit geringeren hydrologischen und ökologischen Risiken verbunden. Bei nachgewiesenem Phosphatmangel wird eine Rohphosphatgabe in Höhe von 300 kg je ha mit einem P₂O₅-Anteil von 30 % empfohlen. Die Regelungen der Düngemittelverordnung zur Mahlfineinheit des weicherdigen Rohphosphates als Beimischungskomponente zum kohlensauen Kalk sind einzuhalten.

Stickstoffdünger

Durch Stickstoffeinträge aus der Luft ist Stickstoff in Wäldern i.d.R. im Überfluss verfügbar. Stickstoffmangel ist heute auf Extremstandorte beschränkt. Dementsprechend sollten Stickstoffdünger nur zur gezielten Düngung von Kulturen bei analytisch nachgewiesenem Stickstoffmangel eingesetzt werden. Auf allen sauren Böden ist Kalkammonsalpeter zu verwenden. Liegen die pH-Werte für die angepflanzten Baumarten zu hoch, so können auch der schwach sauer wirkende Kalkammonsulfatsalpeter oder das stärker sauer wirkende Ammoniumsulfat verwendet werden. Stickstoffdünger werden in der Regel mit 500 kg/ha bzw. mit 30 bis 50 g je Pflanze dosiert.

Ausbringungstechnik

Bei der Waldkalkung haben sich zwei Ausbringungstechniken bewährt:

- > Verblasen von Stäuben
- > Abwerfen von Granulaten und erdfeuchtem Material vom Hub schrauber

Für erdfeuchte Kalke unterschiedlichen Korngrößenspektrums befinden sich derzeit zusätzlich terrestrische Ausbringungsverfahren in Erprobung oder können bereits für den Praxiseinsatz empfohlen werden.

Das Verblasen ist unter geeigneten Rahmenbedingungen preiswert und mit geringerem Energieaufwand durchzuführen. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein Feinerschließungsnetz, das eine flächendeckende Ausbringung ermöglicht. Probleme bei der terrestrischen Ausbringung können sich durch die Abdrift von Kalkstaub ergeben. Technisch weitgehend gelöst ist die homogene Verteilung des Kalkstaubes bei Verblasereichweiten von 30 bis 50 m. Durch die Wahl des Ausbringungszeitpunktes (s.u.) lassen sich die Risiken für die Bodenfauna minimieren.

Die aviotechnische Ausbringung von Granulaten und erdfeuchten Kalken setzt arrandierte Behandlungseinheiten und geeignete Witterungsbedingungen voraus. Die Hubschrauberausbringung ist hinsichtlich der Homogenität der Ausbringung, des Verdriftens von Ausbringungsmaterial und der Gefährdung der Bodenfauna sowie den Ansprüchen an die Erschließungssituation günstiger zu bewerten als die terrestrische Ausbringung, der energetische und finanzielle Aufwand je Flächeneinheit ist jedoch deutlich höher.

Zeitpunkt der Ausbringung

Dolomitische Kalke und Gesteinsmehle können im Prinzip ganzjährig ausgebracht werden. Aus bodenzoologischer Sicht sollte jedoch keine Verblasung in der Hauptvegetationszeit erfolgen. In Hanglagen sollten Kalke nicht auf Schneedecken ausgebracht werden. Werden begleitend zu der Kalkung schnell lösliche Kalium- und Magnesiumdünger ausgebracht, sollte die Maßnahme kurz vor Beginn der Vegetationsperiode abgeschlossen werden.

Durchforstungsmaßnahmen, die in zu kalkenden Beständen vorgesehen sind, sollten vor der Ausbringung durchgeführt werden. Die Durchblasbarkeit der Bestände und damit die homogene Verteilung des Kalkes wird dadurch erhöht und ein kalkungsbedingt erhöhter Verschleiß an Motorsägenketten reduziert.

Düngerproben

Zur Überprüfung, ob die in den Ausschreibungen geforderten Qualitätskriterien eingehalten werden, werden im bodenkundlichen Labor der FVA Düngerproben auf Korngrößenzusammensetzung, Wassergehalt und chemische Zusammensetzung untersucht. Hierzu sind unmittelbar bei Anlieferung des Ausbringungsmaterials 3 Stichproben mit je 1500 g über den Zeitraum einer Maßnahme zu entnehmen. Die Stichproben werden in drei gleiche Teile aufgeteilt und jeweils wasserfest versiegelt. Die FVA erhält je ein Drittel des Stichprobenmaterials zur Analyse, ein weiteres Drittel der Proben wird beim Forstamt bis zum Vorliegen der Analyseergebnisse als Rückstellprobe gelagert. Der beauftragte Unternehmer erhält ebenfalls die drei Proben.

Dokumentation

Sämtliche Düngungs- und Kalkungsmaßnahmen sind gemäß Forsteinrichtungs-Dienstanweisung (FED) aktenkundig zu machen und kartographisch zu dokumentieren.

7 Zusammenfassung

Die Waldbewirtschaftung muss aufgrund der anthropogen veränderten Rahmenbedingungen in besonderem Maß darauf ausgerichtet sein, Depositionswirkungen so weit wie möglich zu kompensieren und Waldökosysteme zu stabilisieren. Eine nachhaltige Waldbewirtschaftung erfordert eine langfristige Erhaltung der Standortsqualität einschließlich der Filter- und Pufferfunktionen des Waldbodens.

Die Kompensation aktueller Säure- und Stickstoffeinträge und die Stabilisierung gefährdeter Ökosystemfunktionen kann auf den meisten Standorten nicht mehr alleine auf der Basis waldbaulicher Steuerungsmechanismen erfolgen. Durch die mittlerweile großflächig stark fortgeschrittene Bodenversauerung müssen zusätzlich durch Waldkalkung Depositionswirkungen kompensiert und eine waldbauliche Umsteuerung unterstützt werden. So wird die vermehrte Einbringung von standortsgemäßen Laubholzarten auf vielen stark versauerten Standorten durch eine initiale Dolomitkalkung wesentlich erleichtert. Durch die Kalkung werden die aktuellen Säureeinträge abgepuffert und ein für die Etablierung von Wurzeln im oberen Mineralboden günstiges bodenchemisches Milieu geschaffen. Sowohl Waldkalkung als auch der vermehrte Anbau tiefwurzelnder, standortsgemäßer Baumarten zielen auf eine Stabilisierung und Vertiefung des Nährstoffkreislaufes in den Mineralboden hinein und auf eine biologische Aktivierung des Mineralbodens hin.

Nach Auswertung der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) sind rund 600.000 ha Wald dringend meliorationsbedürftig und rund 200.000 ha meliorationsbedürftig. Auf den weniger versauerten Standorten kann mit einer einmaligen Kalkung die Bodenversauerung über lange Zeit wirkungsvoll aufgehalten werden. Bei den stärker versauerten Standorten sind mehrere Wiederholungsmaßnahmen notwendig, um eine bodenchemische Stabilisierung zu erzielen. Vorrang bei Kalkungsmaßnahmen haben tiefgründig entbastete Böden, bei denen die akute Gefahr von Durchbrüchen der Versauerungsfront in die Hydrosphäre gegeben ist.

In den Jahren 1984 bis 1995 sind in Baden-Württemberg etwa 162.000 ha gekalkt worden. Bei diesem Flächenfortschritt können in 30 Jahren alle dringend kalkungsbedürftigen Standorte in einem ersten Durchgang gekalkt werden. Die detaillierte Planung von Kalkungsmaßnahmen erfolgt über die Auswertung der Forstlichen Standortskartierung aufgrund von bodenchemischen Analysen.