



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR
UMWELT, LANDWIRTSCHAFT,
ERNÄHRUNG, WEINBAU
UND FORSTEN

Martin Greve

LANGFRISTIGE AUSWIRKUNGEN DER WALDKALKUNG AUF DEN STOFFHAUSHALT

Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 73/15



Landesforsten
Rheinland-Pfalz

Impressum

Herausgeber:

Zentralstelle der Forstverwaltung
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF)
Hauptstr. 16
D-67705 Trippstadt
Telefon 06306 911-0, Telefax 06306 911 200
zdf.fawf@wald-rlp.de
www.fawf.wald-rlp.de

Verantwortlich:

Der Leiter der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

Dokumentation:

Mitteilung FAWF, Trippstadt
Nr. 73/15, 333 Seiten

Gestaltung, Grafik und Satz

FAWF Rheinland-Pfalz

ISSN 1610-7705 Mitteilungen aus der
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 73/15
zu beziehen über die
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz,
Schloss, D-67705 Trippstadt, Telefon 06306 911-0, Telefax 06306 911-200
zdf.fawf@wald-rlp.de

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Titelbild:

links: Versuchsfläche Hochspeyer Mitte: Versuchsfläche Adenau Rechts: Versuchsfläche Idar-Oberstein

Foto: M. Greve

Martin Greve

Vom Fachbereich VI
(Raum- und Umweltwissenschaften)
der Universität Trier
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigte Dissertation

LANGFRISTIGE AUSWIRKUNGEN DER WALDKALKUNG AUF DEN STOFFHAUSHALT

Betreuender:
apl. Prof. Dr. Willy Werner

Berichterstattende:
apl. Prof. Dr. Willy Werner
apl. Prof. Dr. Gebhard Schüler
Dr. Joachim Block

Datum der wissenschaftlichen Aussprache:
11. Mai 2015

Zentralstelle der Forstverwaltung
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Rheinland-Pfalz,
Trippstadt 2015

Kurzfassung

Einleitung und Zielsetzung

Seit dem späten 19. Jahrhundert ist in Mitteleuropa und Nordamerika von einer Zunahme des anthropogen bedingten Säureeintrags auszugehen. Erste Messdaten der Deposition, die seit den 1930er Jahren für Mitteleuropa und Nordamerika vorliegen, und durchgehende Messreihen mit Beginn in den 1960er Jahren zeigen bereits hohe Säurebelastungen, welche die auf natürliche Emissionen zurückführbaren Belastungen deutlich überschreiten. Seit den 1980er Jahren ist ein Rückgang des Säureeintrags, vor allem durch greifende Luftreinhaltemaßnahmen hinsichtlich Schwefeldioxid, zu verzeichnen. Allerdings liegt die Emission von ebenfalls versauernd wirkenden Stickstoffverbindungen weiterhin auf einem hohen Niveau.

Von dem Eintrag versauernd wirkender Verbindungen waren und sind Waldgebiete aufgrund ihrer hohen Kronenraum-Oberfläche und ihrer häufig exponierten Lage besonders betroffen. Dies führt, zusammen mit der über Jahrhunderte stattgefundenen Übernutzung, zu einer großflächigen Versauerung der Böden und der damit zusammenhängenden Mobilisierung von Aluminium und Schwermetallen, dem Verlust von Base Kationen, Al Toxizität im Wurzelraum und Störungen in der Nährstoffversorgung der Bestände. Dabei sind die Pufferkapazität und die Sensibilität gegenüber der Säurebelastung vor allem von der chemischen Zusammensetzung des geologischen Ausgangssubstrates abhängig. Da bessere Standorte in Deutschland zumeist landwirtschaftlich genutzt werden, stockt Wald häufig auf ärmeren Böden mit geringer Pufferkapazität. Für Rheinland-Pfalz ist dies für mehr als zwei Drittel der Waldfläche der Fall.

