Forstliche Versuchs-
und Forschungsanstalt
Baden-Württemberg

Merkblatt 54/2013

Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung

ForstBW

Baden-Württemberg

Impressum

Herausgegeben und zu beziehen durch:
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestrasse 4
79100 Freiburg
www.fva-bw.de

Verfasser:
Dr. Klaus v. Wilpert
Dr. Peter Hartmann
Dr. Jürgen Schäffer

Titelbild:
Andreas Knobloch

Erscheinungsjahr 2013
Alle Rechte vorbehalten

MERKBLÄTTER DER FORSTLICHEN VERSUCHS-
UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG
Heft 54/2013

Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung

Inhalt

1 Problemstellung und Hintergrund 1
2 Herleitung des Kalkungsbedarfs zur Regeneration des natürlichen Bodenzustandes 4
3 Wirkung der Bodenschutzkalkung 7
3.1 Wirkung der Kalkung auf die Bodenchemie 7
3.2 Wirkung der Kalkung auf die Humusform 11
3.3 Wirkung der Kalkung auf die Bodenbiologie 11
3.4 Wirkung der Kalkung auf die Durchwurzelung 13
3.5 Ernährungswirkung der Kalkung 15
4 Nutzen und Risiken der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung 18
5 Technische Umsetzung des Programms zur regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung 21
5.1 Verwendete Materialien 21
5.1.1 Dolomitische Gesteinsmehle trocken oder angefeuchtet 21
5.1.2 Erdfeuchte Kalke 22
5.1.3 Dolomitisches Gesteinsmehl granuliert 22
5.1.4 Dolomit-Holzasche-Mischung 23
5.1.5 Silikatische Gesteinsmehle 25
5.1.6 Neutralsalzdünger, Stickstoff- und Phosphatdünger 25
5.2 Sicherung der Materialqualität bei der Bodenschutzkalkung 25
5.3 Ausbringungstechnik 27
5.4 Zeitpunkt der Ausbringung 28
5.5 Berücksichtigung von Schutzgebieten 28
5.6 Regionale und lokale Vorplanung und Dokumentation der Kalkungsmaßnahmen 30
5.7 Bodenkundliche Grundlagen der Kalkungsplanung 30
5.8 Einbeziehung von Ausschlussflächen 32
5.9 Maßnahmenplan: Grundlage für die lokale Planung 32
5.10 Dokumentation 36
6 Zusammenfassung 37
7 Literatur 38

1 Problemstellung und Hintergrund

Hauptursache für die Schädigung von Wäldern und ihren ökosystemaren 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.

Durch die Arbeit des Forstwissenschaftlers FRANK (1927) „Über Bodenazidität im Walde“ können wir einen direkten Vergleich frühindustrieller Bodenversauerung mit heutigen Versauerungsintensitäten durchführen. FRANK führte pH-Messungen an ca. 2500 Bodenproben aus dem Schwarzwald und Odenwald durch und dokumentierte sowohl die exakte Lage der Probenahmepunkte als auch die Messmethoden. Hierdurch war ein verlässlicher Vergleich mit aktuellen Säurestärken an diesen Waldorten möglich (Abbildung 1).

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 1,5 - 2,5 pH-Stufen. Lediglich die podsolierten, natürlich sauren Oberböden auf Granit sind weniger versauert. Das bedeutet, dass die chemische Diversität der Habitate für Flora und Fauna in den Wäldern Baden-Württembergs innerhalb von 65 Jahren durch „Sauren Regen“ in allen nicht kalkhaltigen Böden massiv abgenommen hat. Der Versauerungszustand all dieser Flächen entspricht heute großflächig demjenigen der natürlich nur kleinflächig verbreiteten, stark sauren Böden. Dadurch werden grundsätzliche Bodenfunktionen erheblich beeinträchtigt und teilweise gänzlich zerstört.

Saurer Regen hat insbesondere im 20. Jh. den Zustand der Waldböden nachhaltig beeinflusst. Auf seinem Weg durch den Boden wurden sehr viele 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.

Dies betrifft die Eignung der Böden 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.

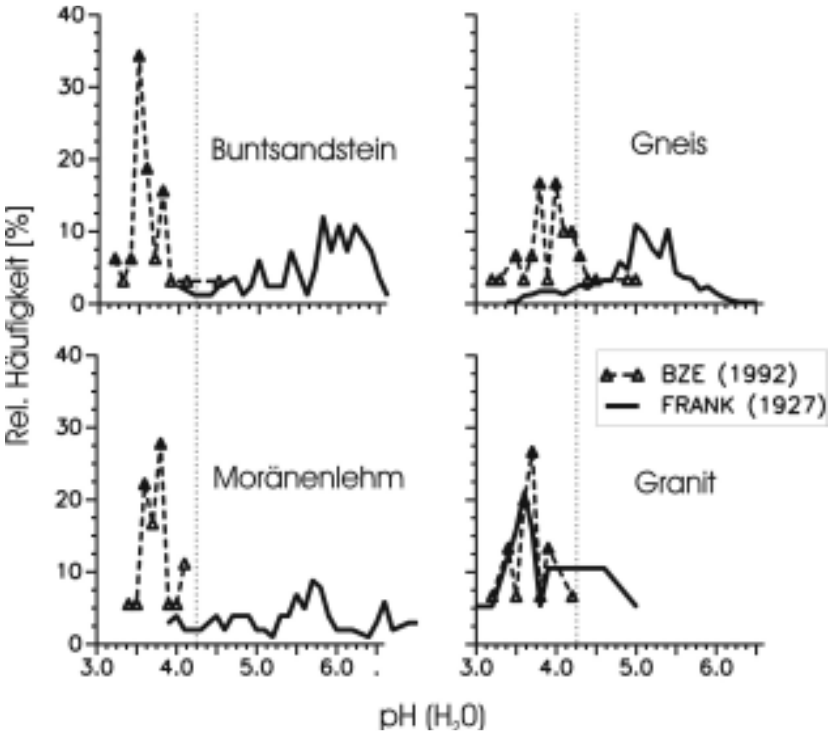


Abbildung 1: Verschiebung der Häufigkeitsverteilungen der pH (H_2O)-Werte im obersten Mineralboden (0-5cm) auf Buntsandstein (links oben), Gneis (rechts oben), Moränenlehm (links unten) und Granit (rechts unten) zwischen den Jahren 1927 und 1992 (FRANK, 1927, BUBERL et al., 1994). Gestrichelte Referenzlinie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

Zum Schutz der Bodenqualität wurden deshalb in Baden-Württemberg seit 1983 in allen Waldbesitzarten Bodenschutzkalkungen mit dem Ziel durchgeführt, die aktuellen Säureeinträge zu neutralisieren und so einer weiteren Bodenversauerung und dem irreversiblen Verlust von Bodenqualität entgegen zu wirken. Dabei wurden durchschnittlich rund 15.000 ha/Jahr gekalkt. Das Ziel dieser Kalkung war die Kompensation der Säureeinträge. Darauf war die Dosierung und auch die Auswahl und Priorisierung der zur Kalkung heranstehenden Standorte abgestimmt und es wurden die versauerungsempfindlichsten, am stärksten versauerten Böden bevorzugt gekalkt, weil sich dort der Säureeintrag am akutesten auswirkte. So konnte der Bodenzustand seit 1983 nicht verbessert, sondern lediglich die Böden durch die Kalkungen vor einem Fortschreiten der Bodenversauerung geschützt werden.
Als Erfolg einer konsequenten Luftreinhaltepolitik konnten in den vergangenen Jahren die Säureeinträge auf einem Großteil der Landesfläche soweit zurückgeführt werden, dass eine weitere Bodenversauerung nur noch sehr langsam verläuft oder sogar ganz gestoppt wurde.
Tatsächlich verbleibt jedoch durch die Bodenversauerung eine depositionsbedingte Altlast, die Waldökosysteme und ihre Funktionen nach wie vor belastet. Es besteht also trotz der Reduktion von Säuredepositionen ein Sanierungsbedarf, um die natürlichen Funktionen der Waldböden wiederherzustellen.
Zur effizienten und dauerhaften Regeneration essenzieller Bodenfunktionen bedarf es daher eines langfristigen Kalkungskonzeptes, das nicht nur die aktuellen Säureeinträge neutralisiert, sondern auch die im Boden gespeicherten und schädlichen Säuremengen abbaut.
Es besteht hiermit die Möglichkeit und Chance, durch ein standortsdifferenziertes und kleinflächig geplantes Kalkungsprogramm die natürlichen Bodenqualitäten und Bodenfunktionen langfristig wiederherzustellen. Dieses Programm ist Bestandteil der umfassenden Strategie von ForstBW zum Nachhaltigkeitsmanagement.

2 Herleitung des Kalkungsbedarfs zur Regeneration des natürlichen Bodenzustandes

Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung bedeutet, dass das Ziel nicht die Neutralisation aktueller Säureeinträge, sondern die Wiederannäherung der Bodenreaktion (pH-Wert) sowie der Basen- und Nährstoffausstattung der Böden an die natürlichen Bodenverhältnisse ist. Das bedeutet, dass die natürliche Vielfalt an Standortsqualitäten wiederhergestellt werden soll.

Grundlage für die Ableitung eines solchen, an der natürlichen Basenausstattung von Waldstandorten orientierten Kalkungskonzeptes ist die Definition eines Sollzustandes. Es liegt nahe, hierfür die „vorindustrielle“ Basenausstattung der Böden anzusetzen. Da die Daten von FRANK, 1927 jedoch nicht landesweit verfügbar sind, musste die Grundlage für ein landesweites Kalkungskonzept aus der Bodenzustandserhebung im Wald (kurz BZE) abgeleitet werden. Auf der Basis der Daten der 2007 durchgeführten BZE wurde die „Drift“ 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.

Hauptziel der Kalkung ist die Wiederherstellung der natürlichen, vorindustriellen Nährstoffausstattung.
Als Indikator wird der Vorrat an Aluminium im Unterboden genutzt. Aluminium ist das Produkt starker Bodenversauerung und entsteht durch die Auflösung von Tonmineralen. Es liegt i.d.R. in natürlich versauerten Böden nur im Oberboden vor. Größere Mengen im Unterboden sind somit als das Resultat der Versauerung durch sauren Regen anzusehen.
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 der Praxis wird dieser Kalkungsbedarf in die Anzahl an Wiederholungskalkungen von jeweils 3 t/ha Dolomitkalk umgerechnet, die alle 10 Jahre ausgebracht werden sollen.

Diese Ableitung geht von der Tatsache aus, dass in den jungen Böden Südwestdeutschlands im Unterboden durch natürliche Prozesse keine nennenswerten Aluminiumanteile an der Austauscherbelegung zu erwarten sind. Ist der Vorrat an austauschbarem Aluminium im Unterboden (60-90 cm) jedoch erhöht, kann dieser vereinfachend als die kumulierte Wirkung anthropogen bedingter Bodenversauerung aufgefasst werden und dann als Indikatorgröße für eine konservative Abschätzung der für die Regeneration der Böden

notwendigen Kalkmenge verwendet werden. In Abbildung 2 ist die dem Unterboden–Aluminiumvorrat entsprechende Anzahl an praxisüblichen Kalkungskampagnen mit 3 Tonnen Dolomit je Hektar dargestellt, die im 10-jährigen Abstand durchgeführt werden müssen, um das Basendefizit auszugleichen. Der Aluminiumvorrat wurde aus der Basensättigung und einigen den Elementvorrat bestimmenden Bodenvariablen bestimmt. 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.

