Dies ist ein Auszug aus dem Merkblatt 54/2013 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt 54/2013 zur Regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung

www.fva-bw.de/publikationen/merkblatt/mb_54.pdf

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Merkblatt 54/2013

Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung

ForstBW

Baden-Württemberg

Bodenschutzkalkung schützt den Wald und regeneriert Bodenfunktionen

Klaus von Wilpert, Peter Hartmann[1] und Heike Puhlmann[1]

1 Warum sind Waldböden so sauer?

Hauptursache für die Schädigung von Wäldern und ihren Funktionen waren und sind Einträge von Säuren und Stickstoff mit dem Regen. Diese sind die Ursache einer Bodenversauerung, die in den vergangenen Jahrzehnten zu einer Erhöhung der Säurestärke in nicht kalkhaltigen Böden um durchschnittlich den Faktor 100 bis 250 geführt hat.

Saurer Regen hat den Zustand der Waldböden nachhaltig beeinflusst. Auf seinem Weg durch den Boden wurden Nährstoffe ausgewaschen und ein für viele Bodenlebewesen zu saures Milieu hinterlassen. Als Folge sind viele Waldböden in ihrer Funktion als Pflanzenstandort, Lebensraum und Filter für Trinkwasser gefährdet. Durch ein angepasstes und schonendes Kalkungskonzept kann ein nachhaltig stabiler und naturnaher Bodenzustand wieder hergestellt bzw. erhalten werden.

Durch die Arbeit des Forstwissenschaftlers FRANK (1927) „Über Bodenazidität im Walde“ können wir einen direkten Vergleich frühindustrieller Bodenversauerung mit heutigen Versauerungsintensitäten durchführen (Abbildung 1). Dies basiert auf pH-Messungen an ca. 2500 Bodenproben aus dem Schwarzwald und Odenwald.

Die Abbildung zeigt, dass die pH-Werte, unabhängig vom geologischen Untergrund und der daraus entstandenen Böden, in der für Bodenbildung extrem kurzen Zeit von 65 Jahren in dem engen pH-Bereich zwischen 3 und 4 - weit unterhalb der pH-Grenze der für Bodenstruktur und Bodenbelüftung so wichtigen tiefgrabenden Regenwurmarten - nivelliert wurden. Die pH-Absenkung betrug auf Buntsandstein, Gneis und Moränenlehm durchschnittlich 1 - 2,5 pH-Stufen. Lediglich die podsolierten, natürlich sauren Oberböden auf Granit sind weniger versauert.

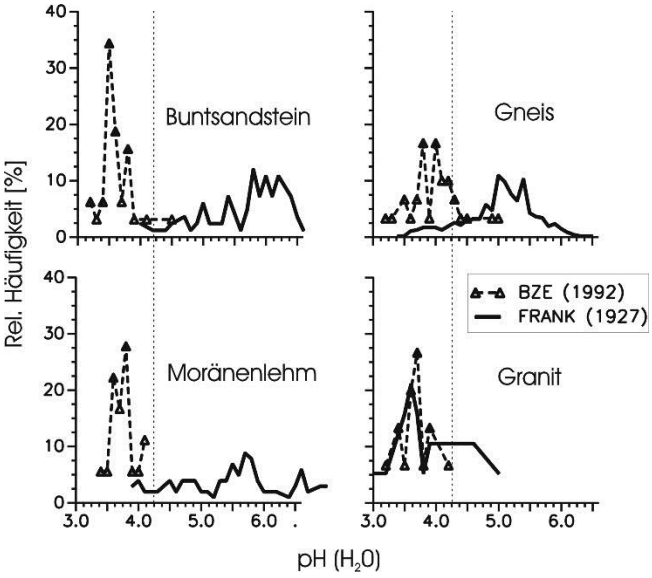

Abbildung 1: Verschiebung der Häufigkeitsverteilungen der pH (H_2O)-Werte im obersten Mineralboden (0-5cm) auf Buntsandstein (links oben), Gneis (rechts oben), Moränenlehm (links unten) und Granit (rechts unten) zwischen den Jahren 1927 und 1992 (FRANK, 1927, BUBERL et al., 1994). Gestrichelte Referenzlinie = untere pH-Grenze des Vorkommens endogäischer Regenwurmarten.

