



AFZ DerWALD

Sonderdruck aus **AFZ-DerWald** 10/11/12/2020 www.forstpraxis.de





Trägt die Bodenversauerung zu den aktuellen Waldschäden bei?

Das Thema „Bedeutung von Bodenzustand und Bodenschutzkalkung für die Walderneuerung im Klimawandel“ wird in drei aufeinanderfolgenden Beiträgen publiziert und soll eine inhaltliche Ergänzung zum Positionspapier des Deutschen Verbands Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA) zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel [1] sein. Anhand einer bundesweiten Inventurstudie sowie Praxisbeobachtungen im Südharz, einem Brennpunkt der aktuellen Waldschäden, wird im ersten Beitrag die Arbeitshypothese behandelt, dass die aktuellen Waldschäden nicht nur durch Witterungsextreme zu erklären sind, sondern mit hoher Wahrscheinlichkeit auch durch die Deposition von Säuren und die dadurch entstandene Bodenversauerung mitverursacht werden.

TEXT: KLAUS VON WILPERT, PETER HARTMANN, HEIKE PUHLMANN, THORSTEN GAERTIG, JÜRGER SCHÄFFER, MARTIN THREN

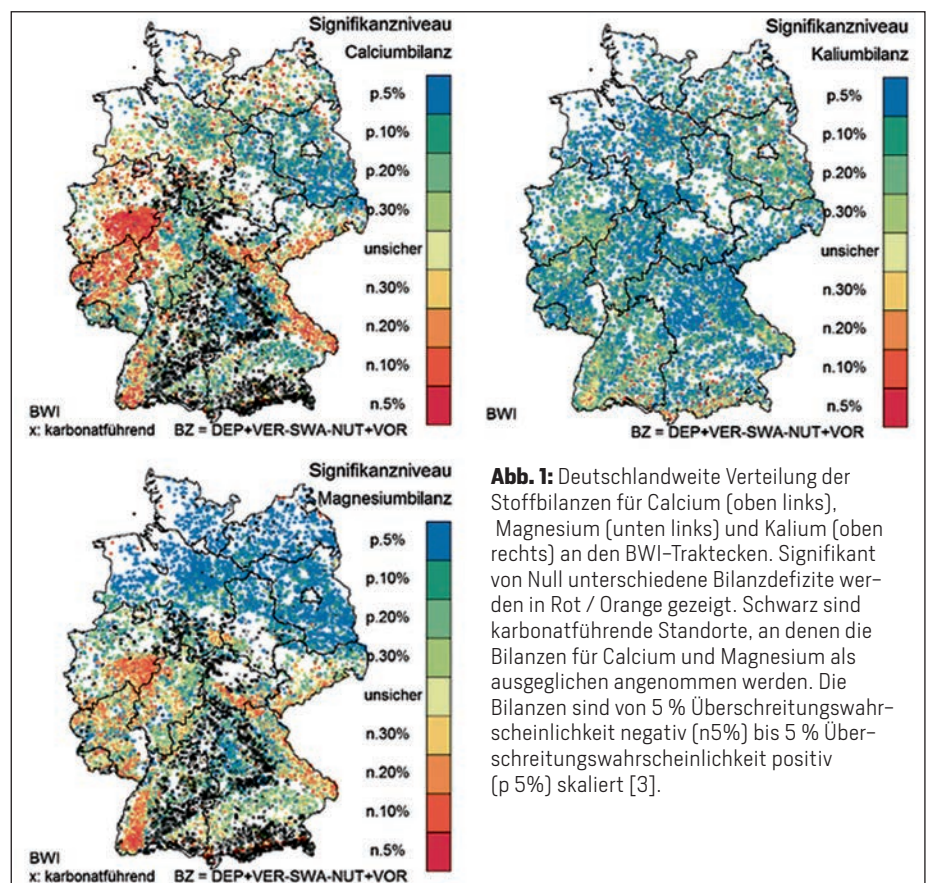
Aktuell ist der Zustand des Waldes in aller Munde. Das Schlagwort vom „Waldsterben 2.0“ macht die Runde, Waldgipfel finden statt und Masterpläne zur Rettung und Stabilisierung der Wälder gegen den Klimawandel werden geschmiedet, die sich überwiegend in vordergründigen Notfall- und Wiederbewaldungsmaßnahmen erschöpfen. Diese sind unbestreitbar ein zentraler Beitrag, um Sofortmaßnahmen zur Minderung der Kalamitäts-

folgen einzuleiten. Es zeichnet sich jedoch im Moment noch kein umfassender Strategieansatz zur langfristigen und nachhaltigen Stabilisierung der Wälder ab. Durch extreme Umweltveränderungen ist die Wissens- und Erfahrungsbasis hinsichtlich der

Erfolgsaussichten von Wiederbewaldungsmaßnahmen unsicher geworden. Insbesondere stellt sich die Frage, ob die aktuellen Waldschäden allein durch eine Reihe extremer Trockenjahre oder auch durch unnatürlich versauerte Waldböden und die dadurch reduzierte

Schneller ÜBERBLICK

- » **Bodenversauerung** belastet Wälder trotz reduzierter Schwefeleinträge
- » **Flaches Wurzelwerk** auf versauerten Böden verstärkt die Anfälligkeit von Wäldern für Trockenschäden
- » **Bodenschutzkalkung** kann langfristig das Wurzelwerk der Bäume intensivieren und vertiefen und Wälder stabilisieren
- » **Klimastabile Wälder** benötigen die Umstellung der Baumartenpalette hin zu klimatoleranten Baumarten; die Regeneration stark versauerter Böden durch Bodenschutzkalkung ist eine wesentliche Voraussetzung für dafür



„Klimastress wird durch Bodenversauerung verstärkt, deshalb sollte Bodenschutzkalkung zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel einbezogen werden.“

KLAUS VON WILPERT

Durchwurzelung tieferer Mineralbodenhorizonte infolge von Luftverschmutzung und Säureeintrag verursacht werden.

Die natürliche Bodenentwicklung verläuft so langsam, dass Menschen die Böden und ihre Eigenschaften intuitiv als weitgehend gleichbleibende Randbedingung für ihr Wirtschaften wahrnehmen. In der Landwirtschaft wurde jedoch schon im 18. Jahrhundert erkannt, dass die jährlichen Ernten den Böden so viele Nährstoffe entziehen, dass deren Nährstoffvorräte durch Kalkung und Düngung auf einem für das Pflanzenwachstum optimalen Niveau gehalten werden müssen. Das führte auf landwirtschaftlich genutzten Böden zu einer unnatürlichen Nährstoffanreicherung, schützte sie aber auch vor Versauerung durch den sauren Regen des Industriezeitalters. Wälder sind naturnahe Ökosysteme, in die man außer durch die Holzernte und durch Kalkungen zur Kompensation von Säureeintrag nicht steuernd eingreifen wollte. Deshalb haben Einträge von Säuren und Stickstoff mit dem Regen die Waldböden extrem verändert und verarmt. Diese sind die wesentliche Ursache einer Bodenversauerung, die in den vergangenen Jahrzehnten zu einer Erhöhung der Säurestärke in nicht kalkhaltigen Böden um durchschnittlich den Faktor 100 bis 200 geführt hat. Durch die Arbeit des Forstwissenschaftlers FRANK aus dem Jahr

1927 können wir einen direkten Vergleich frühindustrieller Bodenversauerung mit heutigen Versauerungsintensitäten durchführen. Die pH-Werte sind, auf kalk- und basenarmen Ausgangsgesteinen und den daraus entstandenen Böden, in der für Bodenbildung extrem kurzen Zeit von 65 Jahren in den engen pH-Bereich zwischen 3 und 4 abgesunken [2] – weit unterhalb der pH-Grenze der für Bodenstruktur und Bodenbelüftung so wichtigen Regenwurmarten.

In dem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) geförderten Projekt zur Nährstoffnachhaltigkeit in Deutschland (EnNa) wurde ein deutschlandweiter Überblick über die Verfügbarkeit von Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Kalium (K) der Waldböden erarbeitet. Dies geschah, indem Bodeninformationen von den Messpunkten der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) mit-



Foto: K. v. Wilpert

Abb. 2: Extrem flach entwickeltes Wurzelwerk an 2018 abgestorbenen Fichten aus Naturverjüngung im Südharz auf stark versauerten Böden.



tels Regressionsfunktionen auf die Messpunkte der Bundeswaldinventur übertragen wurden, um dort Stoffbilanzen für die genannten Elemente als Differenzen zwischen Stoffeinträgen mit dem Regen und der Verwitterung von Ausgangsgestein einerseits und Stoffausträgen mit dem Sickerwasser und der Holzernte andererseits zu berechnen [3]. Mittels Monte-Carlo-Simulationen wurden die Bilanzunsicherheiten der Stoffbilanzen geschätzt und so Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Bilanzen bestimmt [4].

Hier wurden die bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10 % signifikant negativen Bilanzen der drei genannten Elemente, die einerseits die Pufferkapazität der Böden bestimmen und andererseits essenzielle Nährstoffe für Waldbäume sind, als Indikatoren für die regionale Einschätzung der fortschreitenden Bodenversauerung und damit auch des Kalkungsbedarfs verwendet. Die Darstellung zeigt, dass auf etwas über 16 % der Waldfläche in Deutschland (rote und orange Punkte in Abb. 1) der Stoffhaushalt der Waldböden bei praxisüblicher Nutzungsintensität derart durch starke Säuren (Nitrat und Sulfat) gestört ist, dass die Säuren mehr Nährstoffe aus dem Boden auswaschen als durch natürlich Prozesse nachgeliefert werden können und so ein signifikanter Trend zur Bodenversauerung trotz nachlassender Sulfateinträge weiter fortschreitet. Man kann annehmen, dass auf diesen 16 % der Waldfläche die Waldböden durch Bodenversauerung so verarmt sind, dass ohne aktive Regeneration der natürlichen Bodeneigenschaften die Wälder dort durch die Folgen einer unnatürlichen Bodenversauerung zusätzlich zu klimabedingten Stressfaktoren belastet sind. Brennpunkte sind dabei



Foto: K. v. Wilpert

Abb. 3: Extrem flacher Wurzelteller auf tiegründigem Standort nach Sturmwurf.

die walddreichen Mittelgebirge im Sauerland, Hunsrück, Schwarzwald, Bayerischem Wald, Thüringer Wald, Harz und Erzgebirge.

Auf stark versauerten Schieferstandorten im Südharz konnte in den dort durch Trockenheit und Borkenkäfer geschädigten Wäldern beobachtet werden, dass unter Altbeständen etablierte und vermeintlich gesicherte Fichten-Naturverjüngungen flächig abgestorben sind. Dies ist insofern ein erschreckender Befund, als damit die Hoffnung auf eine schnelle Etablierung von Nachfolgebeständen nach dem weitgehenden Ab-

sterben des Altbestands unrealistisch geworden ist. Die nähere Untersuchung der Hintergründe dieser ungewöhnlichen Schäden an der Naturverjüngung ergab, dass auch bis zu 2 m hohe Jungfichten ausschließlich in der Humusauflage, also in den obersten 5-10 cm des Bodens, gewurzelt hatten und ganz leicht aus dem Boden herausgerissen werden konnten (Abb. 2). Es ist einsichtig, dass ein so flach entwickeltes Wurzelwerk im tiefen Boden gespeicherte Wasser- und auch Nährstoffvorräte nicht erreichen kann und die betreffenden Bäume dadurch gegenüber Austrocknung empfindlicher sind, als dies bei standortgemäß tief entwickeltem Wurzelwerk der Fall wäre. Eine naheliegende Erklärung dieser ungewöhnlichen Flachwurzeligkeit auf den mit $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten zwischen 4,0 und 4,5 ($\text{pH}(\text{KCl})$ 3,2-3,6) stark versauerten Böden ist, dass durch die hohen Säurestärken für Baumwurzeln toxische Aluminiumionen aus Tonmineralen freigesetzt werden [5, 6, 7]. Dadurch wird die Durchwurzelung des Bodens auf den humosen Oberböden beschränkt, wo gelöste Humate das Aluminium

„entgiften“.

Ergänzt wurden diese Beobachtungen durch die extrem flach entwickelten Fichtenwurzelteller der ausgedehnten Sturmwurfflächen nach dem Sturm „Friederike“ im Januar 2018 in der gleichen Region (Abb. 3). Auch hier ist anzunehmen, dass, wie die Ergebnisse von BRAUN und anderen [8] nahelegen, ein versauerungsbedingt flaches Wurzelsystem die Intensität der Sturmschäden verstärkt hat, insbesondere, da die betreffenden Standorte gut belüftet und dadurch bis in über 1 m Bodentiefe gut durchwurzelbar sein müssten [9].

Stabilisierungswirkung von Bodenschutzkalkungen im Klimawandel

Im Beitrag 2 zum Thema „Bedeutung von Bodenzustand und Bodenschutzkalkung für die Walderneuerung im Klimawandel“ wird anhand mehrerer Fallstudien diskutiert, welche Bedeutung Bodenschutzkalkungen für die Durchwurzelung und die Stabilisierung von Wäldern haben.

TEXT: KLAUS VON WILPERT, PETER HARTMANN, HEIKE PUHLMANN, THORSTEN GAERTIG, JÜRGEN SCHÄFFER, MARTIN THREN

Zahlreiche Untersuchungen belegen die Wirkungen der Waldkalkung auf Waldböden. Neben chemischen Aspekten sind die positiven Entwicklungen der Humusstruktur, der Feinwurzelverteilung sowie der Bestandesernährung zu nennen [6, 7, 10, 11, 12].

Die regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung erzielt eine grundsätzliche Umstimmung des Bodenchemismus, eine stabilere Speicherung von Pflanzennährstoffen und gleichzeitig eine Aktivierung der Bodenbiologie. Der Säuregrad des Bodens wird dabei wieder an den standortstypischen natürlichen pH-Wert angenähert. Außerdem werden die pflanzenschädlichen, durch Bodenversauerung und Auflösung von Tonmineralen entstandenen Aluminiumionen von den Bodenaustau-

schern verdrängt und durch pufferndes Calcium und Magnesium ersetzt. Diese chemische Stabilisierung belebt die Waldböden und verbessert ihre Funktionen [13]. Der Kohlenstoffvorrat in biologisch wenig aktiven Humusauflagen wird mobilisiert und in stabileren Mineralbodenhumus umgewandelt. Die Böden werden dadurch besser belüftet, wodurch eine tiefere und intensivere Durchwurzelung des standörtlich möglichen Wurzelraums zu erwarten ist. In dieser Studie erhöhte eine einmalige Kalkung mit praxisüblicher Dosierung die Basensättigung bis in über 1 m Tiefe sehr schwach, hatte jedoch keinen Effekt auf die Feinwurzelichte.

Kalkungen in Dosierungen zwischen 5 und 10 t/ha, welche dem durchschnittlichen Kalkungsbedarf im Pro-

gramm der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung in Baden-Württemberg entsprechen [13], erhöhten die Basensättigung auch nach 50 Jahren noch sehr deutlich. Bis 30 cm Bodentiefe war die Basensättigung gegenüber den Nullflächen um 7 bis über 60 % erhöht. Die Feinwurzelichte war bis in 60 cm Bodentiefe häufig signifikant gegenüber den Nullflächen erhöht. Die Reichweite von durch Kalkung erhöhten Feinwurzelichten ist auf sandigen Böden am stärksten und auf dichten, stauwasserbeeinflussten Böden am schwächsten ausgeprägt.

Die Kalkung bewirkte in diesen sehr langfristigen Versuchen bis in 60 cm Tiefe auch eine signifikante Erhöhung der Grobwurzelichte und damit eine bessere Verankerung der Bäume.

Schneller ÜBERBLICK

- » **Bodenschutzkalkung verbessert** die Nährstoffspeicherung, Struktur, Belüftung und Durchwurzelung von Böden
- » **Sieben teilweise hoch dosierte** Kalkungsversuche wurden nach 50 Jahren intensiv untersucht. Es wurden eine deutlich höhere Basensättigung und eine tiefer reichende Durchwurzelung festgestellt
- » **Diese stabilisierenden Effekte** waren bei Kalkdosierungen zwischen 5 und 10 t/ha am stärksten ausgeprägt



Quelle: J. Schäffer

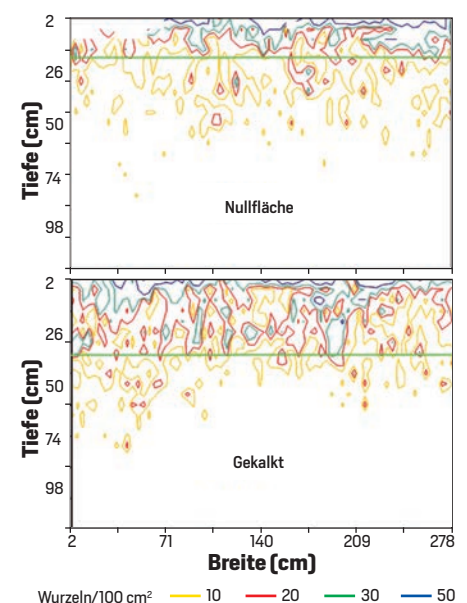


Abb. 4: Der langfristige Kalkungsversuch Ulm zeigt auf der 1952 mit 10 t/ha gekalkten Parzelle einen etwa doppelt so tiefen Hauptwurzelraum wie auf der ungekalkten Kontrollparzelle (rechts). Zählung der Feinwurzeln mit einem Zählrahmen (links) [12]



Basensättigung und Feinwurzeldichte

Tab. 1: Basensättigung (oben) und Feinwurzeldichte (unten) auf den unbehandelten Parzellen (Null) sowie die Differenz behandelte Parzelle – Nullparzelle (Diff); # = Differenz der Basensättigung > 20 %; * = Differenz der Feinwurzeldichte mit $p < 5\%$ signifikant

Quelle: K. v. Wilpert

	Fi337 2 t/ha CaCO ₃		Schönmünzach 5 t/ha CaCO ₃		Pfalzgrafenweiler 10 t/ha CaCO ₃		Ulm 10 t/ha CaCO ₃		Bonndorf 6 t/ha CaO		Triberg 6 t/ha CaO		Kloster- reichenbach 20 t/ha CaO	
Basensättigung [%]														
Tiefe	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff
0-10	4,5	3,9	30,5	54,8#	7,4	38,4#	3,3	18,7	16,9	72,9#	8,0	45,9#	34,5	65,5#
10-30	2,1	3,0	7,9	63,4#	3,8	42,2#	2,8	8,5	5,8	7,4	2,6	16,8	23,1	69,5#
30-60	2,9	3,0	4,0	56,4#	5,9	5,9	15,8	-1,2	5,3	7,9	2,3	3,8	6,6	93,4#
Feinwurzeldichte < 2 mm [N/dm ²]														
Tiefe	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff	Null	Diff
0-20	13,5	-0,4	13,7	10,5*	23,9	3,4	22,6	1,2	12,0	9,9*	16,9	0,6	17,8	4,4*
20-40	3,6	-0,6	5,6	4,9*	7,2	2,0*	7,0	4,3*	5,8	-0,1	1,5	2,6*	8,8	4,4*
40-60	1,3	0,1	3,2	4,8*	2,9	2,5*	2,0	1,1	4,0	-1,4	0,9	1,2*	6,4	5,1*

Auswertung lange zurück- liegender Kalkungsversuche

Aus dem Versuchsflächenarchiv der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg wurden sieben gut dokumentierte Kalkungsversuche in Beständen mit der Hauptbaumart Fichte ausgewählt und in den Jahren 1998 bis 2000 intensiv untersucht. Die Versuche waren mit der Zielrichtung der Humusaktivierung und des Abbaus von mehrere Dezimeter mächtigen Rohhumusaufträgen auf Flächen mit starken Streunutzungsschäden angelegt worden. Auf allen Flächen wurde in den Jahren 1949 bis 1953, also etwa 50 Jahre vor den Untersuchungen, eine gekalkte Parzelle sowie eine Nullparzelle angelegt. Die Versuche decken ein breites Spektrum an Standortsbedingungen, Dosierungen und Kalkformen ab. Die Dosierungen lagen zwischen 2 und 10 t/ha Karbonatkalk und 6 bis 20 t/ha Branntkalk. Die hoch dosierten Varianten können als Modellbeispiele für die Wirkung einer 2- bis 3-fach wiederholten, praxisüblichen Kalkung mit 3 t/ha angesehen werden. Die Versuchsflächen Fi337 und Pfalzgrafenweiler sind durch Braunerden geprägt, Schönmünzach und Klosterreichenbach durch Podsole, Bonndorf und Triberg durch Pseudogley-Braunerden (alle Schwarzwald) und Ulm (Südwestdt. Alpenvorland) durch einen Pseudogley. Auf allen Flächen wurde

„Waldkalkungen entsauern den Boden und intensivieren und vertiefen Grob- und Feinwurzeln.“

KLAUS VON WILPERT

die Tiefenwirkung der Kalkungsmaßnahmen, wie der Verbleib des zugeführten Calciums, die Veränderung der Feinwurzeldichte sowie die für die Raumerschließung und mechanische Verankerung der Bäume verantwortlichen Grobwurzeln untersucht. Hierfür wurde auf jeder Parzelle je ein etwa 3 m breites und 1 m tiefes Bodenprofil im Zwischenstammbereich angelegt. Bodenproben zur Bestimmung des bodenchemischen Zustandes wurden entsprechend der BZE-Arbeitsanleitung entnommen und analysiert. Die Verteilung von Fein- (< 2 mm) und Grobwurzeln (2 bis 5 mm) wurde vollflächig an der Profilwand mittels eines Zählrahmens, der 25 Quadrate von 4 x 4 cm Kantenlänge hatte (Abb. 4), aufgenommen. Außerdem wurde die diffusive Gasdurchlässigkeit des Oberbodens, welche ein Indikator für das Wurzelwachstum wichtigen Bodenbelüftung ist, mittels statischer

Messkammern [14] gemessen. Die Auswertung geht dabei von der Hypothese aus, dass die höher dosierten Kalkungen, die vor dem Höhepunkt der Säuredepositionen in den 1970er- bis 1990er-Jahren appliziert wurden, die Behandlungsfelder wirksam vor depositionsgetriebener Bodenversauerung schützten. Die Nullflächen dagegen waren ungeschützt den Säureeinträgen ausgesetzt und sind entsprechend stärker versauert.

Auf allen Flächen ist die Basensättigung (der prozentuale Anteil von Neutralkationen (Ca, Mg, K und Na) an der Austauschbelegung im Mineralboden) auch 50 Jahre nach der Kalkung deutlich erhöht (Tab. 1).

Die Basensättigung war auf allen Versuchsanlagen bis 30 cm Mineralbodentiefe gegenüber den Kontrollfeldern bis auf eine Ausnahme mindestens verdoppelt. Bei höheren Dosierungen und bei Applikation von Branntkalk war die kalkungsbedingte Erhöhung der Basensättigung noch stärker ausgeprägt und reichte bis an die Unterseite der Profile. In Schönmünzach, einem sehr durchlässigen Boden mit hohem Grus- und Sandanteil, war trotz der relativ niedrigen Dosierung von 5 t/ha Karbonatkalk eine ähnliche Tiefenwirkung wie in Klosterreichenbach mit 20 t/ha stärker löslichem Branntkalk zu beobachten. Mit Abstand am schwächsten war die Basensättigung im Versuch mit der niedrigsten Dosierung (2 t/ha ausgeprägt. Auf stark lehmigen Böden

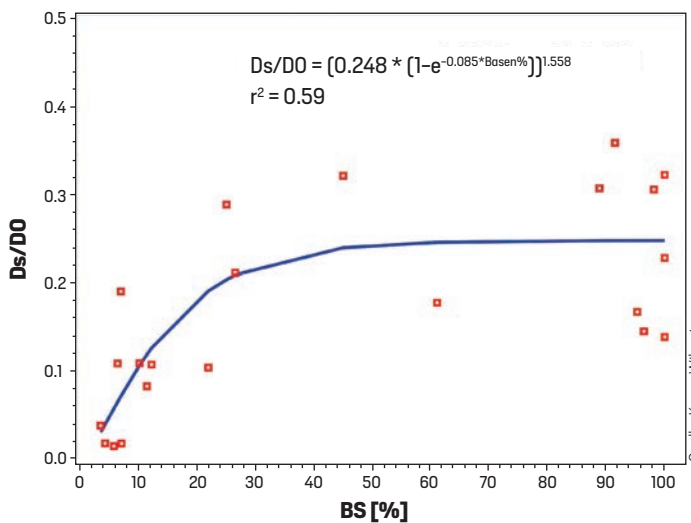


Abb. 5: Diffusive Gasdurchlässigkeit an der Bodenoberfläche (D_s/D_0) in Abhängigkeit von der Basensättigung in 0–10 cm Bodentiefe (BS %). D_s/D_0 zeigt die relative Verlangsamung der Gasdiffusion im Boden (D_s) gegenüber der freien Atmosphäre (D_0).

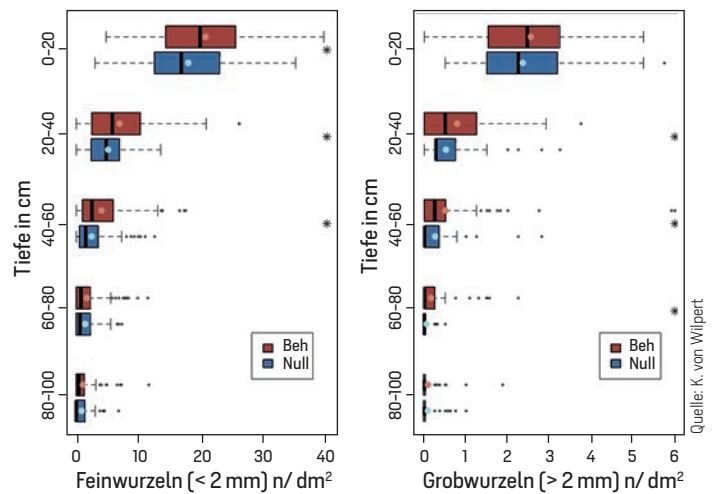


Abb. 6: Tiefenprofile von Feinwurzeln < 2 mm (links) und Grobwurzeln 2–5 mm (rechts) aller sieben Versuche. Dargestellt sind in den Tiefenstufen Mittelwerte-Quartile (farbige Punkte), 5 %- und 95 %-Perzentile und Extremwerte. * = signifikante Unterschiede zwischen Null- und Behandlungsflächen ($p = 5 \%$)

(Pfalzgrafenweiler, Ulm) wurde im Unterboden eine leichte Absenkung der Basensättigung im Vergleich zu den unbehandelten Parzellen beobachtet. Dies kann durch die Verdrängung von Aluminiumionen aus dem Oberboden und dessen Verlagerung in den Unterboden erklärt werden.

Neben der bodenchemischen Verbesserung, die sich in der gestiegenen Basensättigung widerspiegelt, hatten die Kalkungen eine positive Wirkung auf die Dichte und Tiefenverteilung der Feinwurzeln (Tab. 1). Die in Tabelle 1 gezeigten Mittelwerte der Feinwurzelprofile basieren auf 517 Feinwurzel-Tiefenprofilen (12 bis 14 Wiederholungen je Versuchsanlage), sodass eine Bewertung der Differenzen zwischen Feinwurzelprofilen auf Behandlungs- und Nullfeldern mittels t-Tests möglich war.

Nur auf der Fläche mit 2 t/ha Kalkdosierung waren keine signifikanten Veränderungen der Feinwurzelprofile zu beobachten, während diese bei allen anderen Versuchsflächen innerhalb des standortstypischen Hauptwurzelraums signifikant ($p < 5 \%$) zunahm. Im Unterboden (40 bis 60 cm) der Versuchsfläche Bonndorf war die Feinwurzelprofile auf der Behandlungsfläche etwas niedriger als auf der Nullfläche, was durch Stauwassereinfluss im Unterboden erklärt werden kann.

Trotz einer gewissen Unsicherheit hinsichtlich der standörtlichen Vergleichbarkeit zwischen Null- und Be-

handlungspartellen auf den „historischen“ Kalkungsversuchen belegt diese Studie eindeutig eine langfristige Erhöhung von Basensättigung und Feinwurzelprofile bei Kalkungen mit einer Dosierung von 5 t/ha und darüber. Die Tiefenwirkung auf Feinwurzelverteilung und Basensättigung war auf den Versuchsflächen Schön Münz und Klosterreichenbach am stärksten ausgeprägt. Beides sind sandige Standorte mit hoher Wasserleitfähigkeit. Die Versuchsflächen mit Branntkalk wurden in der Studie belassen – obwohl Branntkalk als zu aggressive Kalkform nicht in der Praxis zur Bodenschutzkalkung eingesetzt wird – weil durch die hohe Löslichkeit von Branntkalk diese Varianten als Modellbeispiele für die Abschätzung einer maximal erreichbaren Tiefenwirkung dienen können. Die beiden Versuchsflächen mit 6 t/ha Branntkalk zeigten ähnliche Effekte auf Basensättigung und Feinwurzelprofile wie die mit 5 bis 10 t/ha Karbonatkalk behandelten Flächen. Die Extremvariante mit 20 t/ha Branntkalk erhöhte die Basensättigung bis in 1,20 m Bodentiefe auf etwa 100 % und übersteuerte damit die standortstypische Bodenreaktion massiv. Interessant ist dabei, dass die Feinwurzelprofile zwar ebenfalls bis in 1 m Bodentiefe signifikant erhöht ist, diese Reaktion aber deutlich niedriger war als auf der mit Karbonatkalk behandelten Fläche Schön Münz. Dies legt nahe, dass bei Basensättigungen von 20 bis 30 % das Potential zur Vita-

lisierung und Vertiefung des Wurzelwerks weitgehend ausgeschöpft ist und höhere Basensättigungen keine weitere Verbesserung mehr bringen.

Bodenstruktur und Belüftung

Bodenschutzkalkungen können aufgrund zweier unterschiedlicher Wirkungsmechanismen die Durchwurzelungsintensität erhöhen. Einerseits vermindert eine erhöhte Basensättigung die toxische Aktivität von Aluminiumionen im potenziellen Wurzelraum. Andererseits regt die insbesondere an der Bodenoberfläche stark erhöhte Basensättigung dort die Aggregat- und Porenbildung an, die besonders von Regenwürmern geleistet wird. In dem intensiv untersuchten Kalkungsversuch Ochsenhausen wurde auf der gekalkten Parzelle eine Verzehnfachung der Regenwurmdichte beobachtet [12]. Damit einher geht eine Verbesserung der Bodenbelüftung im gesamten Wurzelraum, da die Sauerstoffnachlieferung und die Entsorgung von Kohlendioxid aus der Bodenatmung nur über die Bodenoberfläche erfolgen [15]. Abb. 5 belegt den Zusammenhang zwischen Basensättigung und der an allen Bodenprofilen gemessenen diffusen Gasdurchlässigkeit des Oberbodens. Der Wert D_s/D_0 gibt dabei die relative Verlangsamung der Gasdiffusion im Boden (D_s) gegenüber der freien Atmosphäre (D_0) an.

Im Bereich bis 25 % Basensättigung



nimmt die diffusive Gasdurchlässigkeit stark zu; die Kurve flacht dann ab und erreicht ab etwa 50 % ein Plateau. Das zeigt, dass bei Basensättigungen > 20 bis 25 % an der Bodenoberfläche gute Belüftungsbedingungen für die darunterliegenden Bodenschichten zu erwarten sind, was das Vordringen von Wurzeln in größere Bodentiefen erleichtert. Diese Werte werden mit Ausnahme der Versuchsfläche mit der niedrigsten Kalkdosierung, auf allen anderen Flächen dauerhaft erreicht (Tab. 1).

Fazit

Die vertiefte Durchwurzelung des Bodens macht die Wälder standfester, resistenter gegen Trockenheit und verbessert zugleich die Nährstoffversorgung. Dies erhöht die Widerstandsfä-

higkeit gegen häufigere und verstärkte Extremwetterereignisse. In Abb. 6 werden Mittelwerte der Tiefenprofile der Durchwurzelungsintensität für die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen relevanten Feinwurzeln (< 2 mm) und für die der Raumerschließung und auch der mechanischen Verankerung der Bäume dienenden Grobwurzeln (2 bis 5 mm) aus allen Versuchsanlagen gezeigt.

Diese zusammenfassende Grafik zeigt, dass die mittlere Feinwurzel-dichte bis in 40 cm Mineralbodentiefe auf den Kalkungsflächen signifikant höher war als auf den Nullflächen. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Grobwurzeln, allerdings mit einer schwachen Tendenz zu einer stärkeren Tiefenerschließung. Letzteres stützt die im ersten Beitrag beschriebene Hypothese, dass Bodenversauerung nicht nur

die Versorgung der Bäume mit Wasser und Nährstoffen beeinträchtigt, sondern auch ihre mechanische Verankerung im Boden, und dass Bodenschutzkalkungen die Wälder hinsichtlich beider Aspekte stabilisieren können. Die dargestellten Fallstudien belegen eindrucksvoll, dass Bodenschutzkalkungen die Feinwurzeln der Bäume in tiefere Bodenschichten vordringen und die dort gespeicherten Wasser- und Nährstoffreserven erschließen lassen. Außerdem konnte gezeigt werden, dass analog auch Grobwurzeln nach Kalkung tiefer in den Boden reichen, was die mechanische Verankerung der Bäume verbessert. Es ist einsichtig, dass dies eine nachhaltige Stabilisierung der Wälder gegen Schädigung durch Extremwetterereignisse wie Trockenheit, aber auch Sturm ermöglicht.

Bodenschutzkalkung zur Stabilisierung des Waldes, Teil 3

Beitrag 3 zum Thema „Bedeutung von Bodenzustand und Bodenschutzkalkung für die Walderneuerung im Klimawandel“ fasst die Ergebnisse der zwei ersten Beiträge zusammen und begründet Bodenschutzkalkungen als Teil von Strategien zur Stabilisierung von Wäldern im Klimawandel.*

TEXT: KLAUS VON WILPERT, PETER HARTMANN, HEIKE PUHLMANN, THORSTEN GAERTIG, JÜRGEN SCHÄFFER, MARTIN THREN

Nach den Ergebnissen einer bundesweiten Studie zur Nährstoffnachhaltigkeit (EnNa) besteht auf 16 % der deutschen Waldfläche ein statistisch signifikantes Bodenschutzproblem durch Bodenversauerung. Dort ist das Zusammenwirken dieser „Versauerungsalast“ mit den neuen Stressfaktoren durch den Klimawandel bei der Interpretation der aktuellen Waldschäden zu beachten. Es ist davon auszugehen, dass die Bodenversauerung eine nicht dem natürlichen Standortpotenzial entsprechende, flache Durchwurzelung der Waldbäume induziert hat, Hierdurch wurde die Sensitivität der

Bäume gegenüber Trocknis verstärkt. Daraus folgt, dass auf stark versauerten Böden eine Walderneuerung ohne die Vorbereitung durch aktive Sanierung der nicht standortgemäßen Bodenversauerung wenig erfolgreich sein wird. Durch Bodenschutzkalkungen sollten die obersten Schichten der Waldböden in einen für Waldbäume zuträglichen, naturnahen Zustand zurückversetzt werden, bevor die neue Waldgeneration durch Pflanzung oder Naturverjüngung erfolgreich wiederbegründet werden kann. Dies sollte in Strategien zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel berücksichtigt werden. Durch

Bodenschutzkalkung sollen keine gleichmäßig nährstoffgesättigten Standorte entstehen. Vielmehr steht die Regeneration des natürlichen Bodenzustands und seiner Vielfalt als Grundlage einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung und Biodiversität im Mittelpunkt. Ungewollte Nebenwirkungen sind gering und durch niedrige Dosierung (3 bis 4 t/ha) und die geringe Löslichkeit des eingesetzten Dolomitskalks beherrschbar [13]. Die für die Ausbringung des Kalks verfügbaren Techniken, sowohl durch Verblasen am Boden (Abb. 7) als auch durch Hubschrauber (Abb. 8), sind hoch entwickelt und spe-

*Danksagung: Für die vielen konstruktiven Anmerkungen und Hinweise bedanken wir uns herzlich bei Prof. Dr. Andreas Bolte, Prof. Dr. Christoph Kleinn, Prof. Dr. Achim Dohrenbusch und Prof. Dr. Peter Spathelf.



Foto: P. Hartmann

Abb. 7: Spezialisiertes Verblasegerät zur kostengünstigen terrestrischen Ausbringung von angefeuchtetem Kalk

Schneller ÜBERBLICK

- » **Auf etwas mehr als 16 %** der bundesdeutschen Waldflächen besteht ein Kalkungsbedarf zur Regeneration des natürlichen Bodenzustands und seiner Vielfalt
- » **Auf ca. 9 % dieser Flächen** sollte zusätzlich die Kaliumernährung der Wälder stabilisiert werden; dies kann durch Beimischung qualitätsgeprüfter Holzasche erfolgen
- » **Der jährliche Flächenumfang** mit Kalkungsbedarf ist etwa halb so hoch wie für die Anfang der 1990er-Jahre durchgeführten Kalkungsmaßnahmen
- » **Es ist dringend angeraten,** Bodenschutzkalkungen als wesentlichen Bestandteil in Strategien zur nachhaltigen Stabilisierung der Wälder im Klimawandel einzubeziehen

zialisiert, sodass die Genauigkeit von Dosierungsmenge und die Gleichmäßigkeit der räumlichen Verteilung sehr hoch sind. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass sensible Biotope mit hohem Naturschutzwert bei der Durchführung der Kalkung präzise ausgespart werden [13].

Die Auswertung der „historischen“ Kalkungsversuche hat jedoch gezeigt, dass auf den meisten Standorten eine einmalige Praxiskalkung in dieser Dosierung keine Vertiefung des Hauptwurzelsraums von Fichten auslösen wird. Deshalb ist davon auszugehen, dass i. d. R. erst die summarische Wirkung von 2 bis 3 Praxiskalkungen, also Kalkgaben von mindestens 5 t/ha, zu einer Wiederdurchwurzelung des standörtlich möglichen Wurzelsraums führen wird. Das bedeutet, dass Kalkungsprogramme auf eine Laufzeit von 20 bis 30 Jahren geplant werden müssen, um eine nachhaltige Stabilisierung der Wälder zu erreichen.

Der Zusammenhang zwischen dem Versauerungszustand des Bodens und der Durchwurzelungsintensität legt nahe, dass eine Vertiefung des Wurzelsraums durch Bodenschutzkalkung ein wesentlicher Beitrag zur Stabilisierung von Wäldern im Klimawandel sein kann. Zugespitzt formuliert bedeutet das auch, dass die Begründung klimastabilerer Wälder auf den in der aktuellen Katastrophe abgestorbenen Waldflächen auf versauerten Waldböden ohne einen Abbau der dortigen „Versauerungsalast“ durch Bodenschutzkalkung wenig Aussicht auf langfristigen Erfolg haben wird. Im ersten Beitrag wurden 16 % der bundesdeutschen Waldfläche als potenziell kalkungsbedürftig eingeschätzt. In den Ergebnissen der BZE wurde je nach Kriterien der Kalkungsbedürftigkeit an 37 bis 40 % der Aufnahmepunkte ein versauerungssempfindlicher Bodenzustand diagnostiziert, der dort einen Kalkungsbedarf nahelegt [16]. Umfassende Strategien zur Entwicklung klimastabiler Wälder dürfen sich also nicht allein auf die Identifika-



tion klimatoleranter Baumarten und deren Anpflanzung auf den entsprechenden Standorten beschränken, sondern müssen parallel dazu den Bodenzustand und dessen Wiederannäherung an eine naturnahe bodenchemische Ausstattung durch Bodenschutzkalkung als wesentliche Voraussetzung berücksichtigen.

Bedarfsflächen und Kalkform

Aus den Nährelementbilanzen der EnNa-Studie [3] kann neben dem Bedarf an Bodenschutzkalkungen mit Dolomitmalk auch der Bedarf für eine Unterstützung der Kaliumversorgung von Wäldern abgeschätzt werden. Letz-

teres kann auf Standorten mit nachgewiesenem Kaliummangel durch die Beimischung qualitätsgeprüfter Holzasche erfolgen, wie dies in Baden-Württemberg seit 2007 praktiziert wird. Die Kaliumversorgung der Wälder hat dort seit 1983 deutlich abgenommen, sodass zeitweise an 30 bis 40 % der Aufnahme-punkte akuter Kaliummangel bestand, wie die im Abstand von fünf bis sechs Jahren durchgeführten Ernährungsinventuren gezeigt haben [17]. Besonders deutlich tritt dieser Kaliummangel auf gut aggregierten Lehmen auf, die gleichzeitig unsere wuchskräftigsten Böden sind. Dies wird auf einen versauerungsbedingten Verlust von wurzeler-

„Bodenschutzkalkungen sind auf versauerten Böden eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Stabilisierung der Wälder gegenüber Extremwetter.“

KLAUS VON WILPERT

reichbaren Kaliumvorräten an den Oberflächen der Bodenaggregate zurückgeführt [18]. An Fichtensämlingen konnte gezeigt werden, dass deren Wurzeln und auch die sie begleitenden Mykorrhizapilze nicht in die weitgehend sauerstofffreien Innenbereiche der Bodenaggregate eindringen und dort Nährstoffreserven erschließen können [19]. Da Kalium aus der Bodenlösung passiv aufgenommen wird [21], ist es plausibel, dass bei Versauerungsbedingt reduzierter Feinwurzeldichte auch die Kaliumaufnahme reduziert wird. Kaliummangel lähmt die Schließfunktion der Stomata, was zu einer erhöhten Transpirationsrate führt [20] und damit die Anfälligkeit der Bäume gegenüber Trocknisschäden erhöht.

Der Flächenbedarf für Kalkung bzw. Kalkung plus Kalium wurde in der EnNa-Studie abgeleitet, indem an den Traktecken der Bundeswaldinventur die derzeit negativen Elementbilanzen für Calcium und/oder Magnesium für Dolomitmalkungen – und wenn zusätzlich Kalium defizitär war, für Dolomit/Holz-asche-Applikation – aufsummiert wurden. Dabei wurden die bei $p=10\%$ signifikant negativen Bilanzen zugrunde gelegt (Tab. 2). Die Summen der BWI-Punkte mit Bilanzdefiziten wurden auf Anteile der bundesweiten Waldfläche hochgerechnet und es wurde anhand der Höhe der jährlichen Bilanzdefizite sowie der durchschnittlichen Calcium-, Magnesium- und Kaliumgehalte in den bei der Bodenschutzkalkung eingesetzten Materialien der jährliche Flächenbedarf berechnet [3]. Unter der Annahme, dass auf



Foto: K. v. Wilpert

Abb. 8: Ausbringung von angefeuchtetem Kalk per Helikopter.

allen Standorten, die bei $p=10\%$ signifikant negative Bilanzen für Calcium und/oder Magnesium bzw. zusätzlich für Kalium aufweisen, ein Bedarf für Kalkung und Nährelementrückführung besteht, kann man bundesweit einen Sanierungsbedarf auf 1,8 Mio. ha Waldfläche erwarten. Das bedeutet, dass jährlich auf ca. 123.600 ha Bodenschutzkalkungen bzw. Nährelementrückführungen notwendig wären, was auf der Basis der in Baden-Württemberg im Jahr 2019 angefallenen Kosten (Dolomit 253 €/ha, Dolomit/Holzasche-Gemisch 421 €/ha einschließlich Ausbringung)

Literaturhinweise:

[1] Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA) (2019): Anpassung der Wälder an den Klimawandel. 7 S. http://www.dvffa.de/system/files/files_site/Waldanpassung_Positionspapier%20des%20DVFFA_09_2019.pdf [2] HEISNER, U.; V. WILPERT, K. UND HILDEBRAND, E. E. (2003): Vergleich aktueller Messungen zum Aziditätsstatus südwestdeutscher Waldböden mit historischen Messungen von 1927. *Allg. Forst- u. Jgd.-Ztg.*, 174, 2/3, 41-44. [3] V. WILPERT, K.; AHREND, B.; WEIS, W.; VONDERACH, C.; PUHLMANN, H.; KÖHLER, D.; SUCKER, C.; KÄNDLER, G.; NAGEL, J. (2018): Standortsangepasste Nutzungsintensitäten und forstliche Handlungsoptionen. In *Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* (Hrsg.) *Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit – Abschlussbericht zum Projekt Energieholzern und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland (EnNa)*, Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 101, 325-373. [4] AHREND, B.; VONDERACH, C.; WEIS, W.; V. WILPERT, K. (2018): Unsicherheitsanalysen zur Nährstoffbilanzierung auf Umweltmessnetzen. In *Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* (Hrsg.) *Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit – Abschlussbericht zum Projekt Energieholzern und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland (EnNa)*, Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 101, 242-267. [5] MARSCHNER, H. (1991): Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant Soil*, 134, 1-20. [6] LEUBE, F. (2000): Leitfaden forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen. *Sächsische Landesanst., Graupa*. 58 S. [7] ROUT, G. R.; SAMANTARY, R. I.; DAS, P. (2001): Aluminium toxicity in plants: a review. *Agronomie*, 21, 3-21. [8] BRAUN, S.; SCHINDLER, C.; VOLZ, R.; FLÜCKIGER, W. (2003): Forest damages by the storm 'Lothar' in permanent observation plots in Switzerland: The significance of soil acidification and nitrogen deposition. *Water, Air, and Soil Pollution* 142: 327-340. [9] AMELUNG, W.; BLUME, H. P.; FLEIGE, H.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B. M. (2018): *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*, 17. Aufl. Springer Verlag, 750 S. [10] GRÜNEBERG, E.; V. WILPERT, K.; MEESBURG, H.; EVERS, J.; ZICHE, D.; ANDREAE, H.; WELLBROCK, N. (2017): Was nützt die Waldkalkung? *AFZ-DerWald*, Heft 2, 15-17. [11] JANSSEN, A.; SCHÄFFER, J.; V. WILPERT, K.

Bedarfsflächen für Kalkung und Kaliumrückführung

Tab. 2: Aus der EnNa-Studie abgeleitete bundesweite Bedarfsflächen für Kalkung und Kaliumrückführung [3]

	Signifikant negative Bilanzen	
	Bedarfsfläche [ha]	Fläche/Jahr [ha]
Dolomit	1.625.254	84.961
Dolomit/Holzasche	180.331	38.651
Summe	1.805.585	123.612

Kosten von ca. 38 Mio. €/Jahr verursachen würde. Der hier kalkulierte Umfang an Kalkungsflächen liegt ca. 40 % niedriger als anfangs der 1990er-Jahre und etwa

doppelt so hoch wie heute [22]. Wenn man die in der BZE genannten versauerungsempfindlichen Probenahmepunkte zugrunde legt, wären der Kalkungsbedarf und die Kosten etwa doppelt so hoch.

Fazit

Angesichts der ökologischen und umweltpolitischen Dringlichkeit der Bodenschutzkalkung auf den betreffenden Standorten erscheint dieser Aufwand als Investition in die Gesundheit unserer Wälder und ihrer Funktion für die Daseinsvorsorge realistisch und dringend erforderlich, insbesondere da diese Maßnahmen eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Stabilisierung der Wälder und ihren durch den Klimawandel notwendig gewordenen Umbau darstellen [23].



PD Dr. Klaus von Wilpert

Klaus.von-Wilpert@online.de,

ist ehemaliger Leiter der Abteilung Boden und Umwelt, der FVA Freiburg. **Dr. Peter Hartmann** leitet den Arbeitsbereich Walder-nährung und Stoffhaushalt, FVA Freiburg. **Dr. Heike Puhlmann** leitet die Abteilung Boden und Umwelt, FVA Freiburg. **Prof. Dr. Thorsten Gaertig**, Professur für Angewandte Bodenkunde und Stadtökologie, HAWK Göttingen. **Prof. Dr. Jürgen Schäffer**, Professur für Bodenkunde und Standortökologie, Hochschule Rottenburg.

Prof. Dr. Martin Thren, Arbeitsbereich Forstpolitik, Waldmesslehre und Waldbau, HAWK Göttingen.

REIF, A. (2016): Flächenbedeutung der Waldkalkung in Baden-Württemberg. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 15. urn:nbn:de:0041-afsv-01554, p 5-15. [12] SCHÄFFER, J.; GEISSEN, V.; HOCH, R.; V. WILPERT, K. (2001): Waldkalkung belebt Böden wieder. *Allg. Forst Zeitschr.*, 56, 21, 1106-1109. [13] V. WILPERT, K.; HARTMANN, P.; SCHÄFFER, J. (2013): Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung, FVA Merkblatt 54, 39 S. [14] SCHACK-KIRCHNER, H.; GAERTIG, T.; V. WILPERT, K.; HILDEBRAND, E. E. (2001): A modified McIntyre and Phillip approach to measure topsoil gas diffusivity in-situ. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 164, 253-258. [15] GAERTIG, T.; V. WILPERT, K.; SCHACK-KIRCHNER, H. (1999): Bodenbelüftung als Steuergröße des Feinwurzelwachstums in Eichenbeständen. *Allg. Forst- u. J. Ztg.*, 170, 5/6, 81-87. [16] WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H. (eds.) (2016): *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 - 2008*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 550 p, Thünen Rep., 43. [17] HARTMANN, P.; BUBERL, H.; PUHLMANN, H.; SCHÄFFER, J.; TREFF-MALCHER, G.; ZIRLEWAGEN, D.; V. WILPERT, K. (2016): *Waldböden Südwestdeutschlands - Ergebnisse der Bodenzustandserfassung im Wald von 1989-1992 und 2006-2008*. Verlag Kessel Remagen-Oberwinter. 328 pp. [18] HILDEBRAND, E. E. (1994): The Heterogeneous Distribution of Mobile Ions in the Rhizosphere of Acid Forest Soils: Facts, Causes, and Consequences. *J. Environ. Sci. Health A29(9)*, 1973-1992. [19] SCHACK-KIRCHNER, H.; V. WILPERT, K.; HILDEBRAND, E. E. (2000): The spatial distribution of soil hyphae in structured spruce-forest soils. *Plant and Soil*, 224, 195-205. [20] MENGEL, K. (1991): *Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze*. Fischer Verlag, Jena, 466 S. [21] FINCK, A. (2007): *Pflanzenernährung in Stichworten*. 6. Aufl. Borntraeger Verlag. 257 S. [22] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, BMEL (2018): *Nachhaltige Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern Abschlussbericht des vom BMEL geförderten Modellvorhabens, 187 S., www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Wald-Fischerei/Bericht_Modellvorhaben_Naehrstoffversorgung_Waelder.pdf?__blob=publicationFile*. [23] CAESAR, C. J. (2020): mündliche Mitteilung, Statement im Rahmen der Podiumsdiskussion „Wald bewegt“ auf der Grünen Woche in Berlin.



Ökologische Bedeutung DER BODENREAKTION

Niedrige pH-Werte ($< \text{pH } 4,2$)

- » **ungünstiges** Bodengefüge
- » **ungünstige** Humusformen (Rohhumus)
- » **Oberbodenverdichtung** durch verringerte Bioturbation
- » **Beeinträchtigung** der Stofftransformationsfunktion von Böden

- » **Zerstörung** von Tonmineralen
- » **Toxizität** durch Al^{3+} -Ionen (Wurzelschäden)
- » **zunehmende Mobilität** von Schwermetallen (Cu, Zn, Cd, Pb)
- » **Gefahr** der Quell- und Grundwasserkontamination
- » **evtl. Einschränkung** der Biodiversität

Waldkalkung für vitale Wälder

Wer kümmert sich darum?
Der Bedarf ist groß – jetzt handeln.

www.waldkalkung.com