Auf der Basis des in Abbildung 2 dargestellten Kalkungsbedarfs wird von einer landesweit notwendigen Kalkungsfläche von 680.000 ha (ca. 45 % der Landeswaldfläche) ausgegangen, die durchschnittlich ca. 1,8-mal gekalkt werden. Dabei sind 10 % naturschutzrelevante Flächen und sonstige Schutzbereiche entsprechend den bisherigen Regelungen von der Kalkung strikt ausgenommen. Bei der Umsetzung des Kalkungsprogramms gilt das Prinzip einer konservativen, vorsichtigen Vorgehensweise, da unklar ist, wie schnell die Kalkungswirkung ausgehend vom Oberboden den Wurzelraum „saniert“. Diese Wurzelraumsanierung soll erreicht werden, nicht eine Regeneration von für die Funktion von Waldböden weniger wichtigen Unterbodenpartien. Deshalb wird eine vorläufige Festlegung auf ein 70 %-Ziel mit der Maßgabe der Erfolgskontrolle bei der BZE 3, die 2020 vorgeplant ist, vorgeschlagen. Zu diesem Zeitpunkt soll der bis dahin erreichte Regenerationserfolg geprüft und das Programm ggf. „nachjustiert“ werden. Das bedeutet, dass für die kommenden 20 Jahre Kalkungsflächen in der Größenordnung von 420.000 ha vorgesehen werden. Konkret geplant wird das Programm bis 2021 mit einer Kalkungsfläche von 210.000 ha, also 21.000 ha pro Jahr.

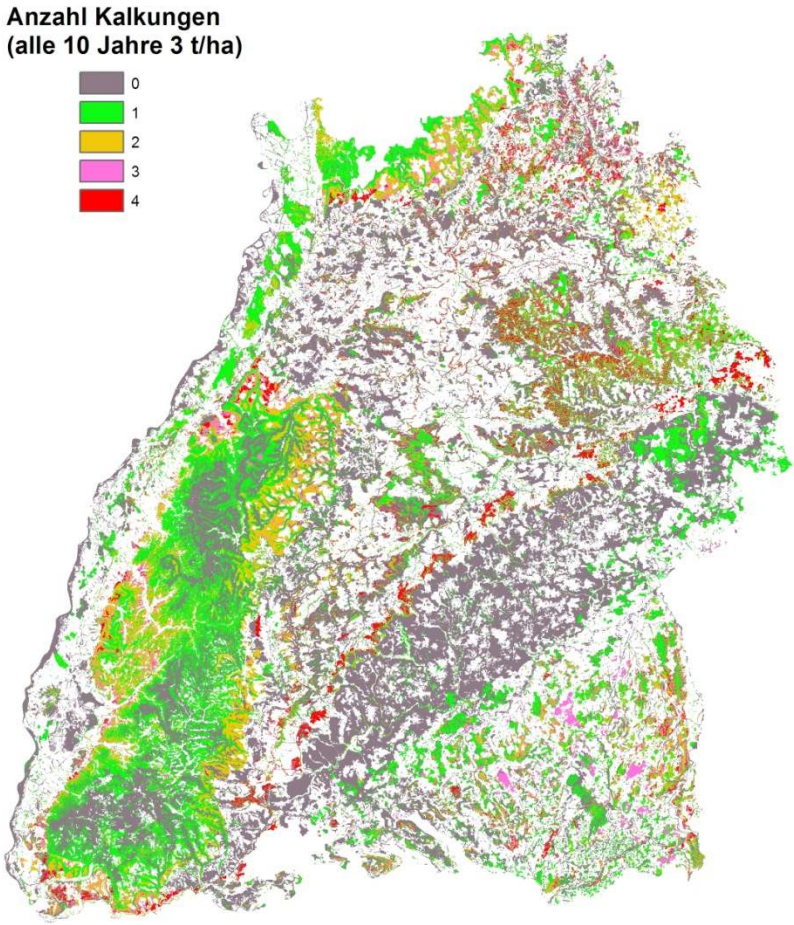


Abbildung 2: Langfristiges Konzept der Bodenschutzkalkung: die Anzahl der benötigten Kalkungen für eine Regeneration der Waldböden (je 3 t/ha im 10-jährigen Abstand) wird aus dem austauschbaren Al-Vorrat im Unterboden (60-90 cm) als Maß anthropogen bedingter Bodenversauerung abgeleitet.

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 Waldstandorte in absehbarer Zeit wiederherzustellen. Das Konzept orientiert sich, wie oben dargestellt, an der Untergrenze des aus der BZE hergeleiteten Kalkungsbedarfs und sieht zahlreiche Überprüfungsmöglichkeiten zur Nachjustierung des Programms vor.
Mit der Durchführung dieses mittelfristigen, räumlich und zeitlich klar differenzierten 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. Auch wird so das Risiko für Trockenstress und seine Folgewirkungen vermindert.

3 Wirkung der Bodenschutzkalkung

Durch landesweite sowie durch vertiefende Einzeluntersuchungen konnten die Wirkungen der Waldkalkung auf den Waldboden identifiziert werden. Neben den rein chemischen Aspekten sind Effekte auf die Umsetzungsbedingungen im Humus, die Feinwurzelverteilungen sowie die Ernährungssituation der Bestände untersucht worden.

3.1 Wirkung der Kalkung auf die Bodenchemie

Durch die regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung soll eine grundsätzliche Umstimmung des Bodenchemismus in Richtung eines naturnahen, vorindustriellen Bodenzustandes und damit eine Stabilisierung der Speicherung von basischen Elementen und gleichzeitig eine Aktivierung der Bodenbiologie erreicht werden. Die Wirkung von Praxiskalkungen lässt sich anhand von Daten der BZE im Vergleich zwischen gekalkten und ungekalkten Standorten abschätzen. In Tabelle 1 sind die jährlichen Veränderungsraten des in Wasser gemessenen pH-Werts zwischen BZE 1 (1992) und BZE 2 (2007) für ungekalkte und gekalkte Standorte dargestellt. Der pH (H_2O)-Wert bildet die aktuell wirksame Säurestärke der Böden ab, die sich direkt auf die Lebensmöglichkeiten von Fauna und Flora auswirkt und ist mit den Messungen von FRANK, 1927 (Abbildung 1) direkt vergleichbar.
Auf den ungekalkten Böden hat sich der pH-Wert im Mineralboden ganz leicht um 0,005 pH-Stufen pro Jahr, d.h. um 0,1 pH-Stufen in 20 Jahren erhöht.

Die pH-Werte stiegen auf gekalkten Flächen in den letzten 15 Jahren bis in eine Tiefe von 30 cm deutlicher an als im Rest des Landes. Dabei ist der Anstieg aber immer noch sehr moderat, eine „Schockwirkung“ geht hiervon nicht aus.

Das ist eine Reaktion auf die Reduktion der Säurestärke im Niederschlag und im Bodenwasser. Wenn man diese Änderungsrate in Relation zur durchschnittlichen Absenkung des pH–Wertes um 2 pH-Stufen zwischen 1927 und 1992 setzt, würde die natürliche Annäherung an den standortstypischen Versauerungsgrad der Böden 400 Jahre dauern. Auf den gekalkten Standorten entspricht der Anstieg der pH-Werte im Mineralboden bis 30 cm dem dreifachen Wert der nicht gekalkten Böden. Dies ist ein Beleg für die Wirksamkeit, aber auch für die milde Wirkung der Kalkung. Selbst in der obersten Schicht der Humusauflage, die direkten Kontakt zum aufgebrachten Kalk-Gesteinsmehl hat, beträgt der pH-Anstieg in 20 Jahren nicht mehr als 1 pH-Stufe. Man kann hier mit aller Sicherheit nicht von einer „Schockwirkung“ der Kalkung sprechen.

Tabelle 1: Jährliche Veränderungsrate des pH (H_2O) zwischen BZE 1 (1992) und BZE 2 (2007) auf ungekalkten und gekalkten Böden. Signifikanz der Trends: *** hochsignifikant, ** signifikant, n.s. nicht signifikant.

Δ pH (H_2O) (a^{-1})	ungekalkt			Zwischen BZE 1 und BZE 2 gekalkt		
	Median	%	Sign.	Median	%	Sign.
L+Of	0.008	0.18	*	0.047	1.35	**
Oh	0.006	0.17	*	0.001	0.23	n.s.
0-5cm	0.006	0.12	*	0.028	0.76	***
5-10cm	0.004	0.09		0.023	0.61	**
10-30cm	0.004	0.09	*	0.013	0.32	**
30-60cm	0.005	0.09	*	0.008	0.17	**
60-90cm	0.004	0.06	**	0.006	0.15	n.s.

Ziel der Kalkung ist jedoch nicht nur die Wiederannäherung an den standortstypischen, natürlichen pH-Wert und damit die Regeneration der natürlichen Biodiversität der Standorte. Vielmehr sollen die pflanzenschädlichen, durch Bodenversauerung und Auflösung von Tonmineralen entstandenen Aluminiumionen von den Bodenaustauschern verdrängt und durch puffernde basische Ionen (Kalzium und Magnesium), die gleichzeitig für Bäume essenzielle Nährelemente sind, ersetzt werden. Den prozentualen Anteil der basischen Ionen an der Austauscherbelegung nennt man Basensättigung.

Die Basensättigung als Anteil der im Boden pflanzenverfügbar gespeicherten basischen Kationen (Ca, K, Mg, Na) zeigt auf den gekalkten Flächen eine ausgeprägt positive Entwicklung. Auf den restlichen Flächen hält immer noch die Auswaschung der Basen, nun überwiegend angetrieben durch Nitrat, an.

Tabelle 2 zeigt, dass auf den ungekalkten Flächen die Basensättigung trotz des nachlassenden Säureeintrags in den letzten 15 Jahren um durchschnittlich 0,6 Basensättigungprozente weiter abgenommen hat, während auf den gekalkten Flächen eine deutliche und statistisch signifikante Zunahme bis in 30 cm Bodentiefe zu beobachten ist, die in den obersten 10 cm des Mineralbodens in 15 Jahren knapp 10 Basensättigungsprozente beträgt.
Die Diskrepanz zwischen einer schwachen Zunahme des pH und der Abnahme der Basensättigung auf den ungekalkten Flächen ergibt sich aus der Tatsache, dass trotz der Abnahme der Säurestärke im Bodenwasser der Export von basischen Kationen durch die Aktivität von starken Mineralsäure-Anionen (überwiegend Nitrat) nach wie vor hoch ist.

Tabelle 2: Jährliche Veränderungsrate der Basensättigung zwischen BZE 1 (1992) und BZE 2 (2007) auf ungekalkten und gekalkten Böden. Signifikanz der Trends: *** hochsignifikant, ** signifikant, * schwach signifikant, n.s. nicht signifikant.

⊿ Basensättigung (% a-1)	ungekalkt			Zwischen BZE 1 und BZE 2 gekalkt		
	Median	%	Sign.	Median	%	Sign.
0-5 cm	-0.03	-0.2	n.s.	0.89	8.2	**
5-10 cm	-0.01	-0.2	n.s.	0.38	9.3	**
10-30 cm	-0.04	-0.7	*	0.15	3.4	**
30-60 cm	-0.05	-0.5	**	0.07	2.0	n.s.
60-90 cm	-0.04	-0.1	n.s.	-0.02	-0.3	n.s.

In den Waldböden Baden-Württembergs (~1.4 Mio ha) sind über 100 Mio Tonnen Kohlenstoff gespeichert. Dieser Vorrat unterliegt jedoch ständigen Schwankungen durch variable Abbaubedingungen und Waldumbaumaßnahmen. Ein verstärkter Einfluss der Kalkung ist hierbei nur schwach erkennbar.

Ein Ziel der Bodenschutzkalkung ist, den Kohlenstoffvorrat in biologisch wenig aktiven Humusauflagen zu mobilisieren und in stabileren Mineralbodenhumus umzuwandeln. Dabei ist Kohlenstoff die wesentliche Energiequelle für die Aktivität der im Mineralboden lebenden Makrofauna. Insbesondere Regenwürmer sind direkt an der Aggregatneubildung und biogenen Porenstrukturbildung beteiligt und verbessern damit indirekt Bodenbelüftung und Wurzelraumerschließung. Ein Einfluss von Kalkungsmaßnahmen auf den Humusabbau ist nur tendenziell erkennbar (Tabelle 3). Dabei ist die Tendenz eines Humusabbaus in der Humusauflage und eine damit verbundene Verlagerung organischer Substanz in den mineralischen Oberboden für die zwischen BZE 1 und 2 gekalkten Standorte bis in 30 cm Bodentiefe feststellbar. 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.

Tabelle 3: Jährliche Veränderungsrate des Kohlenstoffvorrats zwischen BZE 1 (1992) und BZE 2 (2007) auf ungekalkten und gekalkten Böden. Signifikanz der Trends: *** hochsignifikant, ** signifikant, * schwach signifikant, n.s. nicht signifikant.

Δ Vorrat C (kg ha^{-1} a^{-1})	ungekalkt			Zwischen BZE 1 und BZE 2		
	Median	%	Sign.	Median	%	Sign.
Humusauflage	-165.5	-2.7	***	-167.2	-1.7	n.s.
0-30 cm	-236	-0.4	*	131.6	0.3	n.s.
0-60 cm	-300.3	-0.5	*	-81.8	-0.1	n.s.

3.2 Wirkung der Kalkung auf die Humusform

Die Veränderung des bodenchemischen Milieus durch Bodenschutzkalkung (Anstieg des pH-Wertes und der Ca-Konzentration) führt zu einer Steigerung der mikrobiellen Aktivität und zu einer Förderung leistungsfähiger Zersetzergemeinschaften.
Abbildung 3 zeigt im Vergleich zwei Bodenprofile der Düngeversuchsflächen in Ochsenhausen. Die unbehandelte Nullfläche (links) weist keine vertikale Durchmischung und keine Einarbeitung von 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. Humusdünnschliffpräparate zeigen im Falle der unbehandelten Fläche geschichtete, horizontal eingeregelte Strukturen, deren kompakte Bereiche weitgehend erhalten geblieben sind. Im Fall der mit Dolomit behandelten Fläche ist im Dünnschliffpräparat die horizontale Schichtung weitgehend aufgehoben, die kompakten Strukturen beschränken sich auf wenige Bröckel, die in eine wolkig-krümelige Matrix eingebettet sind.

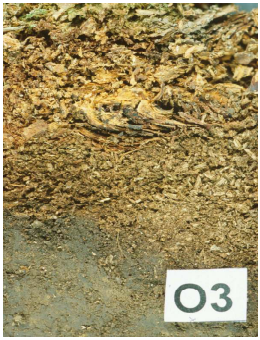
Durch Kalkung wird die mikrobielle Aktivität in der Humusauflage gesteigert und die Humusumsetzung beschleunigt. Mithilfe von im weniger sauren Milieu wieder aktiven Regenwürmern bilden sich fruchtbarere Humusformen heraus. Der Kohlenstoffvorrat aus der Humusauflage wird in den oberen Mineralboden eingearbeitet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

3.3 Wirkung der Kalkung auf die Bodenbiologie

Die genannte Veränderung der Humusform kann ursächlich auf die Zunahme von Regenwürmern zurückgeführt werden (Abbildung 4) Mit der Verbesserung des Säure-Basen-Verhältnisses werden auch die Lebensbedingungen für anspruchsvollere Bodenbewohner verbessert.

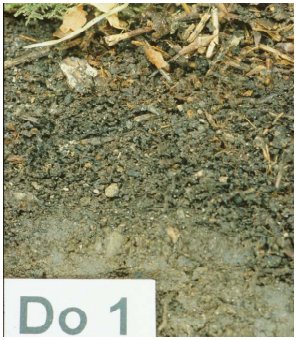
Kaliumdüngeversuchsfläche Ochsenhausen

Nullfläche, P3



O_l – Nadelstreu, Thuidium (0.5 cm)
O_f – schichtig gel. Nadelstreu (3.5 cm)
O_h – oben torfartig, bröckelig zerfallend (1.5 cm)

Dolomit, P1



O_l - Nadel-/Laubstreu (0.5 cm)
O_f – stark vernetzte Bruchstücke (1.5 cm)
O_h – locker, krümelig, biogen umgearbeitet (1.5 cm)

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

Unter pH-Werten von 4 sind Regenwürmer i.d.R. nicht mehr überlebensfähig. Die Abbildung zeigt die Verteilung von Regenwürmern in der Auflage und im A_h-Horizont auf den mit unterschiedlichen Düngesubstanzen behandelten Versuchsparzellen in Ochsenhausen. Nur auf den mit basenhaltigen Substanzen (Dolomit, Holzasche) behandelten Versuchsflächen ist ein deutlicher und statistisch zu belegender Anstieg der Lumbricidenzahlen festzustellen. Auf der unbehandelten Nullfläche liegt die Individuenzahl bei rund fünf Exemplaren pro Quadratmeter, auf den mit Dolomit und Holzasche behandelten Flächen finden sich um ein Vielfaches mehr Regenwürmer. Auf der mit Dolomit behandelten Fläche ist der Anteil von im Mineralboden lebenden Regenwürmern am höchsten.

Die biogenen, hoch kontinuierlichen Makroporen werden als Leitbahnen für die Durchwurzelung genutzt, da hier primär der Transport von Wasser und Luft stattfindet. Bevor der positive Strukturierungseffekt in den tieferen Mineralboden übergreift, kann bedingt durch die hohe Verfügbarkeit an Nährstoffen nahe der Bodenoberfläche evtl. vorübergehend eine Verflachung der Feinwurzelverteilung eintreten.

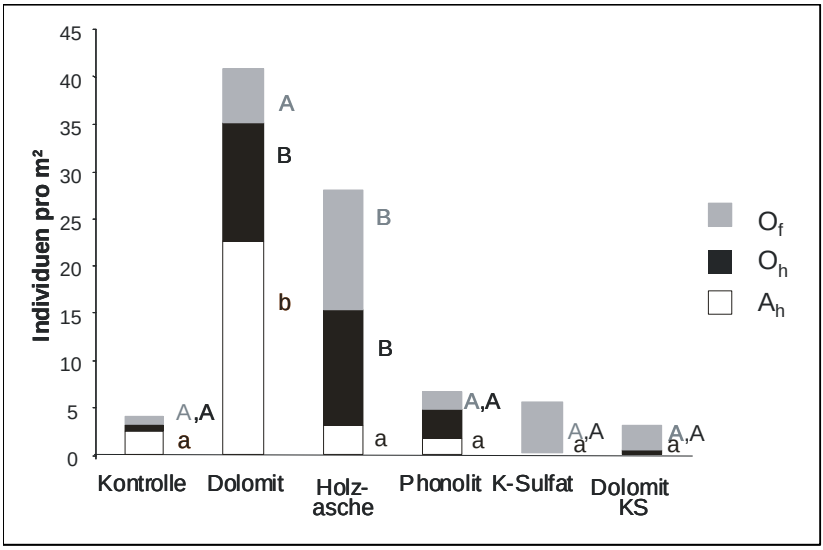


Abbildung 4: Regenwurmabundanz in der Auflage und im oberen Mineralboden beim Kaliumdüngeversuch Ochsenhausen, 6 Jahre nach der Behandlung.

3.4 Wirkung der Kalkung auf die Durchwurzelung

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 Durchwurzelung erhöht die ökosystemare Stabilität, da Wasser- und Nährstoffvorräte des Waldbodens besser erschlossen werden können. Durch die Zählung von Feinwurzeln lassen sich Veränderungen des Wurzelraumpotentials in Waldböden, ausgelöst z.B. durch Bodenschutzkalkungen, erfassen. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis von Feinwurzelzählungen auf der Versuchsfläche Ulm (Düngeversuch 39), die 1952 mit 9,2 t $CaCO_3$ gekalkt wurde. Die Durchwurzelung auf der gekalkten Fläche (Abbildung 5 rechts) ist bis in eine Bodentiefe von ca. 30 bis 40 cm signifikant höher (Abbildung 6).

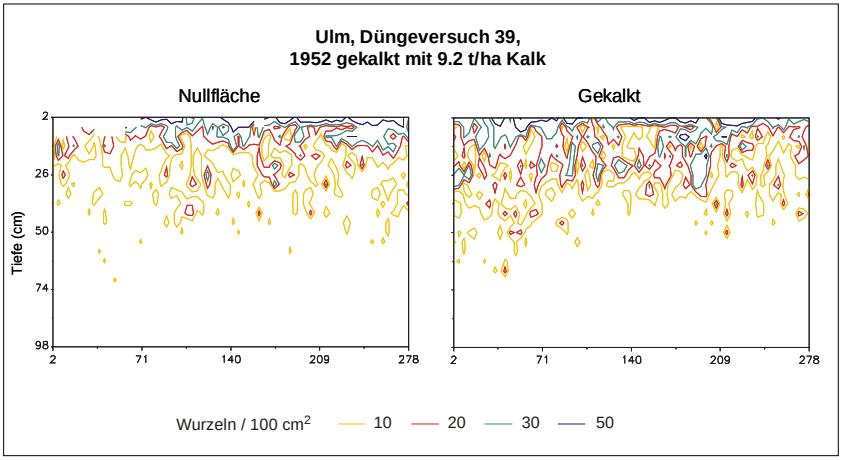


Abbildung 5: Wirkung der Kalkung auf die Durchwurzelung. Die ausgezählten Quadrate betrugen 16 cm². Aufgenommen wurden die Feinwurzeln mit Ø < 2 mm.

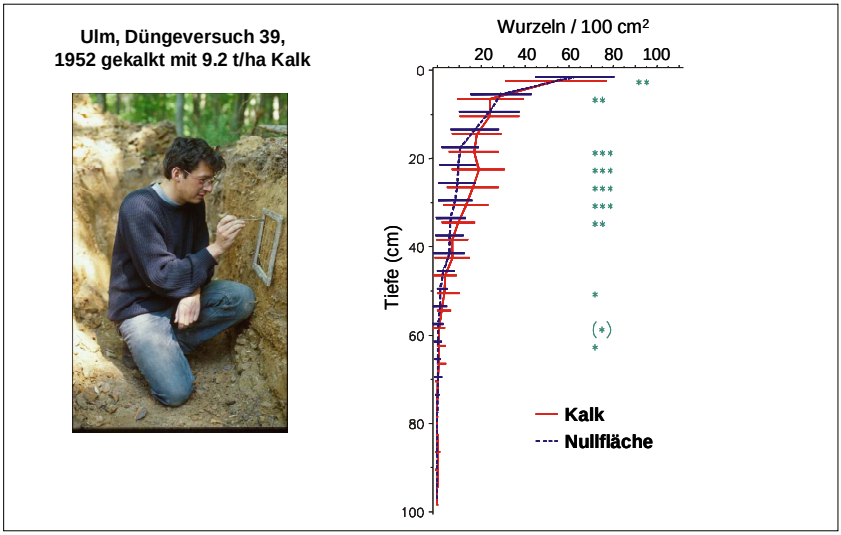


Abbildung 6: Datenermittlung im Zählquadrat (links). Statistischer Vergleich der Durchwurzelung von behandelter und unbehandelter Fläche (rechts).

3.5 Ernährungswirkung der Kalkung

Mit der Bodenschutzkalkung durch Dolomitgesteinsmehl werden die für die Waldernährung wichtigen Makronährelemente Calcium und Magnesium in schwach löslicher Form verabreicht. Beide Elemente zeigen an den BZE-Messnetzpunkten seit Beginn der 1980er Jahre einen deutlich ansteigenden Versorgungstrend in den untersuchten Nadeln (Abbildung 7). Dies ist ganz überwiegend als Effekt der Bodenschutzkalkung zu werten, da die Zunahme der Versorgung mit diesen Nährelementen auf gekalkten Flächen für den Zeitraum 1983 bis 1994 signifikant höher war als auf ungekalkten Flächen. Bei Calcium ist zu bemerken, dass dieses Element weniger als Pflanzennährstoff direkt für die Versorgung der Bäume wichtig ist, sondern eher durch seine säurepuffernden Eigenschaften und die langfristig stabilisierende Wirkung auf den Bodenkohlenstoffvorrat positiv wirkt. Dagegen ist Magnesium als Bestandteil von Chlorophyll und zahlreichen Enzymen ein essenzieller Pflanzennährstoff.

Neben diesen Hauptnährelementen sind vor allem die Spurennährelemente Kalium und Phosphor wichtig für die Ernährung der Bäume. Kalium spielt eine bedeutende Rolle in der Steuerung des Wasserhaushalts der Bäume und Phosphor für deren Energiehaushalt und dessen enzymatische Regulierung. Diese beiden Spurennährelemente werden durch die Kalkung nicht oder nur sehr indirekt beeinflusst. Beide zeigen am Anfang der Beobachtungsperiode eine ausgeprägte Abnahmetendenz, die bei Kalium bis auf eine kurzzeitige Erholungsphase bei der Aufnahme 2006 bis jetzt anhält, während bei Phosphor seit der Aufnahme 2001 eine Verbesserung der Versorgung zu erkennen ist. Im ersten Nadeljahrgang hat dies von ursprünglich nahe dem Mangelbereich liegenden Werten zu einer sehr guten Versorgung geführt. Diese Erholungstendenz kann unter Umständen eine indirekte Folge der Bodenschutzkalkung sein, da bekannt ist, dass die Phosphorversorgung der Bäume eng mit der Durchwurzelungsintensität verknüpft ist (MENGEL, 1991), die langfristig durch die Bodenschutzkalkung erhöht wird (Abbildung 5 und Abbildung 6). Bei Kalium ist der seit

Die Ernährungssituation der Bäume mit Calcium und Magnesium hat sich in den letzten Jahrzehnten auch durch die Kalkung deutlich verbessert.
Auch die Phosphorversorgung hat sich verbessert. Dies kann vermutlich mit besseren Durchwurzelungsbedingungen erklärt werden. Dahingegen erscheint Kalium landesweit als Mangelelement. Abhilfe können Holzaschebeimischungen schaffen, die schonend die Kaliumvorräte erhöhen.

30 Jahren beobachtete Abnahmetrend eine ernstzunehmende Bedrohung für die Stabilität der Wälder geworden, da mittlerweile der ganz überwiegende Teil der gemessenen Werte im Bereich schwacher bis mangelhafter Versorgung liegt. Gut versorgte Standorte gibt es bis auf wenige Ausreißer nicht mehr. Während für Calcium und Magnesium an den gekalkten Punkten zwischen 1983 und 1994 signifikant positive Änderungsraten festgestellt wurden, ist für Kalium nach Kalkung eine Tendenz zu einer angespannteren Versorgung zu erkennen, die bei luxurierender Kaliumversorgung auch signifikant ist (Tabelle 4).

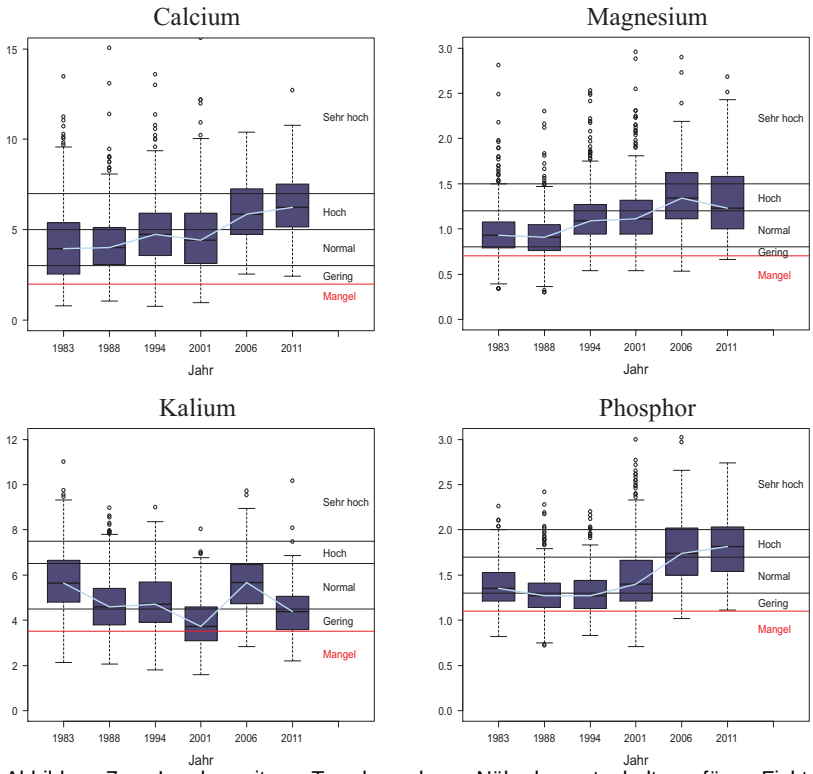


Abbildung 7: Landesweite Trends der Nährelementgehalte für Fichte, 1. Nadeljahrgang [mg/g TS] für Calcium (o. li.), Magnesium (o. re.), Kalium (u. li.) und Phosphor (u. re.). Kategorisierung der Nährelementversorgung nach EVERS (1985).

Dies kann mit einem möglichen Aufnahmeantagonismus zwischen Calcium und Kalium erklärt werden. Für Phosphor sind die Änderungsraten nicht signifikant.
Um der sich verstärkenden Tendenz zu Kaliummangel entgegenzuwirken, sind bei der Bodenschutzkalkung im Fall von nadel-/blattanalytisch nachgewiesenem Kaliummangel bisher pauschal 0,5 t/ha Kaliumsulfat (K_2SO_4) beigemischt worden. Neben den hohen Kosten war diese Beimischung auch ökologisch problematisch, da durch das hochmobile Sulfatanion (SO_4^{2-}) ein äquivalenter Anteil der mit der Kalkung verabreichten Basizität sofort nach Auflösung dieses Neutralsalzes mit dem Sickerwasser wieder ausgewaschen wird. Eine Stabilisierung der Kaliumversorgung kann kostengünstiger und ohne den ökologischen Nachteil der Basenverlagerung mit dem Sulfatanion mit 30 % Holzaschezumischung zum Dolomitgesteinsmehl erreicht werden. Die Bodenschutzkalkung wird damit nicht zur "Düngung", weil Kalium in der Holzasche vergleichbar moderat löslich ist wie die ernährungswirksame Komponente Magnesium im Dolomit. Die Beimischung von hochlöslichem K_2SO_4, wie es bisher üblich und akzeptiert war, wäre in dieser Hinsicht problematischer.

Tabelle 4: Mittlere jährliche Veränderungsraten der Nährelementgehalte in Fichten (1. Nadeljahrgang) für 1983-1994 für gekalkte und ungekalkte Probepunkte. Die Differenz der Veränderungsraten zwischen gekalkten und ungekalkten Probepunkten wurde mit dem t-Test geprüft. Darstellung getrennt für niedriges und hohes Ausgangsniveau des betrachteten Nährelements.

Element	Ausgangsniveau [mg/g]	Jährl. mittlere Änderungsrate 1983-94 [mg/g] ungekalkte Probepunkte	Jährl. mittlere Änderungsrate 1983-94 [mg/g] gekalkte Probepunkte	Signifikanzniveau der Differenz zwischen gekalkt und ungekalkt [%]
Ca	<=3,0	0,106	0,181	>99
Ca	> 3,0	- 0,012	0,106	>99
Mg	<=0,8	0,003	0,016	>90
Mg	> 0,8	0,002	0,003	>95
K	<=4,5	- 0,115	- 0,168	n.s.
K	> 4,5	- 0,167	- 0,233	>99
P	<=1,3	- 0,007	- 0,001	n.s.
P	> 1,3	- 0,007	- 0,015	n.s.

Im Fall von biologisch inaktiven Rohhumusauflagen, die ein Kohlenstoff/Phosphor-Verhältnis von über 200 aufwiesen, wurde dem dolomitischen Gesteinsmehl 300 kg/ha weicherdiges Rohphosphat zugegeben. Angesichts der Knappheit der natürlichen Phosphatvorräte ist diese Vorgehensweise nicht mehr vertretbar. Da in Holzaschen neben ernährungswirksamen Kaliumanteilen auch das Spurennährelement Phosphor enthalten ist, kann durch die Beimischung von Holzasche bei der Kalkung auch die Phosphorernährung unterstützt werden.

4 Nutzen und Risiken der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung

Durch das Programm der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung soll die natürliche Vielfalt bodenchemischer Standortseigenschaften und damit alle Bodenfunktionen - von der Produktions- über die Filter- bis zur Habitatfunktion - in ihrer natürlichen Diversität wiederhergestellt werden. Es wird die Pufferfunktion des Bodens in Bezug auf Säureeinträge erhalten bzw. regeneriert. Als ein positiver Nebeneffekt der Kalkung wird die Verbesserung der Stickstoffspeicherung im Waldboden durch verstärkte Bildung von Mineralbodenhumus erwartet. Durch eine leichte Anhebung des pH-Wertes werden die Lebensbedingungen für Bodenorganismen verbessert, was die biologische Stickstoffspeicherung im Boden unterstützt. Bei der Waldkalkung ist die Dosierung der Einzelmaßnahmen so niedrig gewählt, dass Risiken wie z.B. Nitrifikationsschübe begrenzt oder ausgeschlossen werden.
Durch Bodenversauerung und Entbasung des Wurzelraumes ist die Ernährung von Wäldern nicht mehr gleichmäßig sichergestellt. Dieser Mangel wird i.d.R. nicht durch Verabreichung des jeweiligen Mangelelements in leicht verfügbarer Form behoben, sondern durch Kalkung, die eine grundsätzliche Umstimmung des Bodenchemismus und damit eine Stabilisierung der Speicherung von basischen Elementen und gleichzeitig eine Erhöhung der bodenbiologischen Aktivität verursacht. Durch Verwendung von Dolomit bei der Waldkalkung wird neben der pH-Erhöhung und Stabilisierung der austauschbaren Basenvorräte eine Verbesserung der Magnesiumernährung

Durch Bodenschutzkalkungen sollen keine gleichmäßig nährstoffgesättigten Standorte entstehen. Vielmehr steht das Konzept der Regeneration eines natürlichen Bodenzustands als Grundlage einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung im Mittelpunkt. Die Risiken sind gering und durch niedrige Dosierung (3-4 t/ha) und die geringe Löslichkeit des eingesetzten Dolomitkalks beherrschbar.

erreicht. Durch Beimischung von 30 % Holzasche wird die Kalium- und Phosphorernährung der Waldbestände unterstützt.

Es werden die aktuellen Säureeinträge abgepuffert und die im Hauptwurzelraum der Wälder in Form von Aluminiumionen gespeicherte Säuremenge abgebaut.
Mit Kalkungen werden folgende **Ziele** verfolgt:

- Abbau der durch jahrzehntelange Säureeinträge mit dem Regen im Boden gespeicherten „Säurealtlast“ und damit Wiederherstellung einer naturnahen Vielfalt an Bodeneigenschaften.
- Neutralisierung aktueller Säureeinträge.
- Erhöhung der bodenbiologischen Aktivität und der damit verbundenen Aggregatneubildung und Porenraumentstehung.
- Biologische Einarbeitung organischer Substanzen vom Auflagehumus in den Mineralboden (A_h-Horizont) sowie eine Erhöhung der Austauschkapazität im Wurzelraum und Stabilisierung der Kohlenstoffspeicherung im Boden.
- Langfristige Vertiefung des durch Feinwurzeln erreichbaren Wurzelraumes.
- Erhöhung der Basensättigung (Mg, K, Ca) im Hauptwurzelraum.
- Erhöhung der N-Speicherkapazität als Nebeneffekt.
- Verbesserung der Magnesium-, Kalium- und Phosphorversorgung der Bäume.
- Langfristiger Erhalt der Wasserqualität in Waldeinzugsgebieten.

Risiken:
Durch die Anhebung der Bodenreaktion an der biologisch besonders aktiven Bodenoberfläche (Auflagehumus und A_h-Horizont) wird 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.
Es können auch kurzfristig erhöhte Feinwurzeldichten im obersten Mineralboden auftreten, solange dort durch die Oberflächenkalkung das bodenchemische Milieu überproportional verbessert ist.

Gesamtbeurteilung:
Die Risiken von Kalkungsmaßnahmen sind zeitlich begrenzt. Die Entscheidung auf eine Waldkalkung zu verzichten würde bedeuten, die unnatürliche Nivellierung der Bodenreaktion von Waldböden im sauren Bereich und damit den bereits eingetretenen Verlust von Standortsdiversität und essenziellen und gesamtgesellschaftlich unverzichtbaren Bodenfunktionen zu akzeptieren. Gemessen an damit verbundenen Risiken (z.B. Gefahr eines zeitlich begrenzten Nitrataustrags) sind die Risiken moderat dosierter Waldkalkungen gering. Somit überwiegen die Vorteile der Kalkungsmaßnahmen. Dies trifft dann im besonderen Maße zu, wenn begleitend ein Baumartenwechsel zu standortsgerechten Baumarten erfolgt.

5 Technische Umsetzung des Programms zur regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung

5.1 Verwendete Materialien

Die dargestellten Nutzen und Risiken von Bodenschutzkalkungen verdeutlichen, dass insbesondere die Ausbringung magnesiumreicher Dolomite und auch von Dolomitmischungen mit unbelasteten Holzaschen den angestrebten Zielen bei geringem ökologischem Risiko gerecht werden. Dolomite bieten den Vorteil eines Naturproduktes, das in weitgehend unveränderter Form und kostengünstig eingesetzt werden kann. In den zurückliegenden Jahren hat sich zusätzlich die Beimischung von Holzaschen als Ersatz für teure Rohphosphate und aufgrund ihrer hohen Löslichkeit problematischen Neutralsalzdünger bei der Bodenschutzkalkung etabliert. Durch diese werden im Zuge der Versauerungsgeschichte verloren gegangene bzw. in ihrer Verfügbarkeit eingeschränkte Nährstoffe wie Kalium und Phosphor zurückgeführt.

Für eine kostengünstige und praktikable Umsetzung der Bodenschutzkalkung werden in erster Linie natürliche Dolomitgesteine verwendet. Holzaschebeimischungen stellen ein wertvolles Bodenverbesserungsmittel mit hohen Anteilen an basisch wirksamen Komponenten sowie nennenswerten Gehalten an ernährungswirksamen Elementen dar.

5.1.1 Dolomitische Gesteinsmehle trocken oder angefeuchtet

Um die angestrebten Kompensationsziele und Ernährungswirkungen zu erreichen, ist es aufgrund der geogenen Variabilität der natürlich vorkommenden magnesiumreichen Kalke erforderlich, Mindeststandards für die chemische Zusammensetzung des Ausbringungsmaterials zu definieren. In Verkehr gebracht werden dürfen nur Stoffe, die im Hinblick auf die Korngrößenzusammensetzung sowie der Nährelement- und Schwermetallgehalte den Anforderungen an die Düngemittelverordnung (DüMV) entsprechen.
Für dolomitische Kalke werden in Baden-Württemberg über die DüMV hinaus folgende Mindestgehalte für Magnesium in Oxidäquivalenten und den Gesamtkarbonatanteil empfohlen:

- Magnesiumoxidanteil (MgO) > 12 %
- Gesamtkarbonatanteil > 90 %

Durch diese Anforderung wird sowohl eine Verbesserung der Magnesiumversorgung als auch eine hohe Säurepufferung gewährleistet.
Im Regelfall beträgt die Dosierung von kohlensauren Kalken 3 t/ha trockener dolomitischer Kalkstaub. Bei angefeuchteten Stäuben erhöht sich die Dosierung entsprechend dem Wassergehalt.
Da im Gegensatz zur landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung eine Einarbeitung des Kalkes in den Mineralboden im Wald nicht möglich ist bzw. aus Gründen der Risikominimierung ausgeschlossen werden muss, ist ein Tiefentransport von Basizität in den Mineralboden nur durch hinreichend hohe Lösungsraten sicherzustellen. Diese wird in erster Linie durch die Korngröße bestimmt. Ein Anteil der

- Feinfraktion (Korndurchmesser < 0,1 mm) von über 90 %

gewährleistet hohe Lösungsraten und damit eine in den Mineralboden reichende Tiefenwirkung von Kalkungsmaßnahmen.

5.1.2 Erdfeuchte Kalke

Erdfeuchte Kalke weisen im Gegensatz zu den Stäuben höhere Anteile der Grobfraktion (Korndurchmesser > 0,1 mm) und höhere Wassergehalte auf. Soll eine der fein aufgemahlenen, trockenen Ware vergleichbare Meliorationswirkung erreicht werden, muss die Dosierung erdfeuchter Kalke erhöht werden. Ein Berechnungsmodus für die Herleitung der Dosierungshöhe in Abhängigkeit von Feinanteil und Wassergehalt ist im Merkblatt 50/2000 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg dargestellt.

5.1.3 Dolomitisches Gesteinsmehl granuliert

Bei Granulaten, deren Feinfraktionsanteil ebenfalls über 90 % liegen muss, werden die Primärkörner durch Bindemittel für die Ausbringung konditioniert. Da die Kosten für granulierte Dolomite prohibitiv teuer sind, werden sie nur in sehr seltenen Ausnahmefällen entlang von außerordentlichen Gefahrenzonen auf kleinen Flächen eingesetzt.

5.1.4 Dolomit-Holzasche-Mischung

Aufgrund der hohen Anteile an basisch wirksamen Komponenten sowie den nennenswerten Gehalten an ernährungswirksamen Elementen (Kalium, Phosphor und Magnesium) ist Holzasche als wertvolles Bodenverbesserungsmittel und Sekundärrohstoffdünger mit einer spezifischen Eignung für den Einsatz in Wäldern bei Kompensation und Regeneration von Bodenversauerung im Rahmen von Bodenschutzkalkungen zu bewerten. Insbesondere die Kaliumkomponente ist angesichts der zunehmenden Kaliumversorgungsengpässe von Waldbäumen auf lehmigen Waldböden von Interesse. Die Phosphatkomponente wirkt sich insbesondere auf Standorten mit inaktiven Rohhumusformen günstig aus und ersetzt auf diesen Standorten die bei der Waldkalkung übliche, teure Beimengung von Rohphosphat. Die im Vergleich zu reinem Dolomit höhere Löslichkeit der Holzaschen ist in Bezug auf die chemische Bodenmelioration in Zusammenhang mit Waldkalkungen positiv zu bewerten, da dadurch schon bei einer einmaligen Maßnahme eine höhere Tiefenwirkung im Vergleich zu weniger schnell löslichen Dolomiten erzielt wird.
Ebenso wie alle anderen mineralischen Biomassebestandteile reichern sich in den Holzaschen aber auch Schwermetalle an. Potenziell kritische Elemente sind hierbei insbesondere Cadmium, Blei und Nickel. Die Schwermetallkonzentrationen in der Asche werden entscheidend vom Brennmaterial und von der Verbrennungstechnik beeinflusst. Holzwerkstoffe, imprägnierte Hölzer und Hölzer mit Farbanstrichen führen zu um Größenordnungen höheren Schwermetallkonzentrationen als reines Waldholz. Aber auch bei der ausschließlichen Verbrennung von unbehandelten Hölzern können Schwermetallgehalte durch Anteile von Hackgut aus Straßenbegleitpflanzungen deutlich erhöht sein (z.B. Cadmium und Blei).
Um potenzielle Risiken einer Schadstoffbelastung im Zuge der Ausbringung von Holzaschen zu vermeiden, wurden in der Düngemittelverordnung (DüMV) zahlreiche Kriterien definiert, die die Zumischung von Holzaschen zu Kalkdüngern regeln:

- Es dürfen nur Brennraumaschen aus der Verbrennung unbehandelter Pflanzenteile verwendet werden.
- Der Beimischungsanteil von Holzaschen zu den Kalkdüngern wird auf 30 % begrenzt.
- Holzaschen dürfen die in der DüMV genannten Grenzwerte für Schwermetalle nicht überschreiten.

Bei der Ausbringung von Holzaschen auf forstliche Standorte gilt nach der aktuellen DüMV eine erweiterte Grenzwertregelung.

Ein wesentlicher Vorteil von Dolomit-Holzasche-Mischungen ist neben der Pufferwirkung ihr baumphysiologisch relevanter Nährstoffgehalt. Deshalb werden in Baden-Württemberg folgende Nährelementgehalte in Oxidäquivalenten sowie Gesamtkarbonatanteile (Gewichtsprozente bezogen auf das Trockensubstanzgewicht) empfohlen:

- Magnesiumoxidanteil (MgO) > 10 %
- Kaliumoxidanteil (K_2O) > 1 %
- Phosphorgehalt (P_2O_5) > 0,3 %
- Gesamtkarbonatanteil > 75 %
  (überwiegend $CaCO_3$, Ca- und Mg-Anteile berechnet als Karbonatanteile)

Um hinreichende Nährelementgaben zu erzielen, beträgt die Regeldosierung von Dolomit-Holzasche-Mischungen:

- 4 t/ha (2,8 t kohlensaurer Magnesiumkalk in Mischung mit 1,2 t Brennraumasche)

Hierbei ist eine homogene Verteilung der beiden Komponenten im Korngrößenspektrum der Mischung anzustreben. Da Dolomit-Holzasche-Mischungen technisch nur in feuchter Form ausgebracht werden (hierdurch wird eine Vermeidung der Staubentwicklung erreicht), wird ein Sollwert für den Wassergehalt vorgegeben.

- Wassergehalt: 10 Gew.%

Bei einer Ausbringungsmenge von 4 t/ha trockener Dolomit-Holzasche-Mischung entspricht damit die auszubringende Frischmasse bei diesem Wassergehalt 4,4 t/ha.
Folgende Mindestanteile für die Korngrößenfraktionen < 0,1 mm und < 2 mm werden für Dolomit-Holzasche-Mischungen gefordert:

- Anteil Korngröße < 0,1 mm: 50 Gew.%
- Anteil Korngröße < 2 mm: 98 Gew.%

Die verbindliche Festlegung der Ausbringungsmengen sowie der Qualitätsanforderungen an die Ausbringungsmaterialien einschließlich ihrer Toleranzen erfolgt in den Ausschreibungsunterlagen.

5.1.5 Silikatische Gesteinsmehle

Die Löslichkeit von silikatischen Gesteinsmehlen ist deutlich geringer als die der kohlensauren Kalke, weshalb diese auch in höheren Dosierungen (5 bis 10 t/ha) risikolos ausgebracht werden können. Mit der größeren Menge steigt aber auch der Kostenaufwand für das Gesteinsmehl und die Ausbringung. Sie eignen sich daher v.a. auf Standorten, auf denen eine herkömmliche Kalkung aufgrund eines erhöhten Risikopotenzials ausscheidet. Um mit der vorgeschlagenen Dosierung eine mit einer 3 t/ha-Dolomitkalkung vergleichbare Menge an Basizität zu verabreichen, sollte die Summe der basisch wirkenden Bestandteile in Oxidäquivalenten (K_2O, CaO und MgO) mindestens 15 % (HCl-Aufschluss) betragen.

5.1.6 Neutralsalzdünger, Stickstoff- und Phosphatdünger

Der Einsatz von schnell löslichen Magnesium- und Kaliumneutralsalzen (z.B. von Magnesiumsulfat $MgSO_4$ oder Kaliumsulfat K_2SO_4) beschränkt sich auf Fälle mit akuten, durch Nadel/Blattanalysen nachgewiesenen Mangelsituationen. Dieser kann z.B. in Kulturen oder Pflanzschulen unmittelbar nach der Pflanzung auftreten. Chloritische Kalium- und Magnesiumsalze scheiden aufgrund der Unverträglichkeit der Waldbäume aus. Auch Rohphosphate und Stickstoffdünger sollten nur bei nachgewiesenem Phosphat- bzw. Stickstoffmangel eingesetzt werden. Liegen die pH-Werte für die angepflanzten Baumarten zu hoch, so kann anstatt von Kalkammonsalpeter der schwach sauer wirkende Kalkammonsulfatsalpeter oder das stärker sauer wirkende Ammoniumsulfat verwendet werden. Weitergehende Hinweise zum Einsatz der in diesem Abschnitt genannten Düngemitteltypen finden sich im FVA-Merkblatt 50/2000.

5.2 Sicherung der Materialqualität bei der Bodenschutzkalkung

Sowohl reiner Dolomitkalk als auch insbesondere Dolomit-Holzasche-Mischungen sowie die verwendeten Aschen werden vor und während der Durchführung der Kalkung periodisch beprobt und hinsichtlich der geforderten Materialqualität untersucht.
Dolomitische Naturkalke, die bei der Bodenschutzkalkung überwiegend eingesetzt werden, weisen im Vergleich zu Brennraumaschen eine geringere Variabilität der Nährelement- und Schwermetallgehalte auf. Mit großem Aufwand wurde daher ein stringentes Qualitätssicherungsverfahren aufgebaut, das neben der laufenden Beprobung im Zuge der Ausbringung bereits bei den Aschelieferanten ansetzt (also doppelte Sicherheit) und dadurch die

Einhaltung der von der Düngemittelverordnung (DüMV) und dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) geforderten Grenzwerte für Schwermetalle und der Mindestgehalte der ernährungswirksamen Komponenten sicherstellt.

Qualitätssicherung erfolgt sowohl bei der Produktherstellung wie auch bei der Ausbringung. Über ständige Stichproben der ausgebrachten Materialien vor Ort werden sowohl die düngemittelrechtlichen Kriterien für Schadstoffe als auch die Nährstoffzusammensetzung untersucht.

Neben der Qualitätssicherung von ForstBW / FVA hat sich die Bundesgütegemeinschaft Holzasche als Untergruppierung der Bundesgütegemeinschaft Kompost gebildet, die Holzaschen von Holzheizkraftwerken durch spezifische Zertifikate für den Einsatz bei der Bodenschutzkalkung qualifiziert und diese Zertifikate mehrfach im Jahr durch Laboranalysen überwacht.

Im Zuge der Kalkungsmaßnahmen erfolgt die Prüfung der Einhaltung der Qualitätskriterien durch eine stichprobenartige Kontrolle von Korngrößenzusammensetzung, Wassergehalt und chemischer Zusammensetzung. Die Anzahl der bei den laufenden Kalkungsmaßnahmen zu entnehmenden Proben wird an der Gesamtliefermenge des Loses orientiert. Eine Endprobe repräsentiert dabei 500 t (bei reinem Dolomit 1000 t) Liefermenge. Darüber hinaus werden Beprobungseinheiten mit jeder neuen Kalkherkunft und jedem neuen Los begonnen. Stichproben des Ausbringungsmaterials sind kontinuierlich – möglichst täglich - während bzw. nach der Anlieferung des Materials am Umschlagplatz durch einen Beauftragten des Auftraggebers im Beisein eines Vertreters des Auftragnehmers zu entnehmen. Dabei muss das Schüttgut repräsentativ beprobt werden (so muss z.B. der Mantel und Kern des Schüttguthaufens im Bohrkern repräsentiert sein). Wichtig ist, dass kein Fremdmaterial, wie z.B. Schottermaterial des Wegekörpers, die Probe verunreinigt. Die Tagesstichproben werden zu einer Endprobe vereinigt und diese in drei gleiche Teile aufgeteilt. Da an dem Probenmaterial auch der Feuchtegehalt bestimmt wird, ist durch luftdichte und kühle Lagerung der Tages- und Endproben sicherzustellen, dass die Materialfeuchte erhalten bleibt. Ein Drittel des Stichprobenmaterials ist zur Analyse zu verwenden, jeweils ein weiteres Drittel des Probenmaterials wird beim Auftragnehmer bzw. Auftraggeber bis zum Vorliegen der Analysenergebnisse als Rückstellprobe gelagert.

5.3 Ausbringungstechnik

Bei der Bodenschutzkalkung haben sich zwei Ausbringungstechniken bewährt:

- Verblasen von Dolomitstäuben (trocken und erdfeucht) und Dolomit-Holzasche-Mischungen mit Bodenverblasefahrzeugen

- Abwerfen von Granulaten, erdfeuchten Dolomiten und Dolomit-Holzasche-Mischungen vom Hubschrauber (aviotechnische Ausbringung)

Das Verblasen ist unter geeigneten Rahmenbedingungen preiswert und im Vergleich zur aviotechnischen Ausbringung mit geringerem Primärenergieaufwand möglich. Technisch gelöst ist die homogene Verteilung des Kalkstaubes bei Verblasereichweiten von 40 bis 60 m. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende Fahrwege- und/oder Feinerschließung. Die Bestände müssen ausreichend durchblasbar sein. Für dichte Jungbestände ist zu prüfen, ob diese überblasen werden können. Probleme bei der terrestrischen Ausbringung können sich durch die Abdrift von trockenem Kalkstaub ergeben. Dieses Risiko ist beim Verblasen feuchter Stäube und Dolomit-Holzasche-Mischungen deutlich geringer. Eine visuelle Qualitätskontrolle der terrestrischen Ausbringungsqualität ist problemlos möglich. Durch die Wahl des Ausbringungszeitpunktes (s.u.) lassen sich mögliche Risiken für Flora und Fauna minimieren.

Die aviotechnische Ausbringung von Granulaten und erdfeuchten Kalken bzw. Dolomit-Holzasche-Mischungen setzt arrondierte Behandlungseinheiten und geeignete Witterungsbedingungen voraus. Die Hubschrauberausbrin-

gung ist hinsichtlich der Homogenität der Ausbringung, des Verdriftens von Ausbringungsmaterial (Einsatz im Grenzbereich zu Infrastruktureinrichtungen) und der Gefährdung von Flora und Fauna sowie den Ansprüchen an die Erschließungssituation günstiger zu bewerten als die terrestrische Ausbringung; der energetische und finanzielle Aufwand je Flächeneinheit ist jedoch deutlich höher.
In unzureichend erschlossenen Waldbeständen und in Hanglagen mit einer Grunderschließung an Fahrwegen bieten sich gekoppelte Verfahren von Helikopter- und Bodenausbringung an, bei denen der Helikopter die vom Bodenverblasefahrzeug nicht erreichbare Fläche behandelt.

5.4 Zeitpunkt der Ausbringung

Dolomitische Kalke, Dolomit-Holzasche-Mischungen und Gesteinsmehle können im Prinzip ganzjährig ausgebracht werden. Aus zoologischer Sicht sollte jedoch keine Verblasung in der Hauptvegetationszeit (31.03. bis 15.07.) erfolgen. In Hanglagen sollten Kalke nicht auf Schneedecken ausgebracht werden. In kartierten Auerhuhngebieten, die nicht als Ausschlussflächen definiert sind, sollten Kalkungen im Zeitraum vom 16.07. bis 30.11. durchgeführt werden (siehe Kapitel 5.5).
Durchforstungsmaßnahmen, die in zu kalkenden Beständen vorgesehen sind, sollten vor der Ausbringung durchgeführt werden. Die Durchblasbarkeit der Bestände und damit die homogene Verteilung des Kalkes werden dadurch erhöht und ein durch die Kalkung erhöhter Verschleiß an Motorsägenketten reduziert.

5.5 Berücksichtigung von Schutzgebieten

Zahlreiche Flächen innerhalb des Waldes sind nach Naturschutzrecht (z.B. FFH-Gebiete, Kernbereiche Biosphärenreservate, Nationalparke, Naturschutzgebiete, Naturdenkmale und Biotope) oder Wasserrecht sowie nach dem Landeswaldgesetz (§30a LWaldG) geschützt. Eingriffe in diese geschützten Biotope sind nur erlaubt, wenn sie den Schutzzweck nicht gefährden. Bei den gegenwärtig durchgeführten Kalkungsmaßnahmen steht der vorsorgende Bodenschutz im Vordergrund. Durch eine moderate Dosierung von 3-4 t/ha wird sichergestellt, dass sprunghafte Veränderungen des pH-Wertes ausgeschlossen sind.

In Ausnahmefällen können Waldkalkungen jedoch zu einer Beeinträchtigung geschützter Biotope führen. Um die Planung in diesen Bereichen zu erleichtern, wurde mit der Naturschutzfachverwaltung die Handreichung „Bodenschutzkalkung von Wäldern in Baden-Württemberg - Berücksichtigung der Waldbiotope, FFH-Waldlebensraumtypen und Auerhuhnhabitate“ abgestimmt. Dieser enthält eine Einstufung der Kalkungssensitivität für die genannten Biotoptypen sowie Hinweise zur Abgrenzung von Auerwildkernbereichen und zur Vorgehensweise in den darüber hinausreichenden Auerwildhabitatflächen. Dieses Abstimmungsergebnis ist in die digitalen Kartengrundlagen eingearbeitet worden und wird in die Maßnahmenpläne (siehe Kapitel 5.9) übernommen.

Kalkungssensitive und naturschutzrelevante Flächen sind von einer Kalkung auszunehmen. Bei Kalkungen in angrenzenden Gebieten ist von diesen wie auch weiteren schützenswerten Bereichen ein ausreichender Pufferabstand von 100 m einzuhalten.

Ausschlussstandorte für Kalkungsmaßnahmen sind:

- Wasser- und Quellschutzgebiete der Zone I
- Bannwälder
- Versuchs- und Beobachtungsflächen
- Kernbereiche der Auerwildprioritätsflächen
- Kalkungssensible Waldbiotope, FFH-Waldlebensraumtypen und FFH-Offenlandbiotoptypen innerhalb des Waldes und kalkungssensitive Arten nach FFH-Richtlinie
- Kalkungssensitive Standortseinheiten (Missen, Moore, Blockhänge, Trockenrasen, ...).

Von diesen Flächen ist ein ausreichender Mindestabstand von in der Regel 100 m einzuhalten.
Für zahlreiche geschützte Bereiche liegt keine eindeutige Zuordnung im Hinblick auf die Kalkungssensitivität vor. Für diese ist im Rahmen einer Vorortprüfung zu entscheiden, ob eine Kalkungsmaßnahme den Schutzzweck in Frage stellen würde (z.B. in Naturschutzgebieten, Schonwäldern oder in den als „zu prüfen“ klassifizierten Waldbiotoptypen).

5.6 Regionale und lokale Vorplanung und Dokumentation der Kalkungsmaßnahmen

Vor der Durchführung von Bodenschutzkalkungen ist ein umfangreicher Planungsprozess zu durchlaufen, der in zeitlichem Vorlauf zu den vorgegebenen Förder- und Haushaltsterminen geleistet werden muss. In die fachliche und operative Planung ist eine Vielzahl von Institutionen eingebunden: Das Ergebnis der räumlichen Abgrenzung der Kalkungsbedürftigkeit durch die FVA muss in Kenntnis der örtlichen Verhältnisse durch die Planenden vor Ort in konkrete Kalkungskulissen überführt und im Bedarfsfall mit berührten Fachverwaltungen abgestimmt werden. Hierfür ist ein ausreichender zeitlicher Planungsvorlauf unabdingbar, damit zeitintensive Arbeitsschritte (z.B. für die Erstellung der fachlichen Expertise und deren Absicherung über eine Bodenprobenentnahme, Abstimmung mit fachlich berührten Verwaltungen) fristgerecht durchgeführt werden können. Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Ablaufschritte für die Durchführung einer Bodenschutzkalkung im Staatswald.

Für eine transparente und zielführende Planung von Bodenschutzkalkungen ist die Integration landesweiter Informationen über den Bodenzustand sowie deren stichprobenartige Überprüfung auf lokaler Ebene notwendig. Ziel ist eine einvernehmliche und an die örtlichen Verhältnisse optimal angepasste Kalkungskulisse. Eine Kontrolle der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Maßnahmen ist nur mittels einer lückenlosen Dokumentation möglich.

5.7 Bodenkundliche Grundlagen der Kalkungsplanung

Fachliche Grundlage für die Ableitung der Kalkungsbedürftigkeit stellt das aus den Daten der Bodenzustandserhebung abgeleitete Modell der Kalkungsbedürftigkeit dar (siehe Kapitel 2). Dieses liegt Waldbesitz übergreifend vor. Auf der Grundlage dieses Modells kann unter Berücksichtigung der Kalkungshistorie eine effektive Steuerung der Umsetzung dieses Konzeptes durch Fokussierung auf „hot spots“ der Kalkungsbedürftigkeit vorgenommen werden. Zur Absicherung des Modellbefundes wird die Experteneinschätzung der Kalkungsbedürftigkeit aus der Standortskartierung bzw. der Bodenübersichtskarte verwendet.

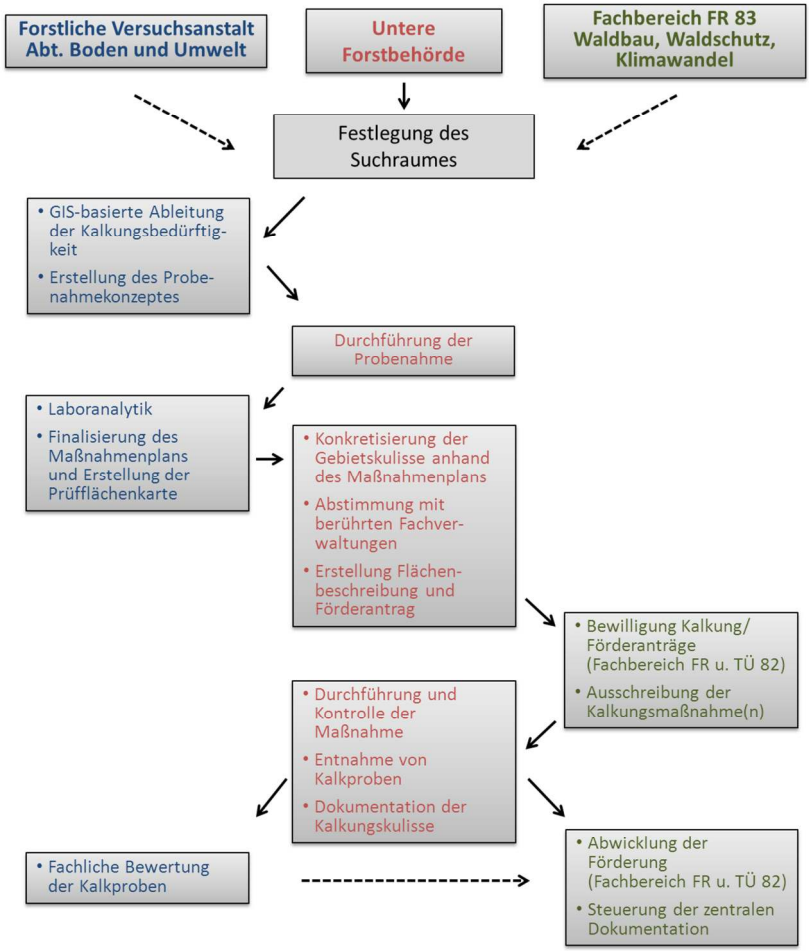


Abbildung 8: Vereinfachtes Ablaufschema der Vorplanung, Abwicklung und Dokumentation von Bodenschutzkalkungen unter Beteiligung von FVA, Unterer Forstbehörde und Regierungspräsidium.

Da die genannten Datengrundlagen landesweit als Geodaten vorliegen, ist es möglich, in einer GIS-basierten Prozessierung eine weitgehend automatisierte Klassifikation von Raumeinheiten in „zu kalkende Flächen“, „Prüfflächen“ und „nicht kalkungsbedürftige Flächen“ vorzunehmen. Dieses vorläufige Ergebnis wird durch einen bodenkundlichen Experten an der FVA geprüft und durch eine rasterartige Bodenprobenentnahme verifiziert. Nach Vorliegen der Laboranalysen kann die aus bodenkundlicher Sicht zur Kalkung vorzusehende Gebietskulisse abgegrenzt werden.

5.8 Einbeziehung von Ausschlussflächen

Bei der Ableitung der Kalkungskulissen werden Flächen ausgeschlossen, die durch eine Kalkung negativ beeinträchtigt werden könnten. Diese werden mit Pufferbereichen aus den potenziellen Kalkungskulissen ausgestanzt und nicht weiter beplant. Dieser „a priori Ausschluss“ ist jedoch nur für Flächen möglich, für die in den digitalen Datengrundlagen eine eindeutige Zuordnung der Kalkungssensitivität vorliegt. Flächen, für die diese Eindeutigkeit nicht gegeben ist, müssen vor Ort geprüft werden.

5.9 Maßnahmenplan: Grundlage für die lokale Planung

Die aus den bodenkundlichen Grundlagen und Ergebnissen der Bodenbeprobung abgeleiteten kalkungsbedürftigen Flächen werden in den Maßnahmenplan aufgenommen (siehe Abbildung 9). Ergänzend werden in diesem die Herkunft der Ausschlussflächen sowie Empfehlungen zur technischen Umsetzung der Kalkungsmaßnahmen aufgenommen. Die zu kalkenden Flächen werden gegliedert nach Ausbringungstechnik (Gebläse bzw. Helikopter) sowie nach Ausbringungsmaterial (Dolomit in einer Dosierung von 3 t/ha bzw. Dolomit-Holzasche-Mischung in einer Dosierung von 4 t/ha) dargestellt. Die Differenzierung im Hinblick auf die Ausbringungstechnik wird auf der Basis der Hangneigung aus dem digitalen Höhenmodell abgeleitet. Annahme hierbei ist, dass eine Befahrung von Hängen mit Gebläsefahrzeugen ab Neigungen von 30 % nicht mehr möglich ist. Da lehmgeprägte Böden anfälliger gegenüber Kaliummangel sind als sand- bzw. tongeprägte Standorte und auf Hangstandorten (> 30 %) höhere Nährelementnachlieferungsraten gegeben sind, kann anhand der landesweit verfügbaren Information zur Bodenart sowie der Hangneigung die Bedürftigkeit einer Holzaschebeimischung zur Stabilisierung der Kalium- und Phosphorernährung abgeschätzt werden.
Sowohl im Hinblick auf Ausbringungstechnik wie auch auf das Ausbringungsmaterial kann in Folge der automatisierten Zusammenführung der

Datengrundlagen ein kleinräumig differenzierter Maßnahmenplan entstehen, dessen praktische Umsetzung so vor Ort nicht möglich wäre. Es obliegt daher den Planenden an den Unteren Forstbehörden, die Empfehlungen aus dem Maßnahmenplan im Hinblick auf deren Umsetzbarkeit zu prüfen und in sachlich begründete, ausschreibungsfähige Einzelflächen zu überführen. Flächenbedeutende Abweichungen von den Materialempfehlungen sind mit der Abteilung Boden und Umwelt der Forstlichen Versuchsanstalt abzustimmen.

Der Maßnahmenplan sowie eine ergänzende kartographische Übersicht über die zu prüfenden Flächen sind Hilfsmittel für die Planung von Bodenschutzkalkungen. Durch die automatisierte Zusammenführung der planungsrelevanten Flächeninformationen und die expertengestützte Einarbeitung der Befunde aus der Bodenprobenentnahme wird die Konkretisierung der tatsächlich zu kalkenden Flächen deutlich erleichtert und der Arbeitsaufwand insgesamt reduziert. Gleiches gilt für die Abstimmung der Kalkungskulissen mit den zuständigen Fachbehörden.

In Abbildung 9 ist beispielhaft ein Maßnahmenplanausschnitt aus dem Enzkreis dargestellt. Aus den ATKIS-, ALK- und FOGIS-Daten ergibt sich für den Enzkreis eine um Nichtholzbodenflächen bereinigte Gesamtwaldfläche von rund 23.100 ha. Innerhalb dieser Gebietskulisse weisen 2.019 ha den Schutzstatus eines FFH-Gebietes, eines Bannwaldes, eines kalkungssensiblen Waldbiotops bzw. einer kalkungssensiblen Standortseinheit auf und sind hierdurch einschließlich ihres Pufferbereichs von der Kalkung ausgenommen. Weitere 109 ha unterliegen dem Wasserschutz (Zone I); auf weiteren 33 ha befinden sich bodenkundliche bzw. waldwachstumskundliche Versuchsflächen. Auf ca. 12 % der summarisch bilanzierten Ausschlussflächen überlagern sich mehrere Schutztatbestände, sodass sich für den Enzkreis eine tatsächlich von der Bodenschutzkalkung auszunehmende Fläche von 1.900 ha (8.2 % der Gesamtwaldfläche) ergibt. Da die Prüfflächen hier nicht mit bilanziert werden können, handelt es sich um eine sehr konservative Schätzung des von der Kalkung auszunehmenden Flächenanteils.

Als Werkzeug zur Durchführung der Kalkungsmaßnahmen dient der sogenannte Maßnahmenplan. Dieser bildet die räumliche Kombination von Kalkungsbedürftigkeit aufgrund des Bodenzustands, Schutzwürdigkeit aufgrund naturschutzrechtlicher o.a. Gegebenheiten sowie der technischen Umsetzbarkeit der Ausbringung ab. Der GIS-gestützt erarbeitete Maßnahmenvorschlag muss jedoch noch an die örtlichen Verhältnisse angepasst werden.

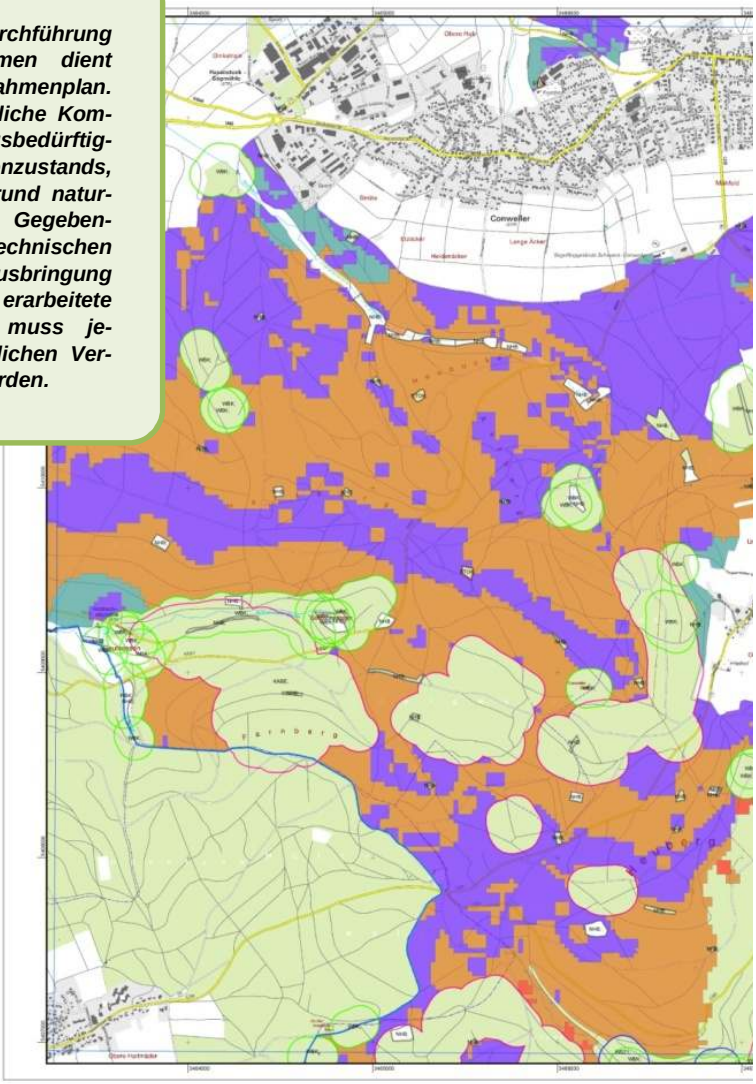
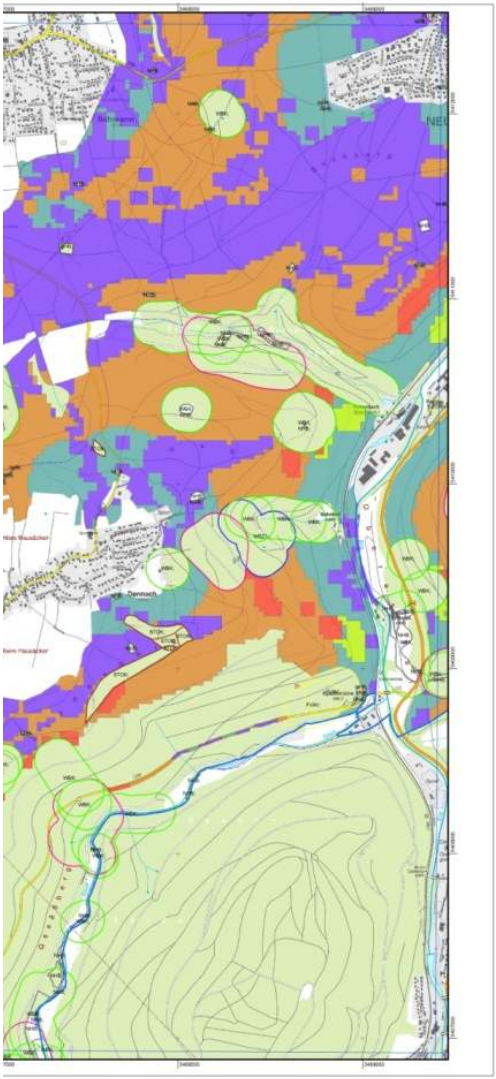


Abbildung 9: Maßnahmenplan mit kalkungsbedürftigen Flächen differenziert nach Ausbringungsmaterial und Ausbringungstechnik. Ausschlussbereiche sind mit ihren Pufferzonen ausgespart.



Pilotprojekt GIS-unterstützte Kalkungsplanung

Maßnahmenplan

TK-Blatt 7117SW

Stand 22.02.2013

Maßnahmenplan

- Dolomit trocken verblasen
- Dolomit erdfeucht verblasen
- Dolomit Granulat oder erdfeucht Helikopter
- Dolomit erdfeucht Helikopter
- Dolomit/Holzasche erdfeucht Helikopter
- Dolomit/Holzasche erdfeucht verblasen

Legende

- AUER; Sonderkartierung Auerwildhabitate
- BRKZ; Kernzone Biosphärenreservat
- BW; Waldschutzgebiete: Bannwald
- DIC; Dicranum viride nach Prüfung
- FVAV; Versuchsflächen FVA: BU, WW, PDV
- KABE; kalkungssensible Standortseinheiten
- LUBW; Bodendauerbeobachtung
- N2Ke; endgültige WLRT
- N2Kv; vorläufige WLRT
- NHB; FOGIS Waldeinteilung
- NPKZ; Kernzone mgl. Nationalpark
- STOK; nicht kartiert, z.B. Teich, Steinbruch
- WBK; kalkungssensitive Waldbiotope
- WSZ1; Wasserschutzzone 1
- QSG; Quellschutzgebiet
- UFB Grenze
- Blattschnitt TK10

ForstBW

FVA Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Maßstab 1 : 10.000

LGL
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg
www.lgl-bw.de, Az.: 2851.9/119
FVA
Grundlage: Daten aus dem Räumlichen Informations- und Planungssystem (RIPS) der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
FVA Forstliche Versuchsanstalt
Kartengrundlage: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (http://www.fva-bw.de)
FOGIS Waldeinteilung
Kartengrundlage: ForstBW Baden-Württemberg, FVaro

5.10 Dokumentation

Bodenschutzkalkungen stellen betriebliche Investitionen in die Bodenvorsorge dar, die nicht unerhebliche Finanzmittel binden. Die Bilanzierung der vielfältigen positiven Leistungen der Bodenschutzkalkung (bodenchemischer und somit waldökologischer Stabilitätsgewinn, Erzielung waldbaulicher Effekte, Trinkwasserschutz), wie sie im Rahmen der landesweiten Bodenzustandserfassung geleistet wird, und damit auch eines effektiven Mitteleinsatzes ist nur auf der Basis einer lückenlosen Dokumentation des Kalkungsvollzugs möglich. Auch für die Bestimmung des Zeitpunktes einer Wiederholungskalkung ist die Kenntnis des Zeitablaufs seit der letzten Maßnahme notwendig. Sämtliche Düngungs- und Kalkungsmaßnahmen sind daher umfassend zu dokumentieren (Ausbringungsmaterial und –technik, Dosierung sowie räumliche Abgrenzung der Flächen).

6 Zusammenfassung

Zentrale Grundlage der Nachhaltigkeit in der Waldbewirtschaftung ist die langfristige Erhaltung der Standortsqualität 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, und da, wo anthropogen verursachte Depositionswirkungen (saurer Regen) eine Destabilisierung verursacht haben, diese so weit wie möglich zu kompensieren.

Die Kompensation der in den vergangenen Jahrzehnten im Boden akkumulierten und der aktuellen Säure- und Stickstoffeinträge sowie die Stabilisierung gefährdeter Ökosystemfunktionen kann auf den meisten Standorten nicht mehr alleine auf der Basis waldbaulicher Steuerungsmechanismen erfolgen. Hauptaufgabe des neuen Programms der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung ist der Abbau der im Boden gespeicherten Säuremengen aus früheren Depositionen, welche mittlerweile eine großflächig stark fortgeschrittene Bodenversauerung hinterlassen haben. Durch die Bodenschutzkalkung wird ein naturnaher Versauerungszustand und Nährelementhaushalt der Waldböden wiederhergestellt. Dadurch wird die natürliche Vielfalt der Standortsbedingungen wieder angenähert und ein für die Etablierung von Wurzeln im oberen Mineralboden günstiges bodenchemisches Milieu geschaffen. Sowohl Waldkalkung als auch der vermehrte Anbau tiefwurzelnder, standortsgemäßer Baumarten bewirken eine Stabilisierung und Vertiefung des Nährelementkreislaufes im Mineralboden und eine biologische Aktivierung des Mineralbodens.

Nach Auswertung der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) sind rund 680.000 ha Wald in Baden-Württemberg kalkungsbedürftig. Diese kalkungsbedürftige Waldfläche muss durchschnittlich 1,8-mal gekalkt werden. Davon soll zunächst in 10 Jahren eine Fläche von 210.000 ha bearbeitet werden. Bei der ab 2020 geplanten BZE 3 soll dann der noch vorhandene Kalkungsbedarf verifiziert und gegebenenfalls angepasst werden. Auf den weniger versauerten Standorten kann mit einer einmaligen Kalkung die Bodenversauerung über lange Zeit wirkungsvoll aufgehalten werden. Bei den stärker versauerten Standorten sind mehrere Wiederholungsmaßnahmen notwendig, um eine bodenchemische Stabilisierung und Regeneration der natürlichen bodenchemischen Ausstattung zu erzielen. Naturschutzrelevante Flächen sind gesondert unter dem Aspekt des Biotopschutzes zu bewerten und i.d.R. von Kalkungsmaßnahmen ausgeschlossen, ebenso wie ein Pufferbereich von 100 m.

Die Risiken der Waldkalkung (kurzfristige Verflachung des Feinwurzelsystems, Nitratschub durch erhöhten Abbau organischer Substanz) sind zeitlich begrenzt und mit Hilfe moderater Kalkungsmengen minimierbar.
Das Programm der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung zielt darauf ab, die natürliche Vielfalt der Waldböden hinsichtlich Bodenreaktion, Nährstoffausstattung sowie Filter- und Puffereigenschaften wiederherzustellen. Dies soll durch die Umsetzung eines stark standortsdifferenzierten Kalkungsbedarfs mit klarem Zeithorizont erreicht werden. Dabei werden Stabilität und Produktivität der Wälder sowie deren Biodiversität wieder ihrem natürlichen Zustand angenähert.

7 Literatur

BUBERL, H.G., V. WILPERT, K. UND TREFZ-MALCHER G. (1994): Der chemische Zustand von Waldböden in Baden-Württemberg: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 1989-92 (BZE), Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 182, 99 S.

DÜNGEMITTELVERORDNUNG (DÜMV) (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. BGBl. I: 5. 12.2012, S. 2482

EVERS, F.H. (1985): Nomogramme zur Schätzung und Klassifizierung der Nährelementgehalte in Nadeln und Blättern. Unveröffentlichtes Manuskript der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

FRANK, E. (1927): Über Bodenazidität im Walde. Freiburger Druck- und Verlagsgesellschaft. Muth. 155 S.

MENGEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. G. Fischer, Jena, 466 S.

V. WILPERT, K.; SCHÄFFER, J. (2000): Bodenschutzkalkung im Wald. Merkblatt 50, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 21 S.

**Merkblätter der Forstlichen Versuchs-
und Forschungsanstalt Baden-Württemberg**

Es sind bisher erschienen:

Nr. 10 Mitwirkung der Forstämter in Versuchsflächen der Abt. Waldwachstum (1980, 2. Auflage)
Nr. 12 Richtlinien zur Bekämpfung der Nutzholzschädlinge an Laubholz, insbesondere der Eiche (1982, 2. Auflage)
Nr. 19 Triebsterben der Schwarzkiefer (1980)
Nr. 25 Douglasienschütte (1981)
Nr. 27 Die Gemeine Kiefernbuschhornblattwespe (Diprion pin. L.) (1982)
Nr. 36 Das Vordrucksystem der Landesforstverwaltung (1987)
Nr. 39 Schüttepilze der Kiefern (1989)
Nr. 40 Laubbaumvirosen (1989)
Nr. 41 Die Nonne (Lymantria monacha L.) (1989)
Nr. 43 Nadelpilze der Fichte (1992)
Nr. 44 Die Kiefern- oder Forleule (Panolis flammea Schiff.) (1992)
Nr. 45 Lebensraum Totholz (1993)
Nr. 50 Bodenschutzkalkung im Wald (2000)
Nr. 51 Natürliche Wiederbewaldung von Sturmflächen (2000)
Nr. 52 Nussanbau zur Holzproduktion (2005, 2. Auflage)
Nr. 53 Durchforstungshilfe 2010 (2010)

Fehlende Nummern sind vergriffen.

Zu beziehen durch:
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestraße 4
79100 Freiburg
E-Mail: fva-bw@forst.bwl.de
Internet: http://www.fva-bw.de

Forstliche Versuchs-
und Forschungsanstalt
Baden-Württemberg

Wonnhaldestrasse 4
79100 Freiburg

Tel.: (07 61) 40 18 - 0
FAX: (07 61) 40 18 - 3 33
fva-bw@forst.bwl.de
www.fva-bw.de