[1] Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Boden und Umwelt

Das bedeutet, dass die chemische Diversität der Waldböden innerhalb von 65 Jahren durch „Sauren Regen“ in allen nicht kalkhaltigen Böden massiv abgenommen hat. Dies betrifft ihre Eignung als Wurzelraum für Wälder und als Grundlage für deren stabile Ernährung mit Wasser und Nährstoffen, aber auch die Filter- und Pufferleistung der Böden für wassergefährdende Stoffe wie Nitrat, organische Säuren oder toxische Metalle. Besondere Bedeutung hat dies auch für die Trinkwasservorsorge, da die qualitativ wertvollsten Trinkwasservorräte in Waldgebieten liegen.

Als Erfolg der Luftreinhaltepolitik konnten in den vergangenen Jahren Säureeinträge soweit reduziert werden, dass die Bodenversauerung nur noch sehr langsam verläuft. Tatsächlich verbleibt jedoch durch die Bodenversauerung eine depositionsbedingte Altlast, die Wälder nach wie vor belastet. Es besteht weiterhin ein Sanierungsbedarf, um die Funktionen der Waldböden zu regenerieren.

2 Wirkung der Bodenschutzkalkung

In zahlreichen Untersuchungen konnten die Wirkungen der Waldkalkung auf den Waldboden identifiziert werden. Neben chemischen Aspekten sind die Humusstruktur, die Feinwurzelverteilung sowie die Ernährungssituation der Bestände untersucht worden.

2.1 Kalkung bringt den Stoffkreislauf ins Gleichgewicht

Durch die regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung soll eine grundsätzliche Umstimmung des Bodenchemismus eine Stabilisierung der Speicherung von Pflanzennährstoffen und gleichzeitig eine Aktivierung der Bodenbiologie erreicht werden. Im Vergleich zwischen Bodenaufnahmen von 1992 und 2007 stiegen die pH-Werte auf gekalkten Flächen in den letzten 15 Jahren bis in eine Tiefe von 30 cm mit 0,2-0,3 pH-Werten signifikant deutlicher an als im Rest des Landes. Dabei ist der Anstieg aber immer noch sehr moderat, eine „Schockwirkung“ geht hiervon nicht aus.

Ziel der Kalkung ist jedoch nicht nur die Wiederannäherung an den standortstypischen, natürlichen pH-Wert. Vielmehr sollen die pflanzenschädlichen, durch Bodenversauerung und Auflösung von Tonmineralen entstandenen Aluminiumionen von den Bodenaustauschern verdrängt und durch puffernde basische Ionen (Kalzium und Magnesium) ersetzt werden. Die im Boden pflanzenverfügbar gespeicherte Basenmenge ist auf den gekalkten Flächen bis in 30cm Bodentiefe hochsignifikant erhöht. Auf den restlichen Flächen hält immer noch die Auswaschung der Basen an.

Außerdem soll der Kohlenstoffvorrat in biologisch wenig aktiven Humusauflagen mobilisiert und in stabileren Mineralbodenhumus umgewandelt werden (Abbildung 2). Dabei ist Kohlenstoff die wesentliche Energiequelle für Bodenorganismen.

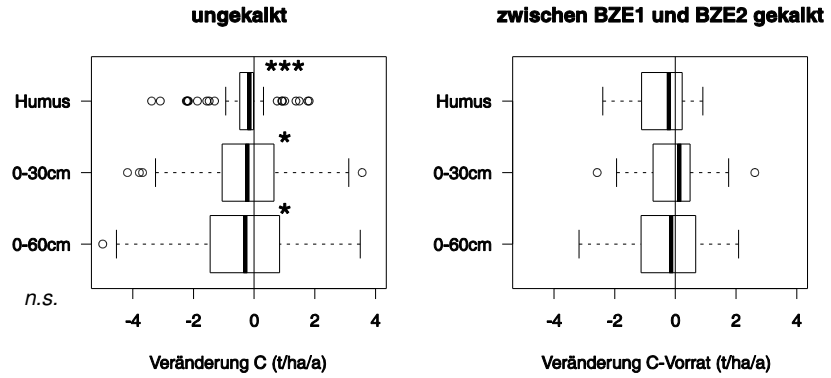

*Abbildung 2: Jährliche Veränderungsrate des Kohlenstoffvorrats zwischen BZE 1 (1992) und BZE 2 (2007) auf ungekalkten und gekalkten Böden in Baden-Württemberg. Signifikanz der Trends: *** hochsignifikant, ** signifikant, * schwach signifikant, nicht signifikant.*

