

Ressourcenschonende Bewirtschaftung bewaldeter Wassereinzugsgebiete und Wasserschutzgebiete

1	Einleitung	1
2	Gesunder Waldboden – Sauberes Grundwasser	2
3	Kalkung	6
	Fallbeispiel Kleine Kinzig	7
	Fallbeispiel Stimpfach	13
	Kalkungsbedarf in Baden-Württemberg	16
4	Waldbauliche Steuerung des Stoffhaushalts	18
	Fallbeispiel Conventwald	18
	Einfluss der Hiebsform	21
5	Zusammenfassung	28

1 Einleitung

Anthropogene Stoffeinträge führen zu einer Versauerung der Waldböden, die zunehmend die Qualität des Grund- und Oberflächenwassers und damit auch die Qualität des Trinkwassers gefährdet. Das Erkennen dieser Störungen und das zeitnahe Einleiten von Gegenmaßnahmen ist heute wichtiger denn je, damit der durch die Bodenversauerung verursachte Funktionsverlust der Waldböden aufgehalten werden kann. Ein Gegensteuern und eine Verhinderung der weiteren Verschlechterung der Gewässerqualität fordert auch die Wasserrahmenrichtlinie der EU (EU-WRRL). Ziel ist es bis zum Jahr 2015 einen guten ökologischen und chemischen Zustand aller Gewässer bzw. einen guten mengenmäßigen und chemischen Zustand des Grundwassers herzustellen oder zu erhalten. Damit wird an waldbauliche Behandlungsstrategien, neben der Optimierung von Holzwachstum und Sortenvielfalt, die Anforderung gestellt, den Stoffhaushalt von Waldökosystemen auch unter den heutigen Umweltbedingungen möglichst geschlossen zu halten. Die im Folgenden vorgestellten Ökosystemstudien zeigen, wie sich verschiedene Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Funktionalität des Waldbodens und somit auf das Grundwasser auswirken können. Ziel dieses Merkblattes ist es, den Spielraum zur Verbesserung der „Wasserdienstleistung“ aufzuzeigen, den Waldbewirtschaftung unter heutigen Umweltbedingungen noch hat.

2 Gesunder Waldboden – Sauberes Grundwasser

In den vergangenen 20 Jahren wurde eine deutliche Reduktion der Schwefeleinträge durch technische Maßnahmen an der Filterung erreicht. Langjährige Stoffhaushaltsmessungen in Wäldern lassen jedoch in weiten Landesbereichen unverändert hohe Säure- und Stickstoffeinträge erkennen, die auf kalkfreien Böden über den kritischen Belastungen liegen, welche von Waldböden gepuffert oder zurückgehalten werden können. Stoffflussmessungen zeigen hohe Nettoausträge an basischen Kationen aus Waldböden, welche einer Bodenversauerung und zu einer zunehmenden Einschränkung von Ausgleichs- und Pufferfunktionen führen. Anhand des Vergleichs zwischen früheren bodenchemischen Messungen und deren heutiger Ausprägung ergibt sich, dass die Versauerungsprozesse in den vergangenen Jahrzehnten mit einer sehr hohen Geschwindigkeit abgelaufen sind.

Bei der Anfang der 90er Jahre durchgeführten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) Baden-Württembergs wurde der Entbasungszustand anhand des Summenparameters „Basensättigung“ (Summe der im Boden austauschbar gespeicherten basischen Kationen) erfasst. Es wurde deutlich, dass innerhalb des Hauptwurzelaumes auf allen kalkfreien oder silikatischen Substraten der Anteil an austauschbar gespeicherten Basen großflächig niedriger als 10 % der Austauschbelegung ist. Auch unterhalb des Hauptwurzelaumes ist in den Wachstumsgebieten Schwarzwald und Odenwald die Entbasung großflächig so weit fortgeschritten, dass ähnlich niedrige Basensättigungen vorliegen. Das bedeutet, dass hier eine akute Gefährdung des Bodens und somit der Bestandesernährung besteht, da Säureeinträge nicht oder kaum mehr im Boden gepuffert werden. Dies wiederum wirkt sich auf die Qualität des Bodensicker- und Grundwassers aus.

Risiken für Boden und Bestandesernährung

Bei hohen Säurestärken werden Silikate, vor allem Tonminerale, zunehmend instabil und aufgelöst. Außerdem werden Austauscheroberflächen von Tonmineralen durch Einlagerung von Aluminiumhydroxiden blockiert. Diese Prozesse führen zu einer Auswaschung von basischen Elementen wie Magnesium, Kalzium und auch Kalium. Da diese Elemente das Puffervermögen der Böden 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.

Die Wirkung von ionarem Aluminium und die Verknappung von pflanzenverfügbarem Kalzium, Magnesium und Kalium führen dazu, dass sich die Lebensbedingungen für Pflanzenwurzeln im Mineralboden verschlechtern. Infolgedessen wird der Wurzelraum und der Nährstoffkreislauf auf die obersten Bodenhorizonte, im Extremfall sogar auf die organische Auflage, reduziert. Die Wasser- und Nährstoffspeicherungspotentiale des Mineralbodens werden dadurch zunehmend ausgeblendet und die Versorgung der Bestände ist verstärkt witterungsabhängigen Risiken unterworfen (z.B. Kaliummangel in Trockenphasen).

Bodenversauerung und Entbasung wirken sich zudem auf die Eignung der Waldböden als Lebensraum für Bodenmikroorganismen aus. Durch ihre strukturbildende und strukturstabilisierende Wirkung, aber auch durch ihre Bedeutung für die stabile Speicherung von Stickstoff, bestimmen Bodenmikroorganismen wesentlich die ökologischen Eigenschaften von Waldböden. 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 Folgen sind eine Verschlechterung der

Bodenstruktur, der Bodenbelüftung und der Speicherkapazität für Stickstoff.

Risiken für das Grundwasser und die Trinkwasserversorgung

Wälder sind Garanten für sauberes Oberflächen- und Grundwasser. Nicht umsonst befinden sich in Deutschland über 2/3 der Trinkwasser-einzugsgebiete in Wäldern (KRENTZKE 2000). Die in der Regel hohe Trinkwasserqualität aus Wäldern ist jedoch zunehmend in Gefahr, da sich der in den Waldböden beobachtete Versauerungstrend inzwischen auch in den Gewässern niederschlägt. Insbesondere Stickstoffeinträge aus der Luft führen über Nitratausträge ins Grundwasser zu weit reichenden Versauerungs- und Eutrophierungsprozessen. Je tiefer eine vom Oberboden ausgehende Versauerung in den Unterboden fortschreitet, desto wahrscheinlicher ist, dass versauerungsbedingte Lösungs- und Reaktionsprodukte in das Grundwasser gelangen. Im mittleren und südlichen Schwarzwald beispielsweise sind bereits eine Vielzahl von Vorflutern in ihrem Oberlauf „stark bis sehr stark sauer“ (LANDESANSTALT F. UMWELTSCHUTZ 1992).

Bei fortschreitender Versauerung wird ionares Aluminium in tiefere Bodenschichten verlagert und schließlich in das Gewässer ausgewaschen. Dort kann es fischtoxisch wirken und ein Gesundheitsrisiko im Trinkwasser darstellen. Die chemische Zusammensetzung von Oberflächengewässern bestimmt darüber hinaus deren Eignung als Lebensraum für vielfältige aquatische Lebensgemeinschaften (BRAUCKMAN 1995).

Hydrochemische Entwicklungen in bewaldeten Wassereinzugsgebieten üben somit einen starken Einfluss auf eine langfristige Gewässer- und Trinkwasserversorgung aus. Bei der Aufbereitung von Grund- bzw. Oberflächenwasser zu Trinkwasser müssen die vorgeschriebenen gesetzlichen Qualitätskriterien eingehalten und Belastungen eliminiert werden. Eine stärkere Belastung des Rohwassers bedeutet aber immer einen erhöhten Aufwand bei der Trinkwasseraufbereitung. Schwierigkeiten bereiten dabei vor allem Nitrat, gelöste organische Kohlenstoffver-

bindungen und Schwebstoffe im Rohwasser. Aber auch Mangan und Eisen, die in Verbindung mit gelöstem Kohlenstoff Trübungen erzeugen, führen zu technischen Probleme bei der Trinkwasseraufbereitung.