Aufgrund dieses hohen Anteils versauerungsgefährdeter Waldböden wurden in Rheinland-Pfalz frühzeitig großflächig Bodenschutz-Kalkungen durchgeführt, um die negativen Auswirkungen des Säureeintrags zu kompensieren. Dabei stehen die Kompensation des aktuellen Säureeintrags und die Reaktivierung ökosystem-interner Nährstoffkreisläufe im Vordergrund. Zur wissenschaftlichen Begleitung der Bodenschutzkalkung wurden 1988 der „*Vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffen in Waldökosystemen*“ (kurz: Kompensationsversuch) mit Kalksteigerungsvarianten als Parzellenversuch eingerichtet, auf denen die Daten der vorliegenden Arbeit erhoben wurden. Für jede Variante, die mit einer Dosierung von 3, 5, 9 und 15 t dolomitischen Kalks ha⁻¹ sowie teilweise mit zusätzlicher Phosphor- und Kaliumdüngung behandelt wurden, als auch für die unbehandelte Kontrolle sind zwei räumliche Wiederholungen vorhanden. Die Anlage erfolgte auf basenarmen, versauerten Waldstandorten auf in Rheinland-Pfalz häufig vorkommenden Bodensubstraten. Die Versuchsflächen Adenau (Decklehm über devonischer Tonschiefer) und Idar-Oberstein (Decklehm über Quarzschutt) sind mit Fichte und die Versuchsfläche Hochspeyer (Sande des Mittleren Buntsandsteins) mit einem Kiefernbestand mit zwischen- und unterständiger Buche bestockt.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, zunächst die Entwicklung des Säure-Base-Zustands der unbehandelten Kontrolle zu untersuchen, um festzustellen, ob die Kalkung der drei Versuchsflächen zur Kompensation der Säurebelastung erforderlich war und unter den aktuellen Bedingungen weiterhin

erforderlich ist. Des Weiteren sollte der Verbleib der mit den unterschiedlich dosierten Kalkgaben ausgebrachten Nährstoffe Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) im Ökosystem verfolgt werden sowie eine Betrachtung der Wirkungsdauer hinsichtlich der Säureneutralisationskapazität erfolgen. Zudem sollten die in der Literatur kontrovers diskutierten Veränderungen im Elementhaushalt, insbesondere von Stickstoff (N), Phosphor (P), Schwefel (S), Kalium (K) und Aluminium (Al), betrachtet werden. Auch die Auswirkungen auf die Ernährung und den Zuwachs der aufstockenden Bestände wurde mit verschiedenen Verfahren bewertet. Zur Erklärung dieser auf den drei Versuchsflächen der vorliegenden Arbeit standörtlich teils deutlich voneinander abweichenden Reaktionen, wurden chemische Parameter des Bodens und des Sickerwassers sowie Unterschiede in der Bestockung, der Kalkdosis und dem zeitlicher Abstand zur Kalkausbringung herangezogen.

Als zentrales Beurteilungselement wurden in der vorliegenden Arbeit Stoffbilanzen erstellt, um die langfristigen Auswirkungen der Kalkung auf den Stoffhaushalt und die Versauerung zu untersuchen. Die Einträge in das Ökosystem setzten sich aus der atmogenen Deposition, der Freisetzung von Elementen durch die Mineralverwitterung und der Kalkung und Düngung zusammen. Relevante Austräge sind die Auswaschung mit dem Sickerwasser und der Export von Elementen mit der Holzernte. Die Berechnung der Stoffflüsse geschah auf Basis der 24 Jahre umfassenden Zeitreihen zur Sickerwasser- und Depositionsmessung. Zu Beginn des Promotionsprojektes wurde zudem der aufwachsende Bestand detailliert gemessen und beprobt, sodass eine Modellierung des Zuwachses und der Elementfestlegung in der Biomasse im Beobachtungszeitraum 1989 bis 2012 ermöglicht wurde. Die Elementfreisetzung aus der Mineralverwitterung wurde mittels einer im Rahmen der Bund-Länder Arbeitsgruppe BZE fehlerbereinigten und hinsichtlich in Deutschland häufig vorkommender Minerale erweiterten Version des Modells PROFILE berechnet. Zum Vergleich der Bilanzen mit den Element-Vorräten des Ökosystems wurden zusätzlich Bodenproben zur Ermittlung der Nährelementvorräte gewonnen.