Insbesondere Regenwürmer sind an der Aggregatneubildung und Porenbildung beteiligt und verbessern so Bodenbelüftung und Wurzelraumerschließung. Die Kalkung bewirkt in Baden-Württemberg tendenziell einen Abbau der Humusauflage und eine Verlagerung organischer Substanz in den mineralischen Oberboden wie für die zwischen 1992 und 2007 gekalkten Böden bis in 30 cm Tiefe beobachtet wurde. Diese Tendenzen sind für die gekalkten Standorte nicht signifikant; dagegen ist die durchgängige Abnahme des C-Vorrats in Humusauflage und Mineralboden auf den ungekalkten Böden signifikant.

Die Verbesserung des bodenchemischen Milieus durch Bodenschutzkalkung führt zu einer Steigerung der mikrobiellen Aktivität und zu einer Förderung leistungsfähiger Zersetzergemeinschaften. Abbildung 3 zeigt im Vergleich zwei Humusprofile einer Kalkungsversuchsfläche im Alpenvorland (Ochsenhausen). Auf der unbehandelten Nullfläche (links) liegt die weitgehend unbelebte Humusschicht mit scharfer Grenze auf dem Mineralboden auf. In der mit 10 t/ha Dolomit behandelten Fläche (rechts) sind die Schichten der Humusauflage durch Bioturbation vermischt und weisen das typische Krümelgefüge von Regenwurmlosung auf.

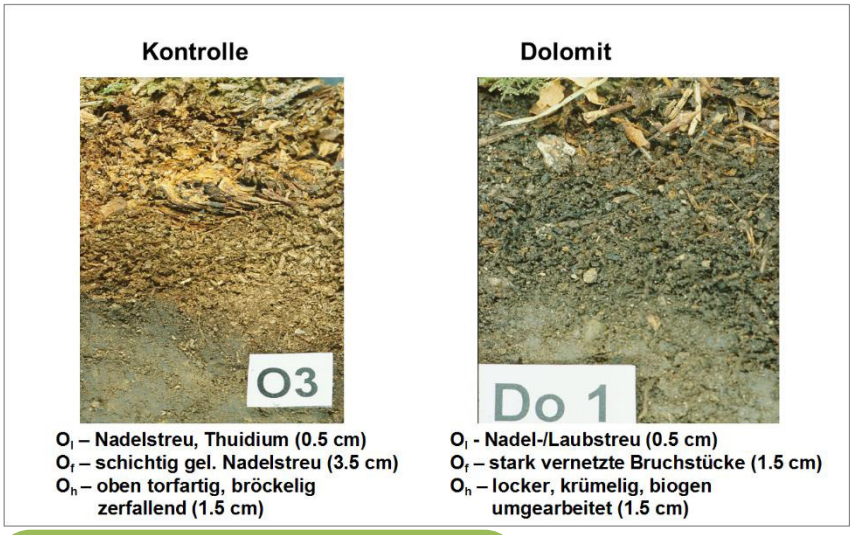

Abbildung 3: Humusprofile der Kalkungsversuchsfläche in Ochsenhausen: Nullfläche (links) und mit Dolomit (10 t/ha) behandelte Fläche (rechts).

Durch Kalkung wird die mikrobielle Aktivität in der Humusauflage gesteigert und die Humusumsetzung beschleunigt. Mithilfe von im weniger sauren Milieu wieder aktiven Regenwürmern bilden sich fruchtbarere Humusformen heraus. Der Kohlenstoffvorrat aus der Humusauflage wird in den oberen Mineralboden eingearbeitet und dort stabiler gespeichert. Dadurch wird der Mineralboden porenreicher, was letztendlich zu besserer Belüftung und Durchwurzelung führt.

2.2 Kalkung belebt Waldböden wieder

Die Veränderung der Humusform kann ursächlich auf die Zunahme von Regenwürmern zurückgeführt werden (Abbildung 4). Unter pH-Werten von 4 sind Regenwürmer i.d.R. nicht mehr überlebensfähig. Nur auf den mit basenhaltigen Substanzen (Dolomit, Holzasche) behandelten Versuchsflächen in Ochsenhausen ist ein deutlicher und statistisch gesicherter Anstieg der Regenwurmzahlen festzustellen. Auf der unbehandelten Nullfläche liegt die Individuenzahl bei rund fünf Exemplaren pro Quadratmeter, auf den mit Dolomit und Holzasche behandelten Flächen leben 6-8 mal mehr Regenwürmer.

Infolge des verbesserten bodenchemischen Zustandes und der höheren Aktivität strukturbildender Organismen im Waldboden wird ein lockerer Lagerungszustand erreicht. Dadurch wird die Belüftung des Bodenkörpers verbessert und die Durchwurzelung nimmt zu. Eine tiefergreifende Durchwurze-

lung erhöht die ökosystemare Stabilität, da Wasser- und Nährstoffvorräte des Waldbodens besser erschlossen werden können.

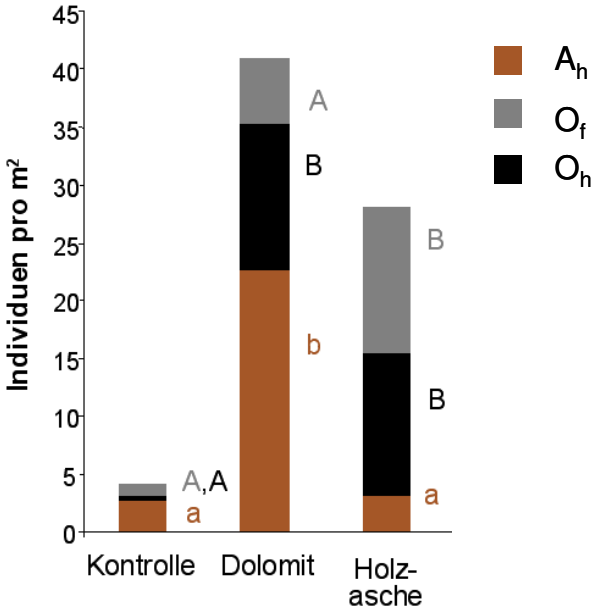

Abbildung 4: Regenwurmbesatz in der Auflage und im oberen Mineralboden beim Kalkungsversuch Ochsenhausen, 6 Jahre nach der Behandlung. Verschiedene Buchstaben bedeuten statistisch gesicherte Unterschiede.

Ein mit 9,2 t/ha hoch dosierter Kalkungsversuch von 1952 (Abbildung 5) zeigt auf der Kalkparzelle bis in eine Bodentiefe von ca. 30 bis 40 cm signifikant erhöhte Wurzeldichten.

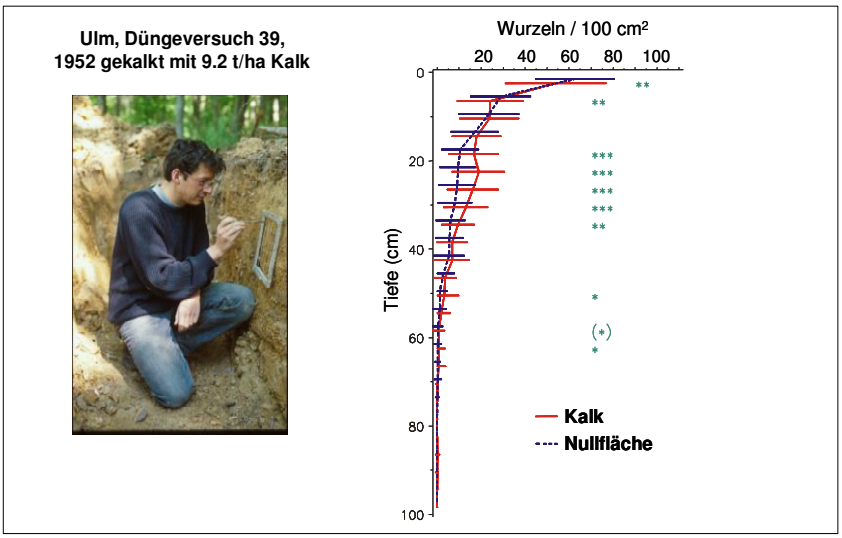

Abbildung 5: Datenermittlung im Zählquadrat (links). Statistischer Vergleich der Durchwurzelung von behandelter und unbehandelter Fläche (rechts).

2.3 Kalkung stabilisiert Waldernährung

Die Ernährungssituation der Bäume mit Kalzium und Magnesium hat sich in den letzten Jahrzehnten durch die Kalkung deutlich verbessert. Auch die Phosphorversorgung hat sich verbessert, was mit einer intensiveren Durchwurzelung nach Kalkung erklärt werden kann. Dahingegen hat sich die

Die Ernährung der Bäume mit Kalzium und Magnesium und auch die Phosphorversorgung wurden durch die Kalkung verbessert.
Dahingegen ist Kalium zunehmend zum Mangelelement geworden. Die Beimischung von qualitätsgeprüfter Holzasche bei der Bodenschutzkalkung ist bei nachgewiesenem Kaliummangel ein ökosystemkonformes Gegenmittel, das auch den Gedanken der Kreislaufwirtschaft aufgreift.

Versorgung mit Kalium in Baden-Württemberg seit Anfang der 1980er Jahre massiv verschlechtert. Dieser Abnahmetrend ist eine ernstzunehmende Bedrohung für die Stabilität der Wälder geworden, da mittlerweile der überwiegende Teil der gemessenen Werte in Fichten- und Tannenbeständen im Bereich schwacher bis mangelhafter Versorgung liegt. Buchenbestände sind mit Kalium noch überwiegend gut versorgt. Kalium spielt eine bedeutende Rolle in der Steuerung des Wasserhaushalts der Bäume und damit für die Empfindlichkeit der Wälder für vermehrten Trockenstress. Da Kalium im Dolomitkalk nicht enthalten ist, muss es in einer geeigneten, ökosystemverträglichen Form beigemischt werden um diesem neuen Umweltproblem entgegenzuwirken. Eine ideale und ökosystemverträgliche Verabreichungsform ist die Beimischung von 30% Holzasche zum Dolomitkalk. Holzasche wirkt durch ihre geringe Löslichkeit ähnlich langsam und mild wie Dolomitkalk. Weniger ökosystemverträglich wäre die Beimischung von Kaliumsulfat, weil dieses sehr viel löslicher ist und durch den Sulfatanteil versauernd wirkt. Die bisher übliche und akzeptierte Beimischung von Kaliumsulfat ist in dieser Hinsicht problematisch.

2.4 Trinkwasservorsorge durch Kalkung

Am Beispiel zweier Teileinzugsgebiete der Trinkwassertalsperre Kleine Kinzig im Buntsandstein-Schwarzwald konnte gezeigt werden, dass die Waldkalkung auch die Grundwasser- und Oberflächenwasserqualität verbessert. Im Bachwasser der beiden untersuchten Einzugsgebiete wurden erhebliche Unterschiede in deren chemischer Qualität beobachtet, die auch zeitlich direkt mit den dort durchgeführten Bodenschutzkalkungen in Verbindung gebracht werden konnten. Im Huttenbächle, dessen Einzugsgebiet intensiver gekalkt ist, wurden am Gebietsauslass höhere Kalzium- und Magnesium-Konzentrationen gemessen. Der pH-Wert (Abbildung 6 links) im Huttenbächle ist entlang des Bachlaufes stabil, er schwankt am Unterlauf zwischen 6,2 und 6,8 und am Oberlauf zwischen 6 und 6,5.

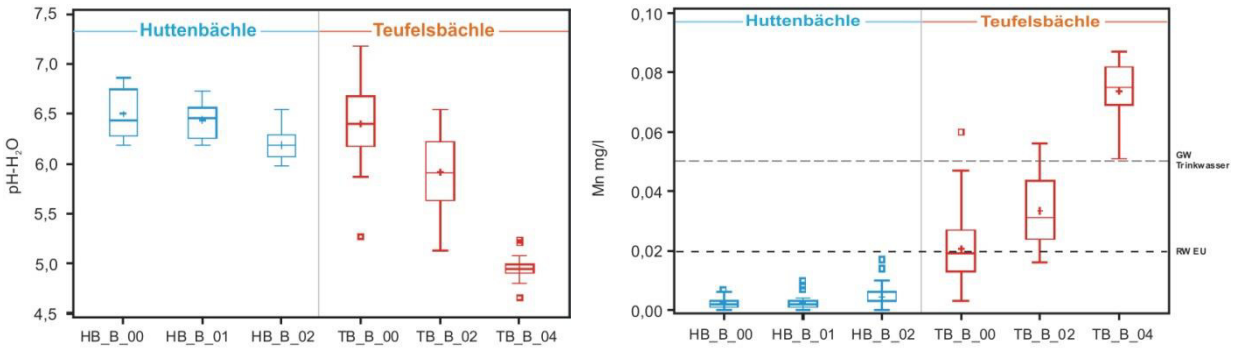

Abbildung 6: Entwicklung von pH-Wert (links) und Mangankonzentration (rechts) entlang der Bachläufe Huttenbächle und Teufelsbächle (Nummerierung aufsteigend vom Unterlauf zum Oberlauf).

Am Unterlauf des wenig gekalkten Teufelsbächle liegt der Mittelwert des pH-Wertes bei 6,4. Dies ist noch relativ hoch und kein Indikator für eine nachhaltige Gewässerversauerung. Allerdings sinkt der pH-Wert in Situationen mit Spitzenabflüssen deutlich unter 6 und die Schwankungen sind deutlich

höher. Der Oberlauf des Teufelsbächle ist dagegen stark versauert – die pH-Werte schwanken zwischen 4,7 und 5,2. Die beiden Gewässer Huttenbächle und Teufelsbächle unterscheiden sich zudem deutlich in ihren Gehalten an Aluminium und Mangan (Abbidung 6 rechts), beides Reaktionsprodukte aus der Bodenversauerung.

Diese beiden Elemente sind von hoher praktischer Bedeutung für die Wasserqualität. Aluminium ist zwar auf technischem Weg bei der Trinkwasseraufbereitung vergleichsweise leicht aus dem Wasser zu entfernen, schädigt aber aquatische Lebensgemeinschaften und löst Artenverarmung bis zu Fischsterben aus. Mangan behindert durch Trübungen die technische Entkeimung bei der Trinkwasseraufbereitung. Die Mangan-Konzentrationen im Huttenbächle liegen entlang des gesamten Bachlaufes deutlich unter dem Trinkwassergrenzwert von 0,05 mg/l und dem strengeren EU-Richtwert von 0,02 mg/l. Beim Teufelsbächle dagegen liegen sämtliche gemessenen Werte am Oberlauf über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung.

3 Nutzen und Risiken der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung

Durch das Programm der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung soll die natürliche Vielfalt bodenchemischer Standortseigenschaften in ihrer natürlichen Diversität wiederhergestellt werden. Es wird die Pufferfunktion des Bodens in Bezug auf Säureeinträge erhalten bzw. regeneriert. Durch eine leichte Anhebung des pH-Wertes werden die Lebensbedingungen für Bodenorganismen verbessert, was die biologische Stickstoffspeicherung im Boden unterstützt. Durch Verwendung von Dolomit bei der Waldkalkung wird neben der pH-Erhöhung und Stabilisierung der austauschbaren Basenvorräte eine Verbesserung der Magnesiumernährung erreicht. Durch Beimischung von 30 % Holzasche wird die Kalium- und Phosphorernährung der Waldbestände unterstützt.

Durch die Anhebung der Bodenreaktion an der biologisch besonders aktiven Bodenoberfläche (Auflagehumus und A_h-Horizont) wird jedoch auch 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. Auf Bundesebene konnte nachgewiesen werden, dass Kalkung auch auf die Artenzusammensetzung in der Bodenvegetation wirkt. In Fichtenforsten und in Hainsimsen-Buchenwäldern auf bodensauren Festgesteinen wiesen gekalkte Flächen jeweils höhere Artenzahlen auf als nicht gekalkte Flächen – ein durchaus gewollter Effekt. Die Untersuchung der Bodenvegetation auf gekalkten und ungekalkten Böden in Baden-Württemberg hat ergeben, dass der Stickstoffzeigerwert der Vegetation durch Kalkung als Folge eines erhöhten Umsatzes organischer Substanz tendenziell erhöht wird, was aber i.d.R. nicht statistisch signifikant ist und vorwiegend bei hoher Stickstoffverfügbarkeit auftritt. Damit ist zu erwarten, dass mit moderater Dosierung der Kalkunksmaßnahmen eine „Ruderalisierung“ der waldtypischen Bodenvegetation durch Kalkung weitgehend vermieden werden kann.

4 Herleitung des Kalkungsbedarfs zur Regeneration des natürlichen Bodenzustandes am Beispiel Baden-Württemberg

Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung bedeutet, dass das Ziel nicht in erster Linie die Neutralisation aktueller Säureeinträge, sondern die Wiederannäherung der Bodenreaktion (pH-Wert) sowie der Basen- und Nährstoffausstattung der Böden an die natürlichen Bodenverhältnisse ist. Grundlage für die Ableitung eines solchen, an der natürlichen Basenausstattung von Waldstandorten orientierten Kalkungskonzeptes ist die Definition eines Sollzustandes.

Dieser wurde aus den Daten der Bodenzustandserhebung (kurz BZE) als „Entfernung“ des Bodens vom natürlichen Versauerungszustand in Richtung höherer Azidität bestimmt und daraus der für die Regeneration der natürlichen stofflichen Ausstattung der Böden notwendige Kalkungsbedarf abgeleitet. Diese Ableitung geht von der Tatsache aus, dass der Vorrat an austauschbarem Aluminium im Unterboden (60-90 cm) als die kumulierte Wirkung anthropogen bedingter Bodenversauerung aufgefasst und als Indikatorgröße für eine Abschätzung der für die Regeneration der Böden notwendigen Kalkmenge verwendet werden kann.

Hauptziel der Kalkung ist die Regeneration der natürlichen, vorindustriellen Bodeneigenschaften.
Als Indikator für die Abweichung vom natürlichen Bodenzustand wird der Vorrat an Aluminium im Unterboden genutzt. Dies entsteht durch die Auflösung von Tonmineralen bei starker Bodenversauerung. Als Kalkungsbedarf gilt diejenige Menge an Kalk, die diesem Aluminiumvorrat entspricht. Damit wird eine den individuellen Standorten angepasste Kalkungsmenge gewährleistet, die regional sehr differenziert ausfällt.

In Abbildung 7 ist für das Land Baden-Württemberg die dem Unterboden–Aluminiumvorrat entsprechende Anzahl an praxisüblichen Kalkungskampagnen mit 3 Tonnen Dolomit je Hektar dargestellt, die im 10-jährigen Abstand durchgeführt werden sollen, um das Basendefizit auszugleichen. Die Darstellung zeigt, dass die räumlichen Schwerpunkte des Regenerationsbedarfs in den Arealen mit Lehmböden in den Vorbergzonen von Schwarzwald, Odenwald und Schwäbischer Alb, sowie in Hohenlohe, Schwäbisch-Fränkischem Wald und dem nördlichen Alpenvorland liegen, während die „traditionellen Problemareale“ in den Hochlagen des Schwarzwalds eher einen moderaten Kalkungsbedarf aufweisen. Dies liegt daran, dass die Lehme, unsere wertvollsten und leistungsfähigsten Böden, die höchste Speicherkapazität aufweisen und damit auch die größte Säuremenge gespeichert haben. Ein wichtiger Nebeneffekt dieses Befundes ist, dass natürlicherweise oberbodenversauerte Standorte im Hochschwarzwald einen geringen bis teilweise keinen regenerationsorientierten Kalkungsbedarf aufweisen. Da diese Standorte gleichzeitig von besonderer Relevanz für den Naturschutz sind, wird der potentielle Konfliktbereich zwischen den berechtigten Belangen von Boden- und Naturschutz entschärft.

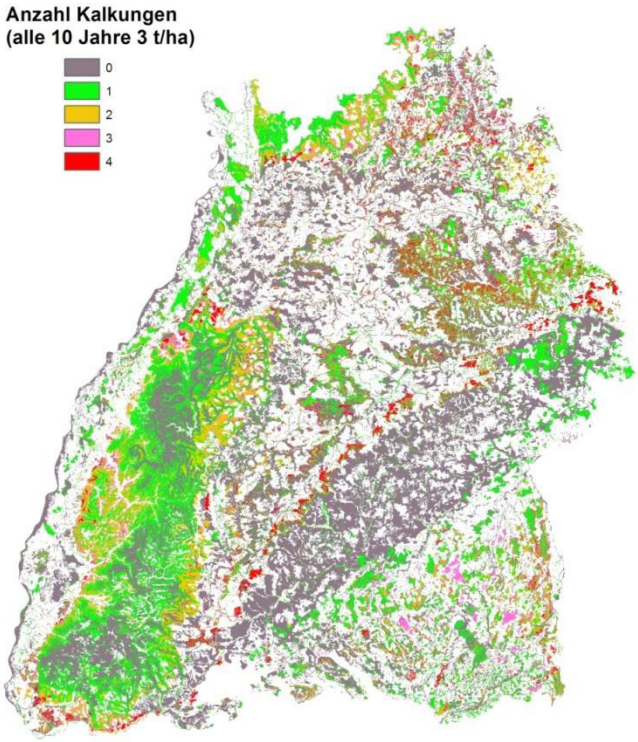

Abbildung 7: Langfristiges Konzept der Bodenschutzkalkung in Baden-Württemberg: die Anzahl der benötigten Kalkungen für eine Regeneration der Waldböden (je 3 t/ha im 10-jährigen Abstand) wird aus dem austauschbaren Al-Vorrat im Unterboden (60-90 cm) als Maß anthropogen bedingter Bodenversauerung abgeleitet.

Zusammenfassend konkretisiert das Programm der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung einen stark standortsdifferenzierten Kalkungsbedarf mit klarem Zeithorizont. Nachdem die Säurebelastung zurückgegangen ist, soll damit die Chance genutzt werden, die Vielfalt unserer Waldböden in absehbarer Zeit wiederherzustellen. Mit der Durchführung dieses mittelfristigen Kalkungsprogramms kann das Risikopotential gegenüber neuen Stressbelastungen wie zum Beispiel dem Klimawandel abgemildert werden. Bei einem naturnahen bodenchemischen Zustand reicht der Hauptwurzelraum in signifikant tiefere Bodenschichten, was Bäumen mehr Stabilität verleiht und das Risiko für Trockenstress und seine Folgewirkungen vermindert.

5 Fazit

Zentrale Grundlage der Nachhaltigkeit in der Waldbewirtschaftung ist die langfristige Erhaltung der Bodenqualität einschließlich der Filter- und Pufferfunktionen des Waldbodens im Sinne eines vorsorgenden Bodenschutzes. Die Waldbewirtschaftung muss daher in besonderem Maße darauf ausgerichtet sein, stabile Waldökosysteme zu erhalten.

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. Die Risiken sind gering und durch niedrige Dosierung (3-4 t/ha) und die geringe Löslichkeit des eingesetzten Dolomitkalks beherrschbar.
Die natürlichen Bodenfunktionen und Lebensgemeinschaften sind gleichrangige Schutzgüter.

Dies kann nicht mehr alleine durch Waldumbau erfolgen. Als Voraussetzung für die Etablierung standortsangepasster Mischwälder müssen die im Boden gespeicherten Säuremengen aus früheren Depositionen durch Bodenschutzkalkung abgebaut werden. Dadurch wird ein naturnaher Versauerungszustand und Nährelementhaushalt der Waldböden wiederhergestellt, und die natürliche Vielfalt der Standortsbedingungen wieder angenähert. Im Zusammenwirken zwischen Waldkalkung und dem vermehrten Anbau tiefwurzelnder, standortsgemäßer Baumarten wird eine Stabilisierung und Vertiefung des Nährelementkreislaufes im Mineralboden und eine biologische Aktivierung des Mineralbodens erreicht.

Die Risiken der Waldkalkung (kurzfristige Verflachung des Feinwurzelsystems, Nitratschub durch erhöhten Abbau organischer Substanz) sind zeitlich begrenzt und mit Hilfe moderater Kalkdosierung minimierbar.

Bodenschutz und Naturschutz vertreten gleichermaßen berechtigte Vorsorgeaspekte. Diese müssen anhand objektiver Kriterien gegeneinander abgewogen werden. Mögliche Konflikte werden dadurch vermieden, dass sensitive Naturschutzflächen bei der Bodenschutzkalkung konsequent ausgespart werden – obwohl auch dort eine dem jeweiligen Naturraum entsprechende Bodendiversität die stabilste und natürlichste Voraussetzung für Biodiversität wäre.

Naturschutz und Bodenschutz sind keine Gegensätze, sondern ergänzen und bedingen sich gegenseitig.