Messungen in Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg werden die Säure- und Stickstoffdepositionen über die Luft und den Niederschlag an 24 verschiedenen Depositionsmessstandorten überwacht. An 10 dieser Messstandorte werden zusätzlich das Waldklima und der Waldzustand erfasst, wobei 6 davon den Bodenwasserhaushalt mit berücksichtigen. Darüber hinaus wurde Anfang der 1990er Jahre im Rahmen der Bodenzustandserfassung (BZE) landesweit der chemische Zustand der Waldböden untersucht. Einzelne Fallstudien ergänzen die Beobachtungen aus den verschiedenen Messnetzen. Die Beobachtungen belegen, dass durch gezielte Kalkung, die Steuerung von Hiebsmaßnahmen sowie hinreichend hohe Laubholzanteile die Versauerung der Waldböden und letztlich auch der Austrag von potenziell wassergefährdenden Stoffen wie Nitrat, Aluminium, gelösten organischen Kohlenstoffen und Schwermetallen verlangsamt oder sogar aufgehoben werden kann.

3 Kalkung

Bodenschutzkalkungen haben nicht die Steigerung der Wuchsleistung von Waldbeständen, sondern vielmehr die Sicherung geschlossener Stoffkreisläufe zum Ziel, da durch die Kalkung eine Verbesserung und Stabilisierung des Nährelementkreislaufes erreicht werden kann. Die begrenzenden Faktoren des Streuabbaus sollen beseitigt, das Puffervermögen der Waldböden für Säureeinträge gestärkt und Austauschgleichgewichte in Richtung einer Speicherung von austauschbaren basischen Kationen verschoben werden. Kohlenstoffvorräte, die zunehmend in untätigen, stark versauerten Humusauflagen gespeichert sind, können somit in stabile, biologisch wertvolle Humusvorräte im Mineralboden überführt werden.

Durch die Verbesserung des bodenchemischen Zustands wird außerdem die Lebensraumeignung für leistungsfähige Strukturbildner, insbesondere die der Regenwürmer gewährleistet. Der dadurch entstehende Porenraum führt zu einer verbesserten Belüftung und somit zu einer intensiveren und tiefer reichenden Durchwurzelung, was insgesamt die Stabilität der Waldökosysteme und deren Stickstoffspeicherkapazität erhöht.

Auf hochdosierten Kalkungsflächen sind beispielsweise der pH-Wert sowie die Basensättigung auch 50 Jahre nach der Kalkung deutlich erhöht. Außerdem ist auf den Kalkungsflächen eine intensivere und tiefere Durchwurzelung des Mineralbodens erkennbar. Für eine langfristige Stabilisierung und Regeneration der Waldböden ist ein landesweites Kalkungsprogramm nötig, welches einschließlich der notwendigen standortspezifischen Wiederholungskalkungen den zwei bis dreifachen Umfang der seit 1980 gekalkten Flächen umfasst.

Fallbeispiel Kleine Kinzig

In dieser Fallstudie wird schwerpunktmäßig die Wirkung von Bodenschutzkalkungen auf die chemische Wasserqualität untersucht. Es umfasst die zwei Gebiete Teufelsbächle (2,16 km²) und Huttenbächle (3,92 km²), welche Teileinzugsgebiete der Kleinen Kinzig sind. Die Kleine Kinzig speist den Stauraum der gleichnamigen Talsperre, deren zugehörige Wasseraufbereitungsanlage Trinkwasser für 250.000 Menschen bereitstellt. Beide untersuchten Einzugsgebiete sind nahezu vollständig bewaldet und in ihren morphologischen und geologischen Eigenschaften (Buntsandsteinlagen) vergleichbar, da sie unmittelbar benachbart sind. Sie liegen im submontanen Bereich des Nord-schwarzwaldes (550-850 m.ü.NN), 7 km südlich von Freudenstadt. Ihre mittlere Neigung beträgt 6-10 %, wobei die Hänge Neigungen bis 60 % erreichen. Die hydrologischen Abflussbildungsprozesse zwischen beiden Gebieten sind gut vergleichbar. Die Abflussbildung wird von oberflächennahem Deckschichtenabfluss dominiert. Somit ist die Möglichkeit gegeben, die chemische Wasserqualität durch die in der Fläche durchgeführten Bodenschutzkalkungen zu steuern.

Kalkungen der Einzugsgebiete

In beiden Einzugsgebieten wurden Kalkungskampagnen durchgeführt, um der Versauerungswirkung von Depositionen aus der Luft im Boden entgegenzuwirken (Abbildung 1). Die Kalkung wurde im EG Huttenbächle im Jahr 1982 begonnen; 1991 war der größte Teil des Einzugsgebiets gekalkt. Restflächen wurden bis 1995 gekalkt. Im Jahr 2003 wurde die Kalkung über das ganze Einzugsgebiet hinweg mit einer Dosierung von 3 t/ha Dolomit wiederholt. Im EG Teufelsbächle bedecken die Kalkungsflächen nur ca. 50 % der Einzugsgebietsfläche und die Kalkung wurde später nicht wiederholt.

Bodenprofile und Gewässerproben

Im Jahr 2003 wurden in einem 200 m-Raster insgesamt 153 Bodenprofile in den Einzugsgebieten Huttenbächle und Teufelsbächle angelegt. Die Elementgehalte und Austauscherbelegung jedes Bodenprofils wurden für den Auflagehumus und den Mineralboden in vier verschiedenen Tiefenstufen bestimmt. Seit Ende 2003 werden außerdem die Vorfluter und Quellen in den Einzugsgebieten hinsichtlich ihrer gewässerchemischen Zusammensetzung im 14-tägigen Rhythmus beprobt.

Basensättigung

Besonders im Oberboden bewirkt die Bodenschutzkalkung eine Verbesserung der Basensättigung. Abbildung 1 zeigt die an den Bodenprofilen gemessenen Basensättigungen beider Einzugsgebiete in 0-10 cm Tiefe. Insgesamt zeigt sich ein sehr heterogenes Bild der Basensättigungen mit stark streuenden Werten im Einzugsgebiet Huttenbächle von 2,10 % bis 93,90% und im Einzugsgebiet Teufelsbächle von 2,10 % bis 80,40 %.

Im Oberboden (0-10 cm) der beiden Einzugsgebiete unterscheiden sich die Basensättigungen nicht signifikant voneinander, was durch eine höhere Austauschkapazität im Einzugsgebiet Huttenbächle erklärt werden kann. Bei höherer Austauschkapazität wird auch eine deutlich höhere Kalkungsintensität benötigt, um die Austauscherbelegung signifikant zu ändern. In 60 bis 90 cm Bodentiefe jedoch sind die Basensättigungen im stärker gekalkten Einzugsgebiet Huttenbächle signifikant höher. Generell lässt sich sagen, dass der Oberboden die höchsten Basensättigungen aufweist, da hier der direkte Einfluss der Kalkausbringung am stärksten ist. Die geringsten Basensättigungen dagegen befinden sich in beiden Einzugsgebieten in 30-60 cm Bodentiefe. Ab 60 cm Tiefe steigen sie wieder leicht an, da hier die Verwitterung des Gesteins Basen in beschränktem Umfang nachliefert.

Die Heterogenität der Basensättigung in 0-10 cm Tiefe kann in beiden Einzugsgebieten durch die kleinräumige Variabilität der Kalkausbringung erklärt werden. So sind die niedrigsten Werte der Basensättigung in allen Tiefenstufen im östlichen Teil des Einzugsgebietes Teufelsbächle auf den nicht gekalkten Flächen zu finden.

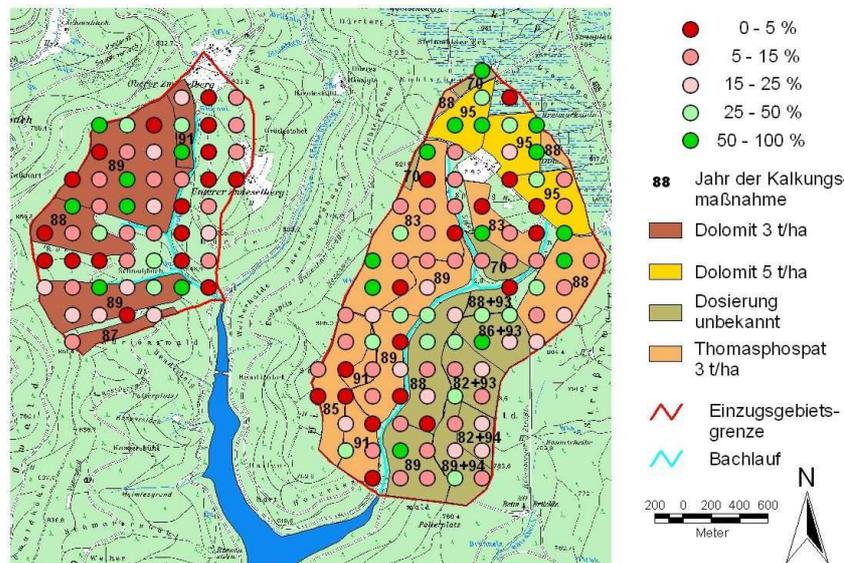


Abb. 1: Durchgeführte Kalkungsmaßnahmen mit Dosierung und Jahr der Ausbringung in den Einzugsgebieten Teufelsbächle (links) und Huttenbächle (rechts) sowie die gemessenen Basensättigungen in 0-10 cm Bodentiefe.

Gewässerchemie

Die gewässerchemischen Untersuchungen beider Bäche in den zwei Einzugsgebieten macht deutliche Unterschiede in den Versauerungsparametern sichtbar. Als Versauerungsparameter wird in Abbildung 2 die Entwicklung der Alkalinität entlang der Bachläufe gezeigt. Die Alkalinität zeigt die Aktivität von Hydrogencarbonat und organischen Anionen in wässriger Lösung an und ist somit ein Maß des natürlichen Versauerungsstatus von Gewässern. Wie ersichtlich wird, sind die Alkalinitäten im Huttenbächle entlang der gesamten Fließstrecke positiv. Im

Teufelsbächle dagegen reichen die Werte in Extremsituationen im Unterlauf bereits an den negativen Bereich heran und sind am Oberlauf ganzjährig negativ.

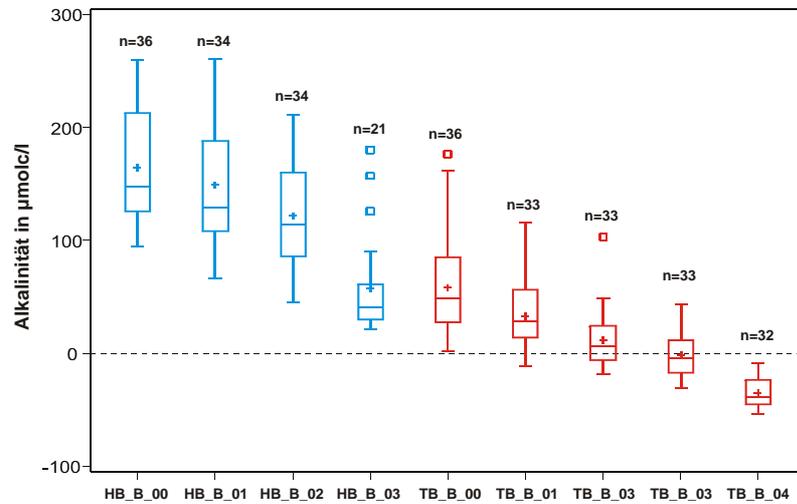


Abb. 2: Alkalinität des Bachwassers im Huttenbächle (blau) und Teufelsbächle (rot); die Nummerierung der Messstellen ist vom Unterlauf zum Oberlauf ansteigend.

Ähnliche Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten zeigten sich auch im pH-Wert und im Versauerungsindex. Auch die Kalzium- und Magnesiumkonzentration ist im Huttenbächle deutlich höher als im Teufelsbächle. Diese erhöhten Werte sind offensichtlich auf die im Einzugsgebiet Huttenbächle intensiveren Bodenschutzkalkungen zurückzuführen, da sowohl Kalzium als auch Magnesium mit dem Kalkungsmaterial eingebracht werden.

In Abbildung 3 wird die Kalziumkonzentration am Gebietsauslass der beiden unterschiedlich gekalkten Einzugsgebiete dargestellt. Im Jahr 1989, zu Beginn der Messreihe, lagen die Kalziumkonzentrationen zwischen den beiden Gebietsauslässen sehr nahe beieinander. Bis Mitte der 1990er Jahre sank die Kalziumkonzentration am Teufels-

bächle deutlich ab und pendelte seitdem jahresperiodisch um einen relativ konstanten Wert von ca. 2,6 mg/l. Die Kalziumkonzentrationen im Huttenbächle dagegen stiegen im selben Zeitraum auf einen Maximalwert von 4,1 bis 4,2 mg/l an und sank bis zum Jahr 2003 auf den Wert von 3,6 mg/l ab. Dieser Trendverlauf in der Kalziumkonzentration lässt sich mit den durchgeführten Kalkungskampagnen in den beiden Untersuchungsgebieten erklären. 1989 war im Einzugsgebiet Teufelsbächle der überwiegende Teil der Kalkungsmaßnahmen abgeschlossen, so dass die Kalkungsreaktion im Bachwasser in den Jahren 1996/97 weitgehend abgeklungen war. Ein Kalkungseffekt war also maximal über einen Zeitraum von 7 bis 10 Jahren erkennbar. Im Einzugsgebiet Huttenbächle waren 1995 die Flächenkalkungen zu 100 % abgeschlossen und lagen bis zu maximal 13 Jahre zurück. Dies und die Tatsache, dass auf ca. 1/5 der Einzugsgebietsfläche bis dahin eine Wiederholungskalkung stattgefunden hat, erklärt die maximalen Konzentrationen in den Jahren 1993/94. Die Tatsache, dass ein bis zwei Jahre nach der Wiederholungskalkung von 2003 die Trendkurve wieder allmählich anzusteigen beginnt, zeigt, dass in den Einzugsgebieten die Kalkungsreaktion im Bachwasser in Form von erhöhten Neutralkationen-Konzentrationen schnell ankommt.

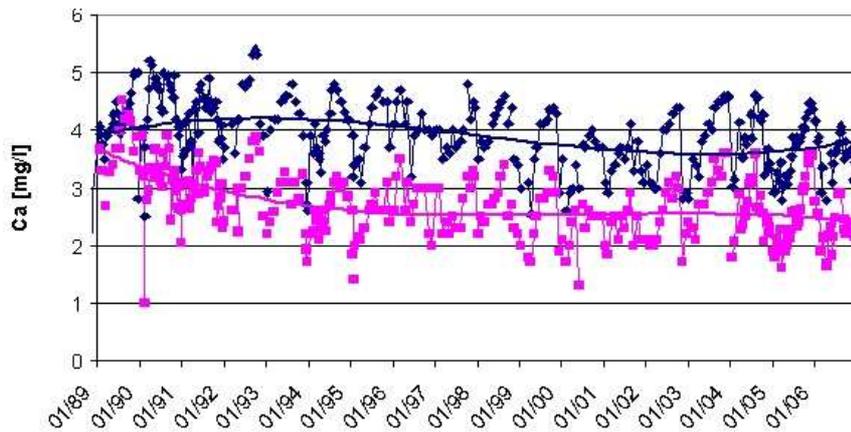


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der Kalziumkonzentrationen im Gebietsauslass der Bäche Huttenbächle (blau) und Teufelsbächle (pink). Trendlinien = Polynom 2. Grades.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Einzugsgebieten ist bezüglich der Aluminium- und Mangangehalte zu erkennen, die Reaktionsprodukte aus der Bodenversauerung darstellen. Beide Elemente sind von hoher Bedeutung für die chemische Wasserqualität. Aluminium ist zwar auf technischem Weg bei der Trinkwasseraufbereitung vergleichsweise leicht aus dem Wasser zu entfernen, schädigt aber aquatische Lebensgemeinschaften. Mangan behindert durch Trübungen die technische Entkeimung bei der Trinkwasseraufbereitung. Im Huttenbächle sind die Aluminium- und Mangankonzentrationen sehr niedrig; die Trinkwassergrenzwerte von Aluminium (0,2 mg/l) und Mangan (0,05 mg/l) werden nie erreicht. Generell verhält es sich am Unterlauf des Teufelsbächles ähnlich. Am Oberlauf des Teufelsbächles jedoch wird der Grenzwert für Aluminium z. T. deutlich überschritten und sämtliche Manganwerte liegen über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung.

Wie andere externe Einflüsse und Bewirtschaftungsmaßnahmen stellt auch die Kalkung einen technologischen Eingriff in Ökosystemabläufe dar und kann Nebenwirkungen verursachen. Insbesondere in der Initialphase nach der Bodenschutzkalkung kann durch eine überschießende Nitrifikation Nitrat in den Vorfluter gelangen. In den untersuchten

Einzugsgebieten konnte dies allerdings nicht beobachtet werden und die Nitratausträge zeigten sogar leicht abfallende Trends.

Fallbeispiel Stimpfach

Das Rohwasser des ca. 150 ha großen Einzugsgebiets der gemeindlichen Trinkwasserversorgung Stimpfach entstammt einem sehr flachgründigen, ca. 1,5 bis 2 m mächtigen Aquifer aus Kieselsandsteinverwitterungsmaterial, der einer Grundwassersohle aus Oberen Bunten Mergeln aufsitzt. Das Einzugsgebiet befindet sich auf einer mittleren Höhenlage von 480 m.ü.NN und der Jahresniederschlag beträgt 720 mm. Bei den Bodentypen handelt es sich vorwiegend um Podsole, podsolige Rostbraunerden sowie Pseudogleye und als vorherrschende Standortseinheiten werden feucht- bis trocken-saure Sande beschrieben. Durch starke Sturmwürfe im Jahr 1990 waren 2/3 der Einzugsgebietsfläche kahl. Aufgrund dieser Kahlfächen wurden nach starken Regenphasen Durchbrüche von DOC (= gelöste organische Kohlenstoffe, insbesondere lösliche Fulvo- und Huminsäuren) in das Rohwasser festgestellt. Durch die damit einhergehenden Trübungen des Wassers wurde die technische Funktion der Trinkwasseraufbereitung gefährdet.

Bodenchemische Steuerungsmaßnahmen im Einzugsgebiet sollen eine Verbesserung der Situation herbeiführen, wobei sich zur langfristigen Sanierung eine Bodenschutzkalkung eignet. Im Labor wurde untersucht, wie die unterschiedlichen Schutzkalkungsmethoden auf den Stoffaustrag im Bodensickerwasser wirken. Dafür wurden in Versuchen folgende Kalkungsvarianten simuliert: je vier Bodensäulen mit Dolomit, einem Gemisch aus Rauchgasentschwefelungsgips und Dolomit sowie mit Basaltgesteinsmehl. 5 Säulen wurden als Nullproben untersucht und nicht gekalkt. Außerdem wurden an verschiedenen Stellen des Einzugsgebietes Bodenproben entnommen und chemisch sowie bodenphysikalisch analysiert. Die Bodensäulen wurden mit auf pH 4 angesäuertem Wasser perkoliert. Die aufgebrachte Sickerwassermenge von 2200 ml entspricht etwa einem Jahresniederschlag.

Kalkungsmittel

Alle Kalkungsvarianten haben zum Ziel, durch ein hohes Kalziumangebot die im Boden gelösten Kohlenstoffverbindungen zu flocculieren und so aus der Lösungsphase auszufällen. In Abbildung 4 sind die Konzentrationen an gelöstem Kohlenstoff (DOC) nach 550, 1100, 1650 und 2200 ml Sickerwasserdurchlauf dargestellt. Wie Abbildung 4 zeigt, bewirkt die Kalkungsvariante Gips am deutlichsten eine DOC-Reduktion. Gleichzeitig konnte nachgewiesen werden, dass durch den Einsatz der Kalkungsvariante Gips große Mengen Aluminium freigesetzt werden. Dies ist durch die hohe Löslichkeit von Gips und die damit schlagartig erhöhte Kalziumkonzentration in der Bodenlösung bedingt, wodurch Aluminium von den Austauschoberflächen im Boden verdrängt und ins Sickerwasser verschoben wird. Bei den anderen Kalkungsvarianten dagegen liegt das Aluminium überwiegend in der für Podsole typischen organisch komplexierten Form vor. Die harmonischste Wirkung und Reduktion von gelösten Kohlenstoffverbindungen im Sickerwasser wurde durch vergleichsweise langsam lösliche silikatische Gesteinsmehle erzielt, die dann auch im Feldversuch auf Einzugsgebietsebene angewendet wurden.

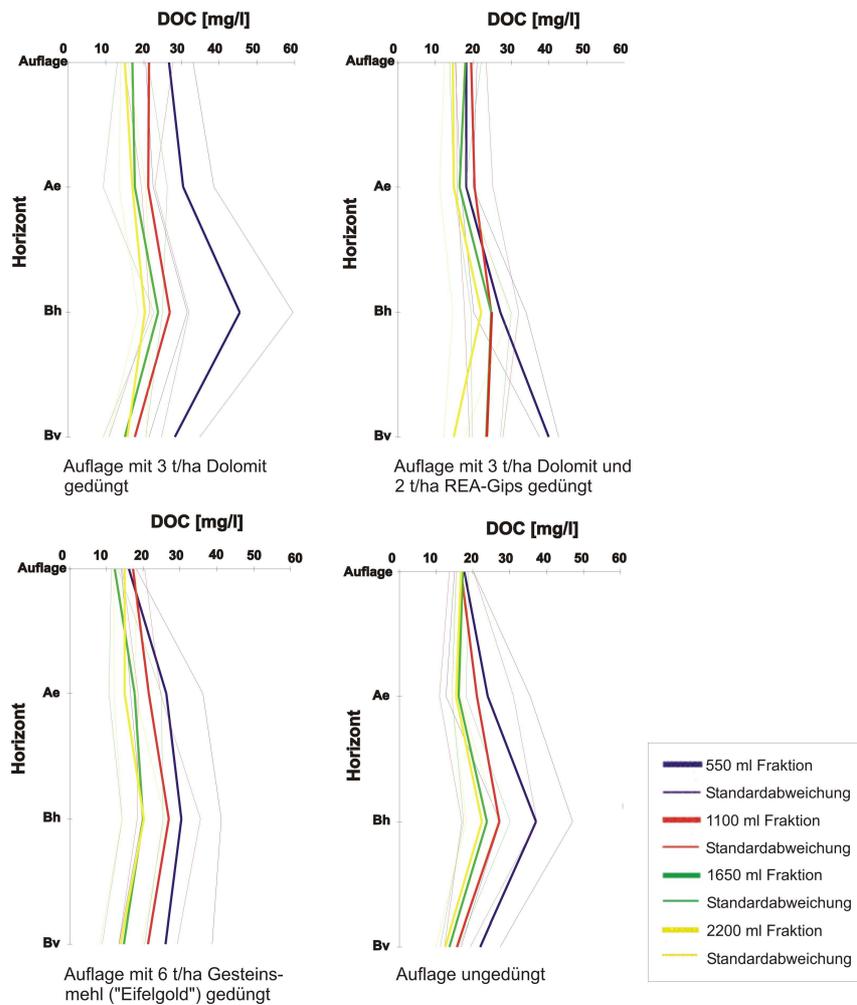


Abb. 4: DOC-Konzentration im Bodenwasser in Abhängigkeit vom Bodenhorizont und durchsickertem Niederschlagsvolumen (Fraktionen 550 ml bis 2200 ml in 550 ml Schritten).

Kalkungsbedarf in Baden-Württemberg

Anhand von Basensättigungen, pH-Werten oder Cl-Überschreitungen wurden, auf die Messpunkte der Bodenzustandserfassung (BZE) bezogen, 600.000 ha der Landeswaldfläche Baden-Württembergs und 200.000 ha weitere Flächen als kalkungsbedürftig ausgewiesen. Die bisherige jährliche Flächenleistung beträgt jedoch 14.500 ha. Somit wären weitere 20 Jahre Kalkung erforderlich. Darüber hinaus lässt sich eine erforderliche Kalkungsmenge von 46 kg Dolomit $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ Landeswaldfläche abschätzen. Das bedeutet einen jährlichen Dolomitbedarf von 60.000 t auf Landesebene, wobei die derzeitige Kalkungsdosierung von 3 t/ha einer jährlich zu kalkenden Fläche von ca. 20.000 ha entspricht. Daraus wird ersichtlich, dass derzeitige Bemühungen nicht ausreichen, um eine langfristige Stabilisierung der Waldböden zu erreichen. Ein Nachteil der Steuerung des Kalkungsbedarfs über kritische pH-Werte, Basensättigungen und Cl-Überschreitung ist, dass sich Waldökosysteme ständig im Bereich der kritischen Säure-Basenverhältnisse bewegen und so kaum eine Regeneration der verloren gegangenen Standortsqualität möglich ist.

Eine weitere Methodik um Kalkungsmaßnahmen zu planen besteht derzeit in der Betrachtung von Potentialen, die mit Hilfe von Leitindikatoren definiert werden. So wurde für 308 BZE-Profile die Kalkungsmenge ermittelt, um Aluminium in 60-90 cm Bodentiefe auszutauschen. Dabei wurde angenommen, dass in dieser Tiefenstufe natürlicherweise alle Austauscherelemente mit Neutralkationen (Kalzium, Magnesium, Kalium) belegt sind. Hieraus ergibt sich ein unterschiedlicher Kalkungsbedarf für unterschiedliche Wuchsgebiete. Im Schwarzwald und Odenwald überwiegen Standorte mit empfohlenen 2-3 Wiederholungskalkungen, die Standorte im Rheintal, Schwäbische Alb und im Neckarland sind durch keinen oder wenig Kalkungsbedarf gekennzeichnet. In Abbildung 5 ist der Kalkungsbedarf verschiedener Flächen in Baden-Württemberg und deren prozentualer Anteil an der Landesfläche dargestellt.

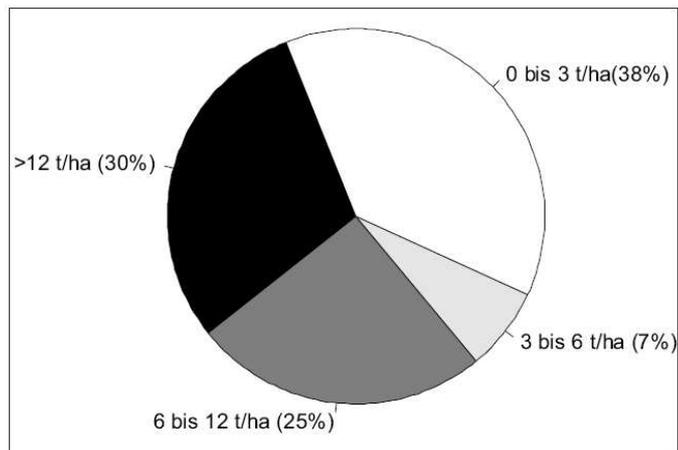


Abb. 5: Kalkungsbedarf für Baden-Württemberg, hergeleitet auf der Grundlage der Austauscherbelegung an de BZE-Profilstandorten.

4 Waldbauliche Steuerung des Stoffhaushalts

Waldbauliche Behandlungsstrategien verfolgen einerseits das Ziel, auf direktem Weg Qualität und Wachstum der Bestände zu beeinflussen. Andererseits werden dadurch indirekt die Rahmenbedingungen für Kopplungs- und Entkopplungsprozesse im Stoffhaushalt gesetzt. Dies trifft auf die Wahl der Baumartenzusammensetzung, aber vor allem auch auf die räumliche und zeitliche Festlegung von Hiebsmaßnahmen zu. Es stehen stark diskontinuierliche Verfahren mit Kahlschlagsphase und einer hohen Entkoppelungstendenz des Stoffhaushalts sowie dauerwaldorientierte Verfahren mit mehr oder weniger gleichmäßig über das Bestandesleben verteilten Femelhieben gegenüber. Neben der Hiebsform wirkt sich auch die Wahl der Baumartenzusammensetzung beträchtlich auf den Stoffhaushalt der Waldböden aus.

Fallbeispiel Conventwald

In der Ökosystem-Fallstudie Conventwald werden seit 1991 der Stoff- und der Wasserhaushalt von Waldökosystemen untersucht, die sich hinsichtlich ihrer Baumartenzusammensetzung und Bestandesstruktur unterscheiden. Das Untersuchungsgebiet liegt in einer Höhenlage von 700-860 m ü.N.N., mit einer mittleren Hangneigung von ca. 20° und südöstlicher Ausrichtung. Der Conventwald ist gekennzeichnet durch tiefgründig entwickelte, oberflächlich versauerte Braunerden aus dunklem, glimmerreichem Paragneis auf einem Schuttaquifer mit 1 bis 5 m Mächtigkeit. Somit hat das betrachtete Gebiet Modellcharakter für die durch Hangschuttaquifere gekennzeichneten Wassereinzugsgebiete des Mittleren Schwarzwaldes. Der Conventwald weist Gesamtsäure und Gesamtstickstoffeinträge auf, welche im Vergleich zum übrigen Land im oberen Drittel der Depositionsbelastung liegen und welche mit den Einträgen in weiten Teilen des Schwarzwaldes und im Odenwald vergleichbar sind.

Die Untersuchungsflächen für verschiedene waldbauliche Varianten wurden so gewählt, dass die Standortbedingungen möglichst ähnlich sind. Die Versuchspartellen wurden in eine „Mischbestandsvariante“ und mehrere „Reinbestandsvarianten“ unterteilt und sind mit weniger als 500 m Abstand räumlich sehr eng benachbart. Die Versuchspartellen der Mischbestandsvariante befinden sich im östlichen Teil des ca. 15 ha großen Bannwaldgebietes „Conventwald“, der seit 1950 nicht mehr genutzt wird. Der Mischbestand ist ein ca. 160-jähriges Buchen-Tannen-(Fichten)-Altholz mit ca. 63 % Buche, 27 % Tanne und 5 % Fichte. Die restlichen 5 % sind Bestandeslücken und Naturverjüngung. Bei den in unmittelbarer Nachbarschaft zum Bannwald befindlichen Reinbestandsvarianten handelt es sich um 40-jährige Stangenhölzer aus Fichte bzw. Buche sowie um ein etwa 90-jährige Fichten-Baumholz in einem nadelholzreichen, ca. 0,5 ha großen Horst eines Tannen-Buchen-Bestandes.

Mit Hilfe von gemessenen Depositionsdaten und Bodenlösungskonzentrationen wurden für insgesamt 49 Struktureinheiten in den Misch- und Reinbeständen einzeln Stoffflüsse für den gesamten Beobachtungszeitraum seit 1991 berechnet. Diese Struktureinheiten können als zeitlich begrenzte Phasen von waldbaulichen Behandlungskonzepten aufgefasst werden. So wurden z.B. die Stoffflussberechnungen von Kahlschlag, Naturverjüngung, Baumholz und Altholz zu einem Stoffaustagsmodell für einen Buche-Kahlschlagbetrieb kombiniert. Außerdem wurden größere Femellücken mit und ohne Vorverjüngung zur Beschreibung von Stoffausträgern nach Femelhieben verwendet. Die Depositionsmessungen ermöglichen die Einbeziehung von Stoffeinträgen für Ammonium, Nitrat, Sulfat, Basen-Kationen (MB) und Gesamtsäure.

Im Gebietsauslass spiegelt sich das Depositionsregime wider. So wurde im Bachwasser (Gebietsaustrag) des Conventwaldes ein sinkender pH-Wert von anfänglich pH=7,2 im Jahr 1991 auf pH=6,6 im Jahr 1998 beobachtet. Anschließend stieg der pH-Wert bis zum Jahr 2003 wieder an und erreichte Maximalwerte von pH=7,5. Seitdem sinkt der pH-Wert

drastisch und erreichte zuletzt Minimalwerte unter $\text{pH}=6$. Darüber hinaus ist eine ausgeprägte saisonale Schwankung erkennbar, die Minimalwerte im Spätwinter zu Zeiten der maximalen Bodenwassersättigung und Maximalwerte im Sommer erreicht. Im Wesentlichen gleichlaufende Abnahmetrends sind bei der Kalziumkonzentration im Bachwasser festzustellen, was auf eine kontinuierliche Abnahme der leicht löslichen Kalziumvorräte entlang der Transportwege des Sickerwassers hinweist. Hierbei werden Minimalwerte von unter $4,5 \text{ mg/l}$ erreicht (Abbildung 6).

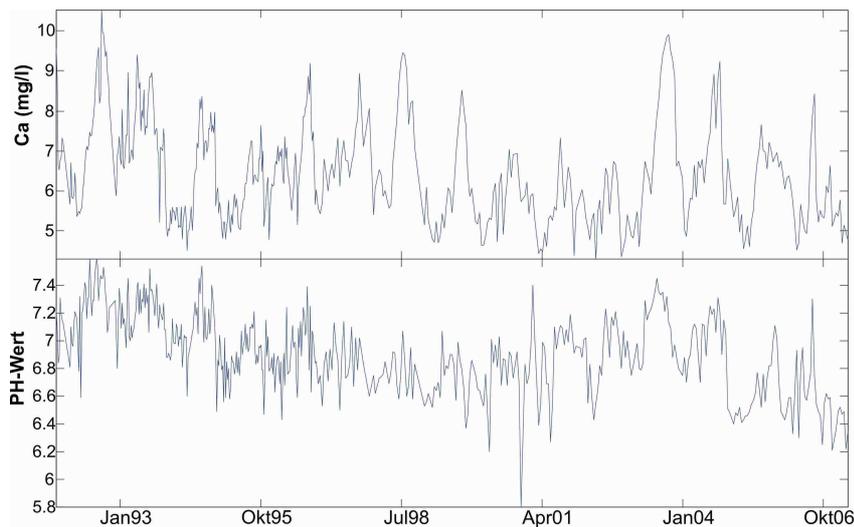


Abb. 6: Trend und saisonale Schwankungen für pH-Wert und Kalziumkonzentration im Bachwasser.

In den letzten Jahren ging der Nettoaustrag für Kalzium aus den Böden des Einzugsgebietes auf Werte nahe Null zurück. Seit 2005 und zeigt sich sogar eine leichte Aufnahme von Kalzium im Boden. Seit dem Jahr 2001 wird nahezu der gesamte Kalziumaustrag aus dem Boden direkt vom Eintrag gespeist. Die Pufferkapazität des Kalziumcarbonatpuffersystems im Boden unter dem Buchen-Mischbestand ist offensichtlich

erschöpft und die Säurepufferung wird zunehmend durch Silikate übernommen.

Da der Boden des Conventwaldes durch eine leistungsfähige Pufferzone in den tieferen Horizonten charakterisiert ist, ist es möglich, die Bodenversauerung in ihrer Entwicklung zu studieren und nicht nur Zustände maximaler Versauerungsintensitäten zu diagnostizieren. Ziel der Studie ist es, den Spielraum für eine Stabilisierung des Stoffhaushalts zu identifizieren, den Forstpraxis und Waldbau unter dem Einfluss aktuell wirksamer Umweltveränderungen noch haben.

Einfluss der Hiebsform

In Reinbeständen wird die Holzernte oftmals in Form von Kahlschlägen durchgeführt, um danach die neue Bestandesgeneration anzupflanzen. In Mischbeständen werden so genannte Femellücken geschlagen, in denen nur etwa 2-5 Altbäume aus dem Bestand entnommen werden, was eine natürliche Verjüngung in den entstandenen Kronenlücken ermöglicht. Der Kahlschlag im Conventwald wurde bereits 1989 durchgeführt, also 2 Jahre vor Beginn der Feldmessungen. Im Februar 2001 wurden außerdem zwei Femellücken durch Einschlag von je 3-5 Altbuchen im Mischbestand geschlagen. Eine Femellücke wurde dabei in einem Bereich ohne Buchenvorverjüngung, eine andere in einer geschlossenen, ca. 1-2 m hohen Buchenverjüngung unter Schirm angelegt. In Abbildung 7 werden die Stoffbilanzen des Kahlschlags sowie der beiden Femellücken verglichen.

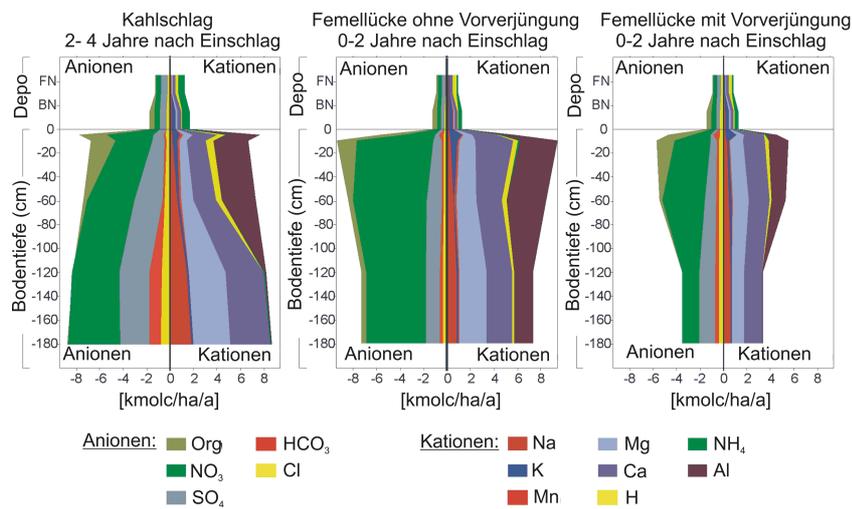


Abb. 7: Vergleich der Stoffflüsse im Bereich eines 1989 angelegten Streifenkahlschlags (links) sowie je einer 2001 angelegten Femellücke ohne (Mitte) und mit Buchenvorverjüngung (rechts).

Direkt nach diesen Hiebseingriffen konnte eine ausgeprägte Stoffhaushaltsreaktion beobachtet werden. Wie Abbildung 7 zeigt, ist wenige Jahre nach der Hiebemaßnahme die Stoffbilanz auf allen drei Verjüngungsflächen immer noch durch eine 3 bis 8-fache Erhöhung des Nitrataustrages gegenüber dem Eintrag gekennzeichnet. Auf der Kleinkahlschlagsfläche wurden 2 Jahre nach dem Hieb die höchsten Stoffausträge gemessen ($9 \text{ kmolc ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Auf der Femellfläche ohne Vorverjüngung lag der Stoffaustrag direkt nach der Hiebsdurchführung mit ca. $7,5 \text{ kmolc ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in einer ähnlichen Größenordnung wie beim Kleinkahlschlag, während der Stoffaustrag bei der Femellücke mit Buchen-Vorverjüngung im Mittel der ersten 2 Jahre etwa die Hälfte betrug. Diese Unterschiede gehen im Wesentlichen auf Unterschiede im Nitrataustrag zurück. In der Femellücke mit Vorverjüngung zeigt das Tiefenprofil der Nitrat-Flussdichte zwischen 60 und 120 cm Tiefe eine Reduktion um 50-60 %, gegenüber der Nitratflussdichte in den oberen

Bodentiefen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Nitrataufnahme im Wurzelraum der Buchenvorverjüngung zu erklären ist.

Einfluss der Baumartenzusammensetzung

Die Depositionsraten weisen zwischen den Baumarten und – altersstufen im Wald eine hohe Variabilität auf, welche im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Kronendichten und Kronenformen erklärt werden kann. So sind buchenreiche Standorte durch eine um ca. 40 % niedrigere Deposition als Fichtenreinbestände gekennzeichnet.

Wie Abbildung 8 zeigt, sind im Buchenmischbestand die Flussdichten im Freilandniederschlag und im Sickerwasseraustrag mit Werten um $1,2 \text{ kmolc ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ ausgeglichen. Derzeit muss folglich nicht mit einer weiteren Bodenversauerung gerechnet werden. Der Stoffaustrag wird überwiegend von aktuell eingetragenen Sulfat, von Hydrogenkarbonat und in geringem Umfang von Nitrat angetrieben. Der Nitrataustrag ist jedoch gegenüber dem Eintrag mit dem Freiland- und Bestandesniederschlag um ca. 80 % reduziert, was auf eine effektive Nitrataufnahme durch den buchenreichen Bestand hinweist.

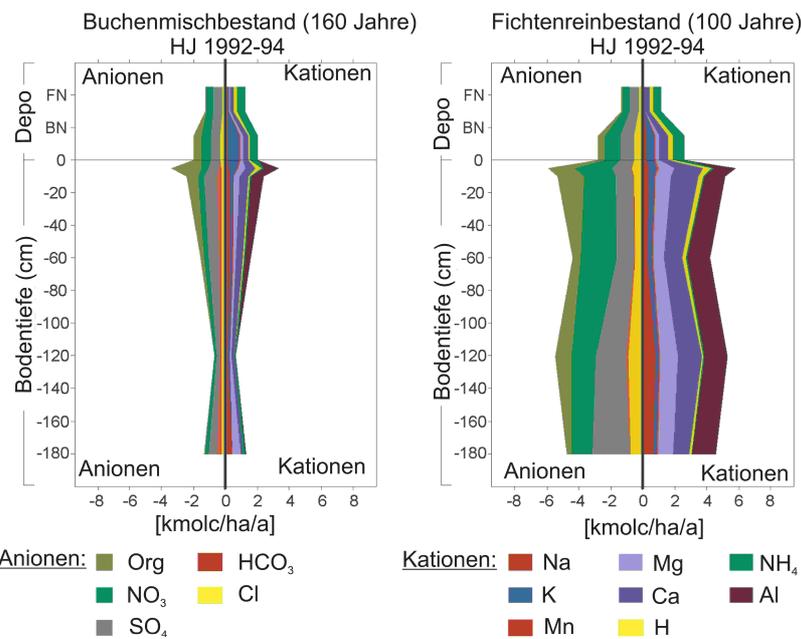


Abb. 8: Vergleich der Stoffflüsse zwischen einem Buchenmischbestand (links) und einem Fichtenreinbestand (rechts) in der Fallstudie Conventwald. Beide Varianten sind Altbestände. Dargestellt ist der gesamte Fließpfad zwischen Freilandniederschlag (FN) oberhalb des Kronendachs, Bestandesniederschlag (BN) und Sickerwasseraustrag unterhalb 180 cm Bodentiefe.

Die Stoffbilanz im benachbarten Fichtenreinbestand ist dagegen – bei gleicher Freilanddeposition – nicht annähernd ausgeglichen. Bereits im Bestandesniederschlag ist die Stoffflussdichte etwa 30 % höher als im Buchenmischbestand. Darüber hinaus beträgt die Flussdichte im Sickerwasseraustrag bei 180 cm Bodentiefe das ca. 4-fache des Depositionsflusses. Der erhöhte Nitrataustrag kann teilweise durch die stärkere Nitratdeposition im Kronenraum erklärt werden. Fichtenreinbestände sind zudem durch ein flaches Wurzelwerk gekennzeichnet, wodurch ihre Nitrataufnahme auf eine geringe Bodentiefe beschränkt ist. Der hohe Stickstoffaustrag treibt eine massive Stoffauswaschung aus dem Waldboden unter Fichte an.

Stoffbilanzen für waldbauliche Behandlungsmodelle

Die in der Fallstudie Conventwald beobachteten Stoffflüsse für verschiedene Baumarten/-alterszusammensetzungen und Hiebsformen können in Gesamtbilanzen für waldbauliche Behandlungsmodelle zusammengefasst werden. Dabei werden der Stoffeintrag in den Boden, wie der Eintrag mit dem Niederschlag sowie die Freisetzung von Kationen mit der Silikatverwitterung, in Beziehung zu den Verlustgrößen, wie die Fixierung von MB-Kationen (Neutralkationen: Kalzium, Magnesium, Kalium und Natrium) in der Biomasse und deren Austrag mit dem Sickerwasser, gesetzt. Die Messdaten werden hierbei auf einer Modellzeitachse so arrangiert, dass sie die entsprechenden Bestandesphasen (Verjüngung, Jungbestand, Altbestand etc.) innerhalb der Umtriebszeit unterschiedlicher Waldbehandlungsmodelle repräsentieren. Die MB-Kationen sind für die Säurepufferung im Boden verantwortlich und ihr Verlust zeigt indirekt die Entwicklung einer Bodenversauerung an.

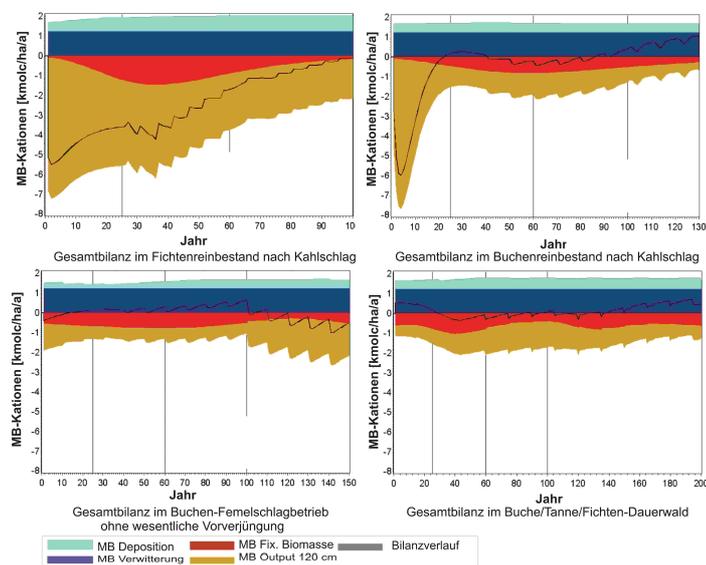


Abb. 9: MB-Kationenbilanzen für vier unterschiedliche waldbauliche Behandlungsmodelle.

Die Gesamtbilanzen für verschiedene waldbauliche Behandlungsmodelle ergaben neben dem erwarteten deutlichen Unterschied zwischen Fichten-Kahlschlagbetrieb und den Buchenmodellen auch innerhalb der Buchenmodelle eine deutliche Differenzierung. Wie aus Abbildung 9 ersichtlich wird, ist die MB-Kationenbilanz im Fichtenkahlschlagbetrieb durchweg negativ. Direkt nach dem Kahlschlag betragen die Bilanzverluste mehr als $5 \text{ kmolc ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ und nähern sich bis zum Ende der Umtriebszeit einer ausgeglichenen Bilanz an. Beim Buchenreinbestand mit Kahlschlag zeigt die MB-Kationenbilanz während der ca. 20-jährigen Kahlschlag- und Jungwuchsphase zeitlich begrenzt starke Basenverluste. Jedoch ist im Gegensatz zum Fichtenreinbestand die Bilanz danach wieder ausgeglichen. Im Buchen-Femelschlagbetrieb ohne wesentliche Vorverjüngung ist die MB-Kationenbilanz bis zum Beginn der Femelphase nahe Null und wird danach leicht negativ. Die einzelnen Femelphasen sind durch markante Schübe von Basenausträgen im Sickerwasser erkennbar. Der Buche/Tanne/Fichten-Dauerwald mit einer Umtriebszeit von 200 Jahren zeigt den ausgeglichensten Bilanzverlauf, der nur während kurzer Phasen geringfügig negativ wird.

Ein großer Unterschied in den MB-Kationenbilanzen ist ebenfalls bei den gängigen Nutzungskonzepten „Holz ohne Rinde“ und „Holz in Rinde“ gegeben (Tabelle 1). Nur bei den schonendsten waldbaulichen Behandlungsmodellen Buche/Tanne/Fichte-Dauerwald und Buchen-Femelschlag mit 80 % Vorverjüngung ist die MB-Kationenbilanz schwach positiv. Beim Buchen-Kahlschlagbetrieb dagegen ist sie deutlich negativ, während die jährlichen Verlustraten beim Fichten-Kahlschlagbetrieb so hoch sind, dass in absehbarer Zeit mit deutlichen Systemreaktionen zu rechnen ist. Durch eine Verlangsamung der Streuabbau, die Verringerung der Wurzeldichte und -tiefe sowie die massive Auswaschung von Nährstoffen können Wachstum und Vitalität der Bestände dauerhaft beeinträchtigt werden. Ähnlich wie die MB-Kationenbilanz verhält sich die Stickstoffbilanz, wohingegen die Schwefelbilanz in allen Varianten deutlich negativ ist. Im Boden besteht offensichtlich ein depositionsbedingter Schwefelüberschuss, der durch überproportionale Schwefelausträge allmählich abgebaut wird.

Tab. 1: Gesamtbilanzen für Bu/Ta/Fi-Dauerwald (U=200 Jahre), Bu-Femelschlag mit 80 % Vorverjüngung (U=150 Jahre), Bu-Femelschlag mit 20 % Ververjüngung (U=150 Jahre), Bu-Kahlschlag (U=130 Jahre) und Fi-Kahlschlag (U=100 Jahre) für Nutzungsarten Stammholz o.R., Stammholz m.R. und Vollbäume. Jahresrate in $\text{kmol}_c \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (negative Bilanzen= -, positive Bilanzen= +).

Bilanz-Element	Nutzung	Bu/Ta/Fi	Bu 150	Bu 150	Bu 130	Fi 100
		200 Dauer	Femel 0,8VVj.	Femel 0,8VVj.	Kahlschl.	Kahlschl.
		[$\text{kmol}_c \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]				
MB-	Holz	+	+	+	-	-
MB-	Holz+Rinde	+	+	-	-	-
MB-	Vollbaum	-	-	-	-	-
N	Holz	+	+	-	+	-
N	Holz+Rinde	+	+	-	+	-
N	Vollbaum	-	-	-	-	-
S	Holz	-	-	-	-	-
S	Holz+Rinde	-	-	-	-	-
S	Vollbaum	-	-	-	-	-
Azidität	Holz	+	+	+	+	-
Azidität	Holz+Rinde	+	+	+	+	+
Azidität	Vollbaum	+	+	+	+	+

5 Zusammenfassung

Der Stoffhaushalt – die Bilanz zwischen Stoffeintrag und Stoffaustrag – von Waldökosystemen wird von der Baumartenzusammensetzung und der räumlichen Struktur der Wälder bestimmt. Deshalb ist es wichtig, Behandlungsstrategien auf ihr Potential zur Verbesserung der Ressourcennachhaltigkeit im Sinne von Erhaltung des standörtlichen Leistungspotentials zur langfristigen Trink- und Grundwasservorsorge hin zu bewerten. Eine grundsätzliche Möglichkeit, den Stoffhaushalt von Forststandorten langfristig zu steuern ist durch die Baumartenwahl gegeben. Über Bodenschutzkalkungen und/oder die Applikation anderer Meliorationsmittel können das Puffervermögen der Böden und damit ihre Ausgleichsfunktion im Stoffhaushalt verbessert werden.

Kalkung

In den beiden Einzugsgebieten der Kleinen Kinzig waren zu Beginn der Kalkungsmaßnahmen sowohl die pH-Werte als auch die Kalziumkonzentrationen weitgehend vergleichbar. Während der Beobachtungsperiode unterschieden sie sich jedoch hinsichtlich ihrer gewässerchemischen Parameter zunehmend, da eines stark und eines wenig gekalkt wurde. Diese Entwicklung kann als Indiz für die den Stoffhaushalt stabilisierende und die Bodenversauerung bremsende Wirkung der Einzugsgebietskalkung gewertet werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass sich die chemische Gewässergüte in dem mit höherer Flächendeckung gekalktem Teileinzugsgebiet heute günstiger darstellt.

Besonders schwierig steuerbar ist die Kohlenstofffracht im Sickerwasser wenn das Bestandesgefüge flächig gestört ist. Im Einzugsgebiet Stimpfach wurde durch Sturmwurf nahezu die gesamte Einzugsgebietsfläche betroffen. Zu einer solch heiklen Situation ist unter Beachtung des Vorsorgeprinzips und zur Minimierung unbeabsichtigter Nebenwirkungen eine besonders vorsichtige Kalkungsbehandlung notwendig. Die

Applikation von 5 t/ha silikatischem Gesteinsmehl hat sich hier zur Festlegung der molaren Kohlenstoffmengen im Boden bewährt. So konnten die durch Kohlenstoff verursachten Färbungen und dadurch ausgelöste technische Probleme in der Trinkwasseraufbereitung minimiert werden.

Waldbau

Bodenchemische Eigenschaften, die einen Einfluss auf die Grundwasserqualität ausüben, können durch spezifische forstbetriebliche Maßnahmen gesteuert werden. Zu diesen zählen die Baumartenzusammensetzung (Nadelholz- bzw. Laubholzanteile) sowie die Größe und Dauer der Unterbrechung des überschirmenden Kronendaches (Kahlschlag- bzw. Dauerwaldwirtschaft, Vorhandensein von Verjüngung zum Nutzungszeitpunkt). In der Conventwald-Fallstudie konnte ein Zusammenhang zwischen dem Stoffaustrag und der Bestandesstruktur sowie Hiebmaßnahmen aufgezeigt werden.

6 Literatur

- BRAUKMANN, U. (1995): Biologische und chemische Untersuchungen zur Gewässerversauerung in Baden-Württemberg. In: Saurer Regen – Probleme für Wasser, Boden und Organismen, Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), EcoMed Verlag Landsberg, 205-224.
- FVA (2000): Bodenschutzkalkung im Wald, Merkblatt 20/2000.
- HAMM, A.; LEHMANN, R.; SCHMITT, P.; BAUER, J. (1995): Gewässerversauerung besprochen am Beispiel des nord- und nordostbayrischen Grundgebirges. In: Saurer Regen - Probleme für Wasser, Boden und Organismen, Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), EcoMed Verlag Landsberg, 29-52.
- HILDEBRAND, E. E. (1996): Warum müssen wir Waldböden kalken? In: Reihe Agrarforschung in Baden-Württemberg, Band 26, Ulmer Verlag Stuttgart, 53-65.
- KRENZKE, S. (2000): Die öffentliche Wasserversorgung in Baden-Württemberg 1998. Baden-Württemberg in Wort und Zahl, 373-381.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ (1992): Gütezustand der Gewässer in Baden-Württemberg, Bd. 7 Wasserwirtschaftsverwaltung H 27, Karlsruhe.
- LUKES, M.; v. WILPERT, K. (2001): Funktionen des Waldbodens in Gefahr. In: Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft, Freiburger Forstliche Forschung, Band 18, 298-308.
- NIEDERBERGER, J. (2005): Einfluss von Geologie und Waldkalkung auf die Wasserqualität für das Einzugsgebiet des Trinkwasserspeichers Kleine Kinzig. In: Wasservorsorge in bewaldeten Einzugsgebieten, Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 62, 159-169.
- NIEDERBERGER, J.; v. WILPERT, K. (2004): Soil- and Water Conservation at the Kleine Kinzig Drinking Water Dam. Eurosoil-Excursion Guide No.10, Freiburg, 1-12.

- RASPE, S.; FEGER, K.H.; ZÖTL, H.W. (Hrsg.) (1998): Ökosystemforschung im Schwarzwald – Auswirkungen von atmosphärischen Einträgen und Restabilisierungsmaßnahmen in Fichtenwäldern. Verbundprojekt ARINUS, Reihe Umweltforschung in Baden-Württemberg, Ecomed-Verlag, Landsberg, 533 S.
- SCHÄFFER, J.; GEIßEN, V.; HOCH, R.; v. WILPERT, K. (2001): Waldkalkung belebt Böden wieder. In: AFZ-Der Wald, 56. Jahrgang, 21/2001, 1106-1109.
- SCHÄFFER, J.; GEIßEN, V.; v. WILPERT, K. (2001): Waldkalkung: Düngung oder Bodenschutz? In: Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft, Freiburger Forstliche Forschung, Band 18, 320-331.
- VOLKMANN, J.; v. WILPERT, K. (1999): Modellversuch „Stimpfach“. Unveröffentlichter Projektbericht.
- v. WILPERT, K. (2001): Waldböden – Grundlage für die Multifunktionalität von Wäldern. In: Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft, Freiburger Forstliche Forschung, Band 18, 287-297.
- v. WILPERT, K.; KOHLER, M.; ZIRLEWAGEN, D. (1996): Die Differenzierung des Stoffhaushalts von Waldökosystemen durch die waldbauliche Behandlung auf einem Gneisstandort des Mittleren Schwarzwaldes (Ergebnisse aus der Ökosystem-Fallstudie Conventwald). Mitt. FVA, H. 197, 94 S.
- v. WILPERT, K.; MIES, E. (1991): Räumliche Heterogenität des Bodenwasserflusses unter Wäldern. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch, 66, II, 1047-1050.
- v. WILPERT, K.; ZIRLEWAGEN, D.; KOHLER, M. (2000): To what extent can silviculture enhance sustainability of forest sites under the immission regime in Central Europe? Water, Air and Soil Pollution 122, 105-120.
- ZIRLEWAGEN, D.; v. WILPERT, K. (2001): Was hat Waldbau mit Trinkwasserversorgung zu tun? In: Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft, Freiburger Forstliche Forschung, Band 18, 309-319.