Versauerung

Die Ergebnisse zeigen, dass auf der unbehandelten Kontrolle der drei Versuchsflächen der Eintrag versauernd wirkender Verbindungen die Pufferkapazität des Ökosystems durch Base-Kationen (Ca, K, Mg, Na) im gesamten Beobachtungszeitraum überschreitet. Der atmogene Eintrag von N-Verbindungen und die Mobilisierung von im Boden in Zeiten hoher Sulfat-Deposition aufgespeicherten Sulfaten stellt zurzeit das größte Versauerungsrisiko dar. Zusätzlich führt die Bildung von Biomasse durch die Aufspeicherung von Nährstoff-Kationen zu einer Säurebelastung, die bei deren Mineralisation rückgängig gemacht werden würde. Wird die Biomasse jedoch exportiert führt dies zu einer Versauerung des Ökosystems, die mit zunehmender Nutzungsintensität ansteigt.

Diese Überschreitung der Pufferkapazität durch Base-Kationen führt zu einer verstärkten Freisetzung von Aluminium aus den Zwischenschichten der Tonminerale. Dadurch findet eine Umwandlung der

Tonminerale statt, die eine Veränderung ihrer Eigenschaften und Funktionen in Boden mit sich zieht. Zum einen wird deren Fähigkeit reduziert Nährstoff-Kationen zu speichern, zum anderen mündet eine länger anhaltender Säurebelastung in eine Destabilisierung, die schließlich zu einer irreversiblen Zerstörung der Tonminerale führt. Diese Verschlechterung des Zustandes lässt sich im Oberboden der Kontrollen der drei Versuchsflächen beobachten. Das im Zug der Destabilisierung freigesetzte Aluminium führt für den aufwachsenden Bestand zu einer Hemmung der Nährstoffaufnahme und kann das Wurzelwachstum beeinträchtigen. Zudem belastet dessen Auswaschung mit dem Sickerwasser die angrenzenden aquatischen Ökosysteme oder das Grundwasser.

Diese Befunde verdeutlichen die Dringlichkeit, die Deposition von versauernd wirkenden Verbindungen auch über die geplanten EU National Emission Ceilings (NEC) ab dem Jahr 2030 hinaus weiter zu reduzieren und den Entzug von Alkalinität mit der Holzernte an den Standort anzupassen. Solange die Säurebelastung das Puffervermögen der Waldstandorte übersteigt, ist eine Bodenschutzkalkung erforderlich, um eine weitere Destabilisierung der Tonminerale und damit einen nicht reversiblen Verlust wichtiger Reglerfunktionen des Wasser- und Stoffkreislaufs zu verhindern.

Die in den meisten Bundesländern praxisübliche Dosierung von 3 t Dolomit ha⁻¹ sorgt für eine Entlastung des Aluminium-Puffers und damit zu einem Schutz der Tonminerale. Dies äußert sich auf den drei Versuchsflächen in einer Verbesserung der qualitativen Versauerungsindikatoren Basensättigung, pH-Wert, BC/Al-Verhältnis und Aciditätsgrad. Jedoch zeigt sich nach 24 Jahren auf den stärker belasteten Flächen Adenau und Idar-Oberstein ein Nachlassen hinsichtlich dieser Kalkungswirkungen. Zwar weisen die Varianten mit höherer Kalkdosis eine längere Wirkungsdauer und eine leicht verbesserte Tiefenwirkung auf, jedoch ist von einer Erhöhung der Kalkdosis nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit abzuraten, da insbesondere das Risiko für eine Mobilisierung von Anionen und damit einer Öffnung der Stoffkreisläufe des Ökosystems erhöht wird und zudem die Wirkungsdauer nicht im gleichen Maße mit der Kalkdosis ansteigt.

Schon eine Kalkung mit 3 t Dolomit ha⁻¹ erhöht das Risiko für einen Austrag von Nitrat und Sulfat mit dem Sickerwasser, was zu einem Verlust von Kationen und einer äquivalenten Versauerung führt. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen jedoch, dass diese bei Mobilisierung von Sulfat und Nitrat hervorgerufene Säurebelastung durch die Auflösung der mit der Kalkung ausgebrachten Carbonate kompensiert wird und diese Anionen hauptsächlich von Mg und nicht verstärkt von Al oder Schwermetallen begleitet werden. Auf der unbehandelten Kontrolle werden die durch den ehemals lang anhaltenden und hohen Sulfateintrag im Boden aufgebauten Sulfatvorräte zwar langsamer abgebaut, allerdings belegen die Ergebnisse, dass damit kein geringerer Austrag von Al verglichen mit den Kalkungsvarianten verbunden ist. Demnach ist ohne Kalkung mit einem längerfristigen Kationenverlust und einer längerfristigen Belastung für das oberflächennahe Grundwasser durch Al zu rechnen.

Ca- und Mg-Bilanz

Der Hauptaustragsweg von Mg ist die Verlagerung mit dem Sickerwasser und wird somit vor allem durch die Anionenfracht bestimmt. Wenn lediglich die Festlegung in Derbholz und Rinde als Austrag angesehen wird, weist die Fläche Adenau auf den Kontrollparzellen annähernd ausgeglichene Mg Bilanzen im Beobachtungszeitraum, die Flächen Idar-Oberstein und Hochspeyer hingegen negative Mg Bilanzen auf. Die Ca Bilanzsalden der Kontrolle sind ohne Berücksichtigung der Ca Festlegung in der Biomasse auf allen Flächen positiv. Bereits die Festlegung in Derbholz und Rinde führt jedoch zu negative Bilanzen, was verdeutlicht, dass für Calcium der Entzug mit der Holzernte ein bedeutenderer Austragsweg als für Magnesium darstellt. Um diesem Verlust entgegenzuwirken spielt demnach bei Ca die Nutzungsintensität (Derbholz, Vollbäume) eine bedeutsame Rolle, wohingegen bei Mg vornehmlich die Reduktion des ausgetragenen Nitrat und Sulfat zu einer allmählichen Schließung des Stoffkreislaufs führt.

Die Kalkung mit 3 t ha^{-1} bewirkt, mit Ausnahme einer von vier Parzellen in Adenau, auf den drei Versuchsflächen positive Bilanzen für Ca und Mg im Untersuchungszeitraum, sodass auch bei einer Nutzung der gebildeten Biomasse und dem damit verbundenen Entzug aus dem ökosystemaren Nährstoffkreislauf keine Reduktion der Ca- und Mg Vorräte stattfindet. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit der von der Bilanz unabhängigen Vorratsberechnung anhand der Bodenprobenahme, die ebenfalls höhere Ca- und Mg Vorräte auf den Kalkungsvarianten gegenüber der Kontrolle ergibt. Aufgrund der nur begrenzten Steuermöglichkeiten des Mg Austrags ist auch weiterhin der Einsatz von Kalken mit einem hohen Mg Anteil ratsam.

Die bislang angenommene Wirkungsdauer von nur 10 Jahren wird auf allen Versuchsflächen deutlich überschritten und liegt je nach Standort zwischen 20 und 40 Jahren. Dabei ist anzumerken, dass die Auswaschungsverluste von Ca und Mg in Hochspeyer trotz der Bodenart lehmiger Sand geringer sind als auf den beiden Standorten mit bindigeren Böden, was durch die geringere Verlagerung von Sulfat und Nitrat bedingt ist. Demnach sind sandige Standorte keinesfalls generell von Kalkungsmaßnahmen auszuschließen, weil, wie in der Literatur dargestellt, Bindungsplätze für die Basekationen fehlen. Stattdessen ist auf den sandigen Substraten sogar von einer längeren Wirkungsdauer auszugehen und zudem dürften aufgrund der zumeist geringeren Kationenaustauschkapazität bereits vergleichsweise niedrige Kalkdosen ausreichend sein, um die Basensättigung wirksam anzuheben.

Stickstoff

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass durch die Kalkung die Nitrifikation gefördert wird. Dies führt vor allem auf dem Standort Adenau, der unter den drei Versuchsflächen die höchsten N Einträge aufweist, zu einem Anstieg des Nitrataustrags mit dem Sickerwasser. Schon auf der Kontrolle liegt der Stickstoffaustrag über $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und damit deutlich oberhalb der Austräge von Idar-Oberstein (2 kg

ha⁻¹ a⁻¹) und Hochspeyer (< 1 kg ha⁻¹ a⁻¹). Nach der Kalkung tritt eine Verschärfung des ohnehin gespannten Zustands ein. Ein Verzicht auf die Kalkung auf Standorten nahe der N Sättigung dürfte jedoch lediglich den Zeitpunkt, an dem größere Stickstoffmengen das Ökosystem in Form von Nitrat verlassen, hinausschieben. Dies erscheint nur sinnvoll, wenn die N Deposition reduziert werden kann, bevor eine N Sättigung des Ökosystems eintritt. Nach den aktuellen Emissionszielen und Hochrechnungen zu urteilen ist jedoch in absehbarer Zeit nur mit einer geringen Reduzierung des N-Eintrags in Wälder zu rechnen. Ohne Kalkung schreitet insbesondere auf diesen Standorten die Bodenversauerung, Destabilisierung der Tonminerale und Al Austräge mit dem Sickerwasser fort.

Der Fichtenbestand in Idar-Oberstein reagiert hingegen auf die Kalkung mit einer Zunahme der N Festlegung im Holz, was im Falle eines Exports der Biomasse mit der Holzernte zu einem höheren, der Eutrophierung entgegenwirkenden N Export führt und einer Verlagerung von N in Richtung Grundwasser vorzubeugen kann. Die Kalkung könnte in diesem Zusammenhang als Instrument dienen, um das mit dem Export der Biomasse ebenfalls entzogene Mg und Ca wieder zurückzuführen und die Säurebelastung zu kompensieren. Dabei bleibt zu berücksichtigen, dass neben N, Mg und Ca durch diese Behandlung dem Ökosystem auch andere Nährstoffe entzogen werden. Diese müssten bei negativen Bilanzen ebenfalls zurückgeführt werden, beispielsweise durch ein Dolomit-Holzaschegemisch.

Der Austrag von N ist stets, sowohl mit dem Sickerwasser als auch durch den Export mit der Biomasse, mit einer Versauerung gekoppelt. Lediglich auf gasförmige N Verluste trifft dies nicht zu, welche jedoch die Atmosphäre belasten. Die einzige ökosystem-verträgliche Maßnahme gegen eine N-Sättigung des Ökosystem bleibt eine stärkere Reduktion der N Emissionen.

Bestandesernährung

Auf den drei Versuchsflächen wurde der Ernährungszustand der aufwachsenden Bestände hinsichtlich Ca und Mg durch die Kalkung verbessert und die teils auf der Kontrolle herrschenden Mangelzustände behoben. Die Kalkung von 3 t ha⁻¹ sorgt für höhere Ca- und Mg-Konzentrationen vor allem in den älteren Nadeln. Die fehlende Umverteilung von Mg von alten in rezente Nadeln deutet nach der Bewertung von Reemtsma (1986) auf eine ausreichende bis optimale Versorgung der Bäume dieser Variante hin. Auch die Berechnungen der multivariaten Compositional Nutrient Diagnosis (CND) ergeben, dass diese niedrig dosierte Kalkung für eine Verbesserung der Mg Ernährung ausreichend ist. Zudem zeigt dieses Verfahren deutlich, dass die Kalkung zu einer ausgeglicheneren Ernährung führt, da durch die Zufuhr von Ca und Mg das auf allen Flächen vorhandene Ungleichgewicht zwischen N und anderen Nährelementen reduziert wird.

Sowohl der Abgleich mit ernährungskundlichen Grenzwerten, die Nährstoffverhältnisse, die insgesamt im Bestand festgelegte Menge an Kalium als auch die Ergebnisse der CND weisen insbesondere auf den Kalkungsvarianten der beiden Fichtenbestände auf eine Unterversorgung von K hin. Da auf der Kalkungsvariante mit zusätzlicher K Düngung in Adenau und Idar-Oberstein der stärkste Höhenzuwachs im Beobachtungszeitraum gemessen wurde, ist von einem tatsächlichen Mangel auszugehen. Da allerdings der Biomassezuwachs aller Kalkungsvarianten dennoch über dem der Kontrolle liegt, dürfte auf den drei

Versuchsflächen die Verbesserung der Mg- und Ca Ernährung, die geringeren Al und Mn Konzentration im Sickerwasser sowie das ausgeglichene Verhältnis von N zu anderen Nährstoffen, ausgenommen K, eine größere Rolle für die Bestandesernährung spielen.

Auf den Versuchsflächen der vorliegenden Arbeit zeigen sowohl die P Konzentrationen der Nadeln und Blätter als auch der Biomassekompartimente keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrolle und den Kalkungsvarianten ohne P Düngung. Dennoch ist die in der Biomasse festgelegte P Menge auf allen Versuchsflächen auf der Kontrolle niedriger als bei den Kalkungsvarianten. Dies deutet auf eine höhere P Aufnahme auf den gekalkten Varianten hin und spiegelt sich, wegen der Verdünnung durch den Mehrzuwachs nicht in den Konzentrationen der Kompartimente wider.

Die zusätzliche P Düngung führt zu einer langfristigen Verbesserung der P Versorgung, was sich in erhöhten P Konzentrationen der Nadel und Blätter sowie der restlichen Kompartimente zeigt. Eine langfristige Festlegung des P in schwerlöslichen Verbindungen findet nicht statt. Ein gesteigerter Austrag mit dem Sickerwasser ist auf den Varianten mit P Düngung nicht zu verzeichnen, sodass von einer langfristigen Speicherung des ausgebrachten P im Ökosystem auszugehen ist.

Zuwachs

Auf den drei Versuchsflächen führt die Kalkung zu einer Steigerung der Zuwachsleistung der aufwachsenden Bestände, auch wenn die geringe Parzellengröße und Unterschiede in der Bestandesstruktur zum Versuchsbeginn bei der Bewertung beachtet werden müssen. Ertragskundliche Untersuchungen waren bei der Anlage der Versuchsflächen nicht Ziel des Kompensationsversuchs, da die Waldkalkung den Bodenschutz und nicht ein besseres Wachstum zum Ziel hat. Der höhere Zuwachs auf den gekalkten Parzellen zeigt, dass die Kalkung die Wuchsbedingungen und Nährstoffverfügbarkeit auf den drei Versuchsflächen der vorliegenden Arbeit verbessert. Die Steigerung des Zuwachses wird dabei nicht auf alle Individuen der Kalkungsvarianten gleichmäßig verteilt, sondern fällt vor allem durch die in den Vordergrund tretende Konkurrenz um Licht auf vorherrschende Individuen des Bestandes. Durch die bessere Nährstoffversorgung sind diese größeren Individuen in der Lage ihren höheren Lichtgenuss besser auszunutzen und dadurch ihre Zuwachsleistung zu erhöhen. Die Kalkung trägt so zur Differenzierung der Bäume und Verbesserung der Bestandesstruktur bei.

Wie der Fichtenbestand, zeigen auch die 2006 in Idar-Oberstein als Voranbau gepflanzten Buchen eine Steigerung des Höhenwachstums auf den gekalkten Parzellen, das mit zunehmender Kalkdosis ansteigt, und eine Abnahme der Mortalität. Diese Faktoren spielen eine entscheidende Rolle beim Waldumbau von Fichtenreinbeständen hin zu buchenreichen Mischbeständen, da nicht nur die Wahrscheinlichkeit einer Etablierung der Voranbau-Buchen steigt, sondern auch der Zeitraum, bis die Pflanze eine vor Ver-
biss sichere Wuchshöhe erreicht hat, verkürzt wird.

Ausblick

Die mittlerweile rückläufigen Sulfatfrachten im Sickerwasser und die geplante Reduktion der N Emissionen dürften langfristig zu einer Verminderung der Nährstoffverluste und der Versauerung führen. Jedoch zeigen die Ergebnisse, dass bis dahin auf schwach basenversorgten Standorten wie den Versuchsflächen der vorliegenden Arbeit, die Kalkung weiterhin nötig bleibt, wenn auch in immer weiteren Zeitabständen von voraussichtlich 20 bis 40 Jahren. Die für die Untersuchung der Langzeiteffekte von Bodenschutzkalkungen wertvollen Versuchsanlagen sollten unbedingt erhalten, weiter betreut und untersucht werden. Um die in der Praxis in Rheinland-Pfalz stattfindende Wiederholungskalkung wissenschaftlich zu begleiten, sollten auf den Versuchsflächen der vorliegenden Arbeit ausgewählte Varianten mit einer weiteren Kalkgabe behandelt werden. Von Interesse ist dabei insbesondere, ob nach einer Wiederholungskalkung abweichende Effekte verglichen mit einer Erstkalkung auftreten.