



Scopus Indexed Journal

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – *Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*

www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz


Flächenbedeutung der Waldkalkung in Baden-Württemberg

Extent of forest liming in Baden-Württemberg

Alina Janssen, Jürgen Schäffer, Klaus von Wilpert & Albert Reif

Abstract

Since the 1980s, forest liming has been used to compensate for atmospheric inorganic acid deposited in Baden-Württemberg. This study evaluates existing forest liming data first compiled by the FVA Baden-Württemberg in 2005. We show a clear concentration of forest liming in the Black Forest, where soils on red sandstone and crystalline rock are prone to acidification. Liming has also been regularly carried out in the Keuper Uplands, the Forest of Odes and on glacial sediments of the Alpine foothills in Upper Swabia. The loamy soils of the lower moraine have experienced a particular increase in forest liming since 2005, demonstrating a shift in liming objectives towards loamy, productive sites. Evaluation of the liming data focuses on materials and techniques and the various liming emphases for the northern Black Forest and northern lower Alpine foothills. The liming documentation is based on analogous maps of the forest offices (scale: forest districts or compartments).

Keywords: Forest liming, Dolomite, Black Forest, Upper Swabia, Wood ash

Zusammenfassung

Seit den 1980er Jahren wird in Baden-Württemberg die Bodenschutzkalkung angewendet, um Säureinträge aus der Luft zu kompensieren. Die vorliegende Arbeit ist eine Auswertung der Kalkungsdokumentation aus Daten der Unteren Forstbehörden in Baden-Württemberg, die 2005 erstmalig von der FVA zusammengeführt wurde. Es wird dargestellt, dass der Fokus der Kalkungen bisher deutlich auf den Waldflächen des Schwarzwaldes lag, die durch die Grundgesteine des Buntsandsteins und des kristallinen Grundgebirges natürlicherweise und auch immissionsbedingt zu starken Bodenversauerungen neigen. Aber auch im Keuperbergland, dem Odenwald und im Verbreitungsgebiet der Altmoräne in Oberschwaben sind seit den 1980er Jahren regelmäßige Kalkungen durchgeführt worden. Die lehmigen Böden

der Nördlichen Altmoräne wurden insbesondere seit 2005 deutlich mehr gekalkt, was die Veränderung der Kalkungsausrichtung hin zu den produktiveren, lehmigen Standorten zeigt. Die Auswertung der Kalkungsdokumentation geht auf verwendete Ausbringungsmaterialien und -techniken ein und stellt die unterschiedliche Flächenbedeutung der Waldkalkung für die zwei Schwerpunkt-Regionen Nordschwarzwald und Nördliche Altmoräne dar. Die Kalkungsdokumentation beruht auf analogen Karteneinträgen der Forstämter, welche die gekalkten Waldstandorte auf Ebene der Distrikte und Waldabteilungen abbilden, aber nicht detailscharf auf die Aussparung kalkungssensitiver Biotope eingehen.

Schlüsselwörter: Waldkalkung, Dolomitischer Kalk, Schwarzwald, Oberschwaben, Holzasche

1 Einleitung

Seit den 1980er Jahren werden Waldböden in Baden-Württemberg großflächig gekalkt. Grund dafür war zu Beginn vor allem die starke Versauerung der Waldböden durch akute Schwefel-Einträge aus der Luft. Große Waldbestände in den bodensauren Mittelgebirgen wurden schwer geschädigt oder starben ganz ab (ELLENBERG et al. 1986; SCHULZE 1989; REHFUESS 1995). Durch die Versauerung drohten schwach gepufferte, nur mäßig saure Böden ihre Funktionen als Puffer und Filter für Trinkwasser zu verlieren. Daher wurden seit 1983 Kompensations-Kalkungen durchgeführt mit dem Ziel, die damaligen Säureinträge zu neutralisieren (VON WILPERT et al. 2013).

Heute sind die Schwefel-Einträge deutlich zurückgegangen (FISCHER et al. 2012), jedoch führen die durch vergangene Depositionen akkumulierten „Säurealtlasten“ in den Unterböden weiterhin zu einem Abbau der Tonmineralien. Um die Bodenfunktionen langfristig wieder herzustellen, entwickelte die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) mit Forst BW daher seit 2013 ein auf der Kompensations-Kalkung aufbauendes Konzept der Regenerations-Kalkungen. Als Hauptziel hierfür wird die Wiederherstellung der natürlichen, vorindustriellen Nährstoffausstattung formuliert (VON WILPERT et al. 2013).

Die Mehrzahl der Kalkungsmaßnahmen wurde seit Beginn der Kalkungen von den Unteren Forstbehörden dokumentiert und 2005 im Rahmen der Bodenzustandserhebung erstmalig von der FVA aufbereitet. Seitdem wird diese digital vorliegende Dokumentation im Zuge der jährlichen Vollzugsmeldungen vervollständigt. In der vorliegenden Arbeit werden die Kalkungsflächen bis zum Jahr 2012 nach den folgenden Fragestellungen ausgewertet und zusammengefasst:

(I) Kalkungsflächen

Darstellung der Kalkungshistorie nach regionalen und bodenlandschaftlichen Aspekten:

- Wie groß ist die Gesamtkalkungsfläche in Baden-Württembergischen Wäldern?
- Wo wurde (mehrfach) gekalkt?
- Auf welchen Bodenlandschaften wurde gekalkt?

(II) Ausbringungsmaterial

- Welche Kalkungsmittel wurden in welchen Mengen ausgebracht? In welchen Zeiträumen? Welche Nährstoffe wurden beigemischt?
- In welcher Form und mit welcher Technik wurden die Kalke und Dolomite ausgebracht?

(III) Analyse von Schwerpunkt-Regionen

Zwei Regionen, in denen die Bodenschutzkalkung großflächig vorgenommen wurde bzw. wird, und die unterschiedliche Schwerpunkte hatten, sind der Nordschwarzwald und die „Nördliche Altmoräne“ in Oberschwaben. Um die Entwicklung der Kalkung in diesen Gebieten besser nachvollziehen zu können, sollen diese als Beispielregionen zeitlich und nach verschiedenen Öko-Serien analysiert werden.

2 Datengrundlage und Methodik

Die Daten der Waldkalkungsdokumentation stammen größtenteils aus analogem Kartenmaterial, welches von den einzelnen Forstämtern gepflegt wurde. Vorbereitend zur ersten Wiederholung der Bodenzustandserfassung wurden durch die FVA alle verfügbaren Kalkungskarten von den Unteren Forstbehörden eingesammelt und der Stand bis einschließlich des Jahres 2005 digitalisiert. Die erfassten Geodaten und Sachdaten wurden in eine einheitliche Datenstruktur überführt, die in den darauffolgenden Jahren für die digitale Dokumentation eingesetzt wurde. Zusätzlich wurden vom Regierungspräsidium Freiburg dokumentierte Flächen, die im Rahmen der zentralen Ausschreibung erfasst wurden, in den Datenbestand integriert. Daten aus dem Jahr 2012 konnten noch nicht vollständig in die Analyse mit einfließen, da sie zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht in die Datenbank eingepflegt waren.

Das analoge Datenmaterial ist in Teilen ungenau: So geht aus diesem oft weder das Ausbringungsjahr, noch das Ausbringungsmittel oder die Ausbringungsmenge hervor. Diese unvollständigen Eintragungen sind vermutlich den 1980er Jahren zuzuordnen und finden sich vor allem in Baden-Baden, dem Schwarzwald-Baar-Kreis und vereinzelt im gesamten Schwarzwald (ca. 30.000 ha). Es ist davon auszugehen, dass auf Flächen ohne Dosierungsangabe generell dolomitischer Kalk ohne Beimischungen in der empfohlenen

Dosis von 3 t/ha ausgebracht wurde. Ein weiterer Punkt, der bei der Auswertung beachtet werden muss, ist, dass kleinflächig von der Kalkung ausgesparte Bereiche wie Bachläufe oder Blockschutthalden oftmals nicht, und mit Sicherheit nicht flächengenau eingezeichnet wurden. Umgekehrt hierzu kann die Kalkungsfläche auch lokal überschritten worden sein, ohne dass dies dokumentiert wurde.

Zur bodentypologischen Zuordnung der Kalkungsflächen wurden die Bodenübersichtskarte (BÜK 200) sowie die Standortskarten (Stoka) herangezogen. Die digitalen Daten aus den Standortskarten sind jedoch nur für 66 % der Waldfläche in Baden-Württemberg vorhanden, bzw. für 84 % der Kalkungsflächen verfügbar.

Im Rahmen der Auswertung der Schwerpunkt-Regionen wurde eine detailliertere Auswertung vorgenommen, um die Kalkungen nach Öko-Serien zu bestimmen. Diese basiert ebenfalls auf den Daten der Standortskartierung. Die Daten wurden mit ArcGis 10.2 ausgewertet.

3 Ergebnisse

3.1 Kalkungsflächen

Die Gesamtkalkungsfläche in Baden-Württemberg beträgt 299.129 ha. Demnach wurden bis zum Jahr 2012 rund 20 % der Waldfläche des Landes gekalkt. Erste Kalkungsflