



Gesteinsmehl als Bodenhilfsstoff für versauerte Wälder

Gesteinsmehle können bei der Melioration versauerter Waldböden eine Alternative zu den üblichen Kalkgaben darstellen. Ihre Säureneutralisationskapazität ist geringer als die von Kalk, ihre unerwünschten Nebeneffekte jedoch ebenfalls. Sie wirken laut der vorliegenden Untersuchung langfristiger als Kalk, regen den Abbau organischer Substanz weniger stark an und führen kaum zu Veränderungen in der Krautschicht.

TEXT: R. V. D. BAUWHEDE, T. ROMBOUTS, P. HARTMANN, B. MÖLLER, L. V. D. BERG, W. BUYSSE, A. ELSSEN, E. SMOLDERS, B. MUYS

Jahrzehntelange Stickstoffemissionen haben zu einer Versauerung des Bodens, und einer Verschlechterung der Vitalität der Bäume und Pflanzenvielfalt der Wälder geführt. Die in Teilen Deutschlands etablierte Bodenschutzkalkung mit Dolomitmalk kann den pH-Wert des Bodens effektiv anheben, ist aber oft mit unerwünschten Nebeneffekten wie Kohlenstoffverlust und Störung die Kraut- und Moosschicht verbunden. Gesteinsmehl wird zunehmend als nachhaltige Alternative angesehen, insbesondere auf sandigen Standorten. Dieser Syntheseartikel gibt einen Überblick über die Ursachen der Bodendegradation und die Wirksamkeit von Gesteinsmehl als Wiederherstellungsmaßnahme für die Bodenpufferung, das Baumwachstum und die Vielfalt der Bodenvegetation.

Bodenversauerung anthropogen beschleunigt

In weiten Teilen Deutschlands, Polens, der Niederlande und Flanderns wurden während der letzten Eiszeit mächtige Sandpakete vom Wind abgelagert [1]. Durch die Entfernung von Streu und Plaggen, zunächst aus den Wäldern und dann aus den Heiden, nahm die Menge an organischem Kohlenstoff (C), Makronährstoffen wie den basisch wirksamen Kationen Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}) und Kalium (K^+) sowie Phosphor (P) in dieser sandigen Landschaft stark ab [2]. Nach etwa 1900 wurden die Heidelandschaften hauptsächlich mit Kiefer und Eiche aufgeforstet, die durch Kahlschlagsysteme bewirtschaftet wurden. Dadurch entstand eine mächtige

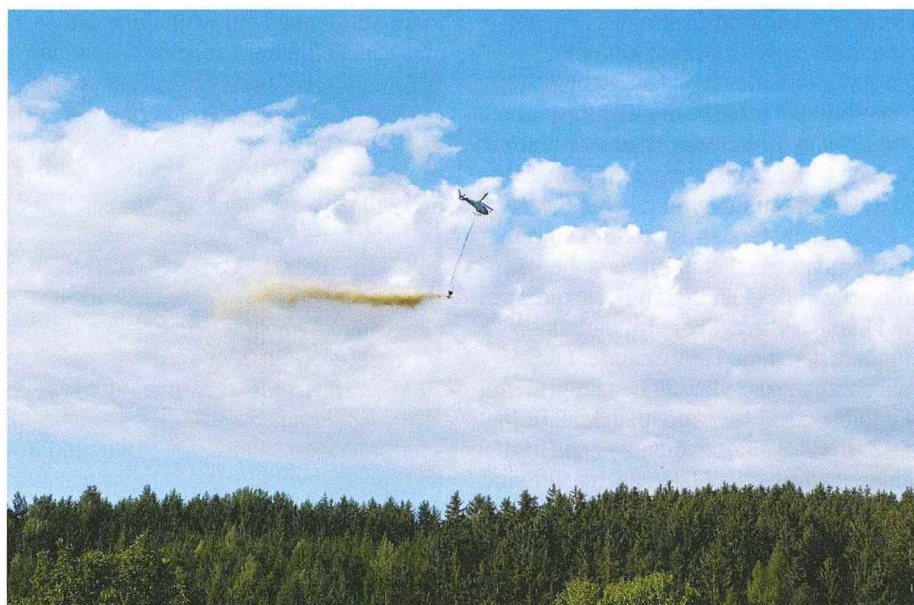


Abb. 1: Statt dem üblichen Calcit- oder Dolomitmalk lassen sich für die Bodenpufferung auch Gesteinsmehle verwenden.

saure Streuschicht, in der Nährstoffe gebunden sind und somit für die Feinwurzeln in tieferen Bodenschichten unzugänglich sind.

Zu dieser historischen Versauerung kommt die Versauerung durch die anthropogene Deposition von Stickstoff (N) und Schwefel (S). Sandige Böden haben eine geringere Kationenaustauschkapazität als Lehm- oder Tonböden. Infolgedessen sind weniger basisch wirksame Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+) an Sand gebunden als an Ton, und daher haben sandige Böden auch eine geringere Fähigkeit, versauernde Einträge zu neutralisieren.

Die meisten Böden befinden sich jetzt im Aluminiumpufferbereich ($\text{pH} < 4,2$) [3]. Das Aluminium kann

in der Bodenlösung auf toxische Konzentrationen für Pflanzen und Bodenorganismen ansteigen.

Versauerung blockiert biologische Nährstoffkreisläufe

Die natürliche Verjüngung wird durch zu mächtige Streulagen eingeschränkt. Regenwürmer verschwinden aufgrund des niedrigen pH-Werts und des giftigen Aluminiums [4] und das Wachstum, die Vitalität und die Klimaresistenz der Bäume nehmen ab. In den Blättern von nicht vitalen Eichen werden daher ein Überschuss an Stickstoff und ein Mangel an Nährkationen gemessen, was auf ihre verminderte Vitalität hinweist [5]. Der Anteil der

Adobe Stock – Animaflores PlesStock

Feinwurzeln nimmt ab, was neben dem verzögerten Wachstum auch eine erhöhte Sensibilität gegenüber Insektenschäden, Krankheiten und Trockenheit zur Folge hat. Der Mangel an Kalzium führt z. B. bei Vögeln zu Kalziummangel, der sich in geringeren Bruterfolgen (dünnere Eierschalen) und unterentwickelten Knochen bei Singvögeln äußert [6 – 8].

Viele Wälder wurden in der Vergangenheit trockengelegt, so dass basisch wirksame Kationen nicht mehr in die Wurzelzone gelangen. Die Wiederherstellung der lokalen Hydrologie kann dies verbessern, indem der Grundwasserspiegel allmählich wieder angehoben wird [9]. Das Pflanzen oder Fördern von Baumarten mit nährstoffreicher Streu wie Linde, Ahorn oder Esche kann die Puffereigenschaften von Böden verbessern, da ihre Streu reicher an basisch wirksamen Katio-

nen ist und sich schneller zersetzt als die von Kiefer oder Eiche [10]. Um die erfolgreiche Etablierung und die Vitalität von Bäumen auf stark sauren, basenarmen Böden zu schützen, kann der Einsatz von basischen Bodenhilfsstoffen hilfreich sein.

Wie wirken Gesteinsmehle im Vergleich zu Kalk?

Gesteinsmehle bestehen aus fein gemahlenen Gesteinen wie Basalt, Phonolith oder Foidit. Sie enthalten eine ganze Reihe von Mineralien, die langsam verwittern, allmählich Säuren (H^+) verbrauchen und allmählich basisch wirksame Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) freisetzen. Da die Wirkung von Gesteinsmehl und insbesondere

die Verwitterungsrate noch nicht klar war, wurden fünf Arten von Gesteinsmehl im Labor untersucht: zwei Basalte Eifelgold und Actimin, Phonolith Vulkamin, Foidit Soilfeed und Trachyandesit Biolit (Abb. 2) [11]. Der Säureneutralisationskapazität (SNK) ist die Menge an Säure, die es pro Kilo neutralisieren kann, ausgedrückt in $mmol H^+/kg$. Diese SNK von Gesteinsmehl ist stark pH-abhängig und deutlich niedriger als die von Calcitkalk ($CaCO_3$) (etwa 10 – 50 % im Vergleich zur SNK von Kalk (20.000 $mmol H^+/kg$) [12].

Gesteinsmehl hat gegenüber der herkömmlichen Kalkung mehrere Vorteile. Erstens führt die langsamere Auflösungsreaktion zu einem allmählichen Anstieg des pH-Werts. Plötzliche Schwankungen, die für das Bodenleben

Schneller ÜBERBLICK

- » **Jahrzehntelange** Stickstoff- und Schwefelemissionen haben Waldböden stark versauert und die Vitalität der Bäume vermindert.
- » **Die herkömmliche Bodenschutzkalkung** mit Dolomitmalk hebt zwar den pH-Wert an, bringt aber Risiken wie Kohlenstoffverluste und Störungen der Kraut- und Moosschicht mit sich.
- » **Gesteinsmehl wirkt langsamer, aber nachhaltiger:** Es setzt über Jahrzehnte basisch wirksame Kationen frei, stabilisiert den pH-Wert und verbessert das Nährstoffangebot.
- » **Erste Langzeitstudien** zeigen positive Effekte auf Baumwachstum, Baumernährung, Regenwürmer und Krautschichtdiversität – ohne die Störungen, die Kalkung oft verursacht.
- » **Der Schlüssel zum Erfolg** liegt in einem maßgeschneiderten Einsatz: Standortanalysen (Boden- und Blattproben) bestimmen, ob und welches Gesteinsmehl die größten Effekte auf die Nährstoffversorgung hat.



Abb. 2: Die charakterisierten und verwendeten kommerziellen Gesteinsmehlprodukte, ihre Markennamen und ihre spezifischen Oberfläche (m²/g).

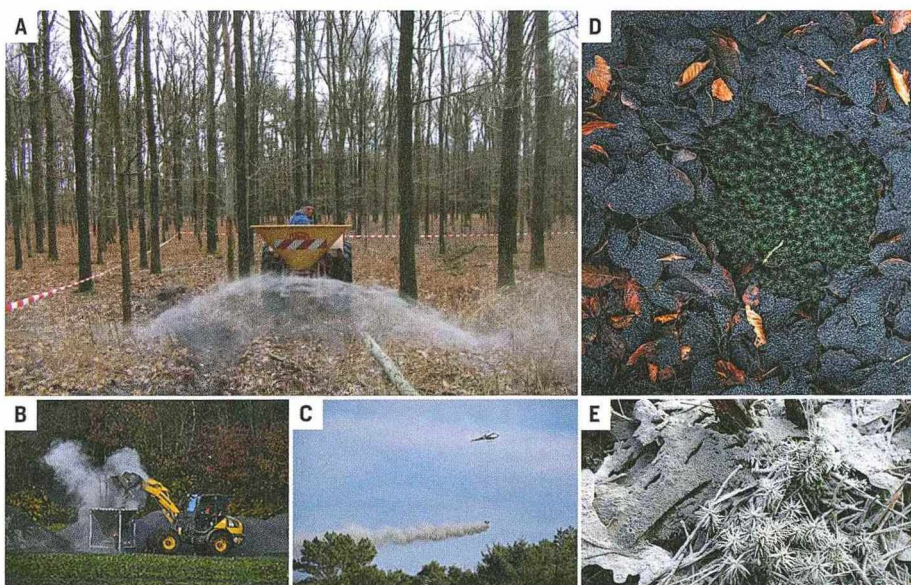


Abb. 3: (A) Die Ausbringung von Gesteinsmehl der Typ Eifelgold in Eichenwäldern, und (B, C) Als praktische „No-Regret“-Renaturierungsmaßnahme wird derzeit Foidit-Gesteinsmehl [Typ: Soilfeed] auf mehreren tausend Hektar in den Niederlanden ausgebracht. (D, E) So sehen 10 t/ha Soilfeed und Biolit Gesteinsmehl auf dem Waldboden nach der Anwendung aus.

Illustration: R. V. D. Bauwhede

Fotos: (A) M. Weijters, (B, C, D) Bosgroep Zuid-Niederland, (E) R. V. D. Bauwhede



schädlich sein können, werden verhindert. Dolomitskalk kann die Krautschichtvegetation stören und beschleunigt die Nitrifikation, da er pflanzenverfügbaren Nitrat-Stickstoff freisetzt. Zweitens regt Gesteinsmehl den Abbau von organischer Substanz weniger stark an als

Kalk, so dass der Waldboden (Humusschicht) besser intakt bleibt und der Kohlenstoffverlust aus der Humusaufgabe begrenzt wird. Außerdem kann Gesteinsmehl die Speicherung von organischem Kohlenstoff im Mineralboden fördern. Schließlich liefert Gesteinsmehl

nicht nur Kalzium und Magnesium, sondern auch andere wichtige Nährstoffe wie Kalium, Phosphor, Silizium und Spurenelemente, was es zu einer Multinährstoffquelle macht. Gesteinsmehl wird daher als "No-Regret"-Maßnahme auf stark versauerte Wälder ausgebracht (Abb. 3).

Gesteinsmehl im Pflanzloch verbessert Wachstum und Überlebensrate

960 einjährige Ahorne (*Acer pseudoplatanus* L.) wurden an zwei Standorten gepflanzt, sowohl auf einem Kahlschlag eines Fichtenbestandes, der zuvor als Acker genutzt war (Boden-pH = 3,5), als auch auf einem sauren Standort unter Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.), der zuvor Heidelandschaft war (Boden-pH = 3,1). Die Behandlungen wurden sowohl oberflächlich ausgebracht (3 t Dolomit/ha und 10 t Gesteinsmehl/ha) als auch in die Pflanzgruben eingebracht (0,4 kg Dolomit/Pflanzloch und 1,5 kg Gesteinsmehl/Pflanzloch). Die größte Zunahme des Baumvolumens im

Grafik: R. V. D. Bauwhede

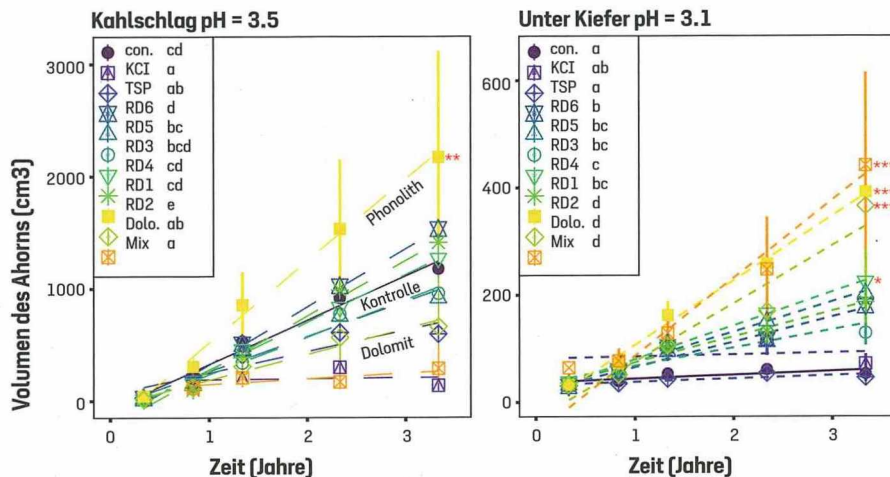


Abb. 4: Die Entwicklung des Volumens der Setzlinge nach der Einmischung von unterschiedlichen Gesteinsmehlen im Pflanzloch, d.h. 400 g Dolomit/Pflanzloch oder 1,5 kg Gesteinsmehl pro Pflanzloch. Die Kontrollvariante wird als blaue durchgezogene Linie dargestellt.

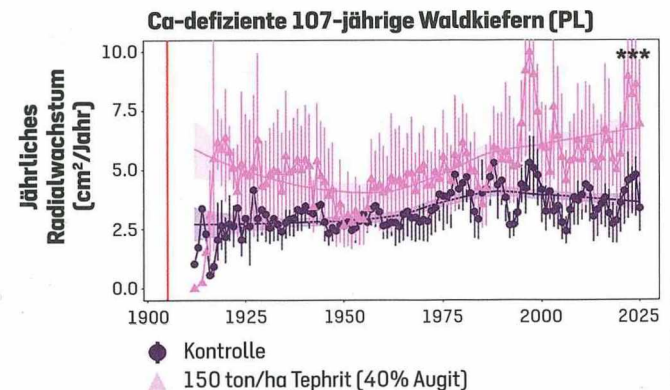
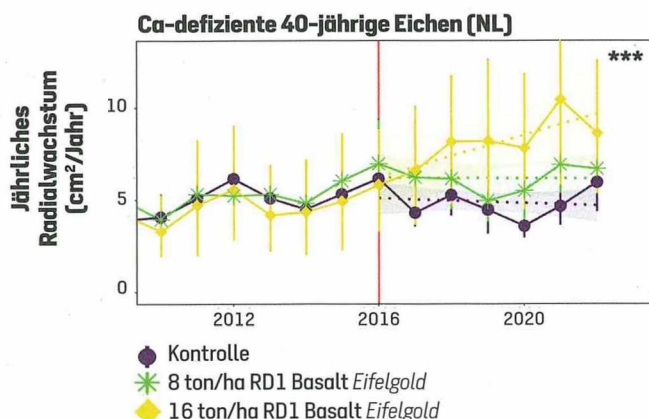
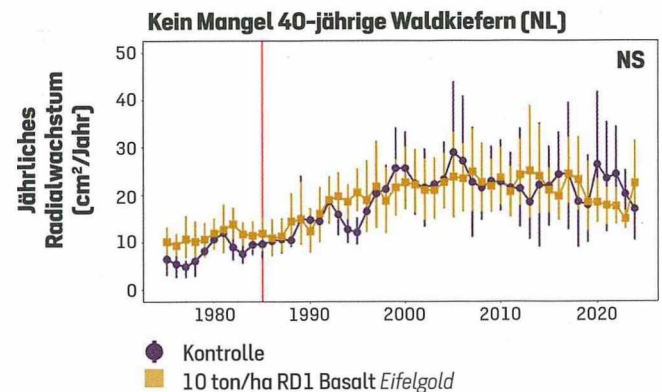
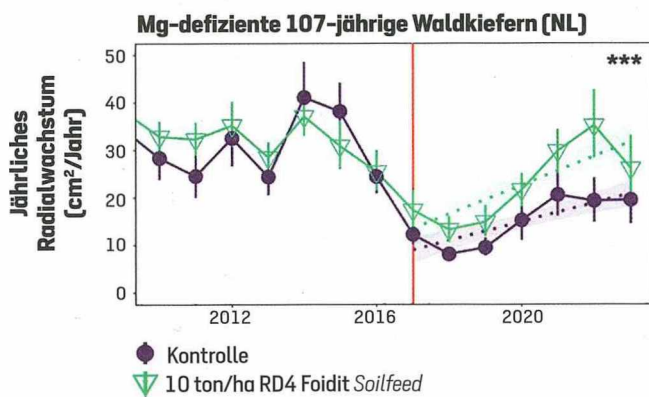


Abb. 5: Signifikante Zunahme des jährlichen radialen Wachstums von mit Gesteinsmehl behandelten Eichen- und Kiefernbeständen im Vergleich zu nahegelegenen Kontrollbeständen mit dem Anwendungsjahr als rote vertikale Linie dargestellt. Die Versuche wurden auf Sandböden in den Niederlanden (NL, Applikationen 1985, 2016 oder 2017) und Polen (PL, Applikation 1905) durchgeführt.

Grafik: R. V. D. Bauwhede

Vergleich zur Kontrolle wurde mit RD2-Phonolith erreicht (Abb. 4). Auf der Variante Kahlschlag war die Wachstumssteigerung allein auf das Wasserhaltevermögen des Gesteinsmehls zurückzuführen, das dem zeolithhaltigen Gesteinsmehl Phonolith RD2 (*Vulkamin*) überlegen war. Bei der Variante mit Waldkiefern wirkten alle Behandlungen besser auf das Pflanzenwachstum als die Kontrolle. Sowohl das Wachstum als auch die Blattdüngung hingen am stärksten mit dem SNK und der Freisetzung basischer Kationen aus dem Gesteinsmehl zusammen [13].

Wirkungen nach oberflächlicher Anwendung von Gesteinsmehl

Die Wirkung von Gesteinsmehl wird untersucht als Regenerationsmaßnahme von Eichen- und Waldkiefernwäldern. Bei einer Dosierung von 10 t Gesteinsmehl/ha zeigt sich, dass Gesteinsmehl langsamer und schwächer wirkt als Dolomit, mit einem erwarteten Spitzenwert von +0,2 pH-Einheiten im Mineralboden (0 - 10 cm) etwa 20 Jahre nach der Anwendung. Auch die basisch wirksamen Kationen aus dem Gesteinsmehl verbleiben lange Zeit im Ökosystem, mit erhöhten pH- und Basensättigungswerten für 40 bis 150 Jahre nach der Anwendung. Die Bodenbiologie zeigt eine Zunahme von Regenwürmern, Feinwurzeln, und saprotrophen Pilzen an und deutet bereits auf eine Verschiebung hin zu einem insgesamt höheren Nährstoffangebot hin, insbesondere in der Streuschicht [14, 15].

Die Ergebnisse von Bohrkernen von Stieleichen (*Quercus robur* L.) und Waldkiefern auf Ca-defizitären versauerten Sandböden aus den Niederlanden [16] und Polen [17] zeigen eine unmittelbare jährliche radiale Wachstumszunahme (mit Faktor 1,3 bis 2) nach Gesteinsmehlausbringungen (Abb. 5). Sowohl *Eifelgold* als auch *Soilfeed* können die Blattkonzentrationen von Ca, Mg, K und P messbar erhöhen und den Blattverlust verringern, wenn ein deutlicher Nährstoffmangel vorliegt.

Experimentelle Gesteinsmehlzugaben aus den Jahren 1980 bis 1990 werden erneut untersucht und mit nahegelegenen Kontrollflächen verglichen in Österreich (Ausbringung

„Gesteinsmehle sind Bodenhilfsstoffe, die langfristig die Bodenpufferung stärken, Bäume klimaresistenter machen und die Biodiversität schützen.“

ROBRECHT VAN DER BAUWHEDE

5 t *Biolit*/ha im Jahr 1987) [18] und Deutschland (Ausbringung 10 t *Vulkamin*/ha im Jahr 1994) [19].

In den österreichischen Fichtenwäldern (100 bis 250 Jahre) nahm das radiale Stammwachstum bis zu 23 Jahren um 30 % zu. Am größten war dieser Effekt bei jüngeren Bäumen, die ausreichend N in ihren Nadeln zur Verfügung hatten (Abb. 6). Kalium hingegen war in den Fichtenwäldern in Baden-Württemberg der limitierende Nährstoff. Das Phonolith *Vulkamin* Gesteinsmehl enthielt jedoch kein verfügbares Kalium und hatte somit keine Verbesserung des radialen Stammwachstums zur Folge. Dies zeigt, dass Gesteinsmehl das Baumwachstum am effektiv-

sten stimuliert, wenn es die Mängel eines bestimmten Nährstoffs behebt. Daher sollten vor einer Ausbringung im Voraus Blatt-/Nadelanalysen im Labor durchgeführt werden.

Krautschichten reagieren minimal und mit größerer Artenvielfalt

Die Verschiebung der Pflanzengemeinschaft war meist minimal und nicht signifikant, aber immer hin zu ökologischen Indikatorwerten mit höherer Reaktion (R, pH) und Fruchtbarkeit (N, Stickstoff). Langfristig nahm die Artenvielfalt zu, ohne dass charakteristische säureliebende Arten verloren gingen [18]. So traten in Österreich und Deutschland die Wald-Hainsimse (*Luzula sylvatica* ssp. *Sieberi*), ein alter Waldindikator, nur in mit Gesteinsmehl behandelten Parzellen auf. Vier bis sieben Jahre nach der Zugabe von Gesteinsmehl in den Niederlanden traten das Rote Straußgras (*Agrostis capillaris*), das Waldgeißblatt (*Lonicera periclymenum*), das Goldene Frauenhaarmoss (*Polytrichum commune*), und das Gemeine Grünstängelmoos (*Pseudoscleropodium purum*) nur in den Gesteinsmehlflächen auf aber sporadisch (Deckung <0,5 %). Dies ist ein wichtiger Unterschied zur Kalkung, die Ruderalpflanzen wie Brombeeren (*Rubus* sp.) fördern kann (insbesondere bei Behandlungen mit

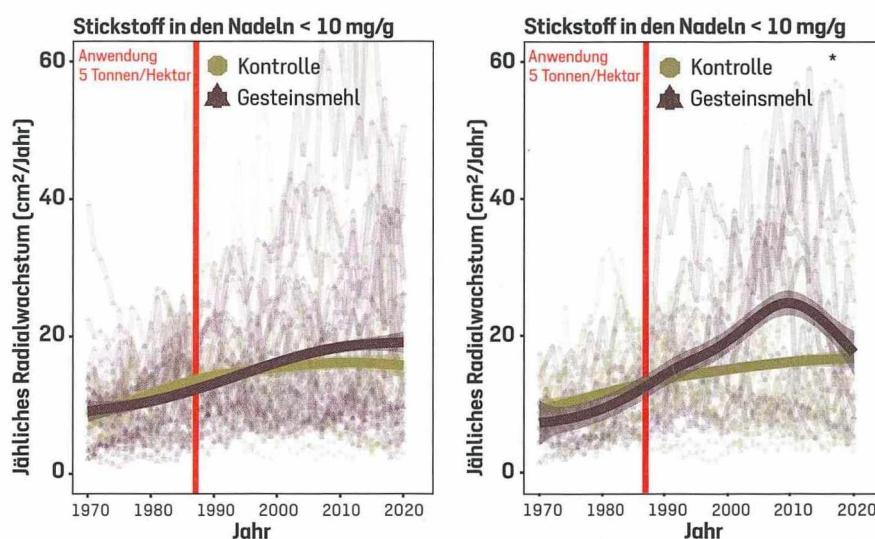


Abb. 6: Durchschnittlicher radialer Zuwachs von Fichten mit Gesteinsmehlausbringung (5 t/ha im Jahr 1987) und von Kontrollflächen zwischen 1970 und 2021 in Österreich, unterteilt in zwei Stickstoffklassen (N-Gehalte in den Nadeln). Bäume zeigen nur eine geringe Wachstumsreaktion wenn Stickstoff im Mangel ist (links), aber eine signifikante Wachstumsreaktion über 30 Jahre, wenn die Stickstoffkonzentration in den Nadeln über dem extremen Stickstoff-Mangelwert von 10 mg N/g liegt (rechts) [20].

Grafik: R. V. D. Bauwhede

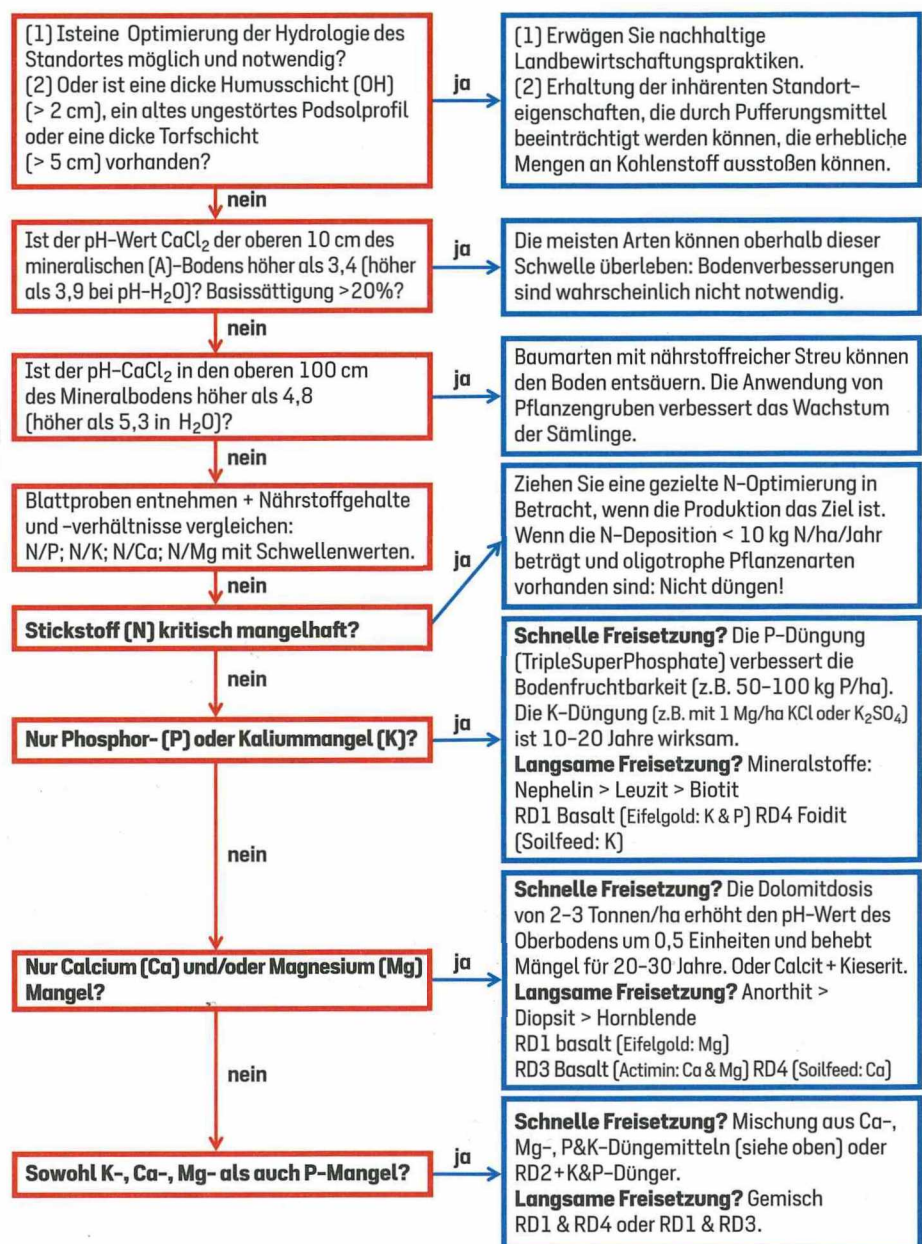


Abb. 7: Entscheidungsbaum für die Ausbringung von Kalk, Mineraldünger und Gesteinsmehl unter Berücksichtigung des Standorts, des pH-Wertes des Mineralbodens und der Blatternährung von Bäumen.

> 3 t/ha) auf Sandböden und damit die Artenvielfalt stören [21].

Wann sollte man Gesteinsmehl in Betracht ziehen?

Gesteinsmehl ist kein Allheilmittel und nicht immer notwendig. Auch der limitierende Nährstoff ist von Standort zu Standort sehr unterschiedlich. Daher sind Blattanalysen und ein Vergleich mit den kritischen Schwellenwerten der empfohlene Ansatz [22]. Dies ermöglicht eine gezielte Ausbringung von Gesteinsmehl über ein einfaches Expertensystem. Die-

ses System – ein Entscheidungsbaum – beginnt mit der Bodenanalyse (Abb. 7), aber man muss auch das oberirdische Ökosystem und die Bewirtschaftungsziele einbeziehen.

In Zukunft können Boden- und Blattproben von defizitären Waldorten entnommen werden. Anschließend analysiert ein anerkanntes Labor wie der Bodenkundliche Dienst Belgiens (Bo-

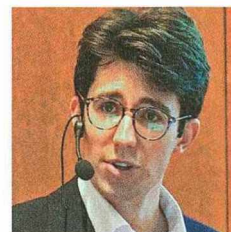
Literaturhinweise:

Download des Literaturverzeichnisses in der digitalen Ausgabe von AFZ-DerWald (<https://www.digitalmagazin.de/marken/afz-derwald>) sowie unter: www.forstpraxis.de/downloads

demkundige Dienst van België) die Proben. Mit Hilfe eines umfangreichen Expertensystems, das auf allen verfügbaren experimentellen Daten geschult wurde, wird

- (1) eine Empfehlung gegeben für die Art und Dosis des Gesteinsmehls und
- (2) eine Vorhersage gemacht für die Wirkung aller Steinmehle auf den pH-Wert des Bodens, die Basensättigung, die Vitalität (Nährstoffe) der Bäume und das Wachstum.

Wichtig ist, dass man mit dem Expertensystem auch die Vielfalt der Krautschicht abwägt und so aktiv das Aufkommen von Ruderalflora und Biodiversitätsverlust verhindert.



Dr. Ir. Robrecht Van Der Bauwhede

robrecht.vanderbauwhede@kuleuven.be

ist Umweltingenieur und Postdoc am Fachbereich für Erd- und Umweltwissenschaften der KU Leuven (BE). Seit 5 Jahren erforscht er Auswirkungen der Ausbringung von Gesteinsmehl auf Waldökosysteme. **Thomas Rombouts** ist Biologe und Doktorand an der UAntwerp (BE).

Dr. Peter Hartmann leitet den Arbeitsbereich Waldernährung und Stoffhaushalt, FVA Freiburg. **Benjamin Möller** ist Geologe und Gesteinsmehl-Experte bei Flux. **Dr. Leon van den Berg** ist Ökologe und Biogeochemiker bei der Bosgroep Zuid-Nederland (NL). **Ir. Wim Buysse** ist

Forstwirtschaftler bei der Agentschap voor Natuur en Bos (BE). **Prof. Dr. Ir. Annemie Elsen** leitet die Bodenwissenschaft beim Bodenkundlichen Dienst Belgiens (BE). **Prof. Dr. Ir. Erik Smolders** ist Bodenwissenschaftler und Geochemiker bei der KU Leuven (BE). **Prof. Dr. Ir. Bart Muys** ist Waldökologe und Forstwissenschaftler bei der KU Leuven (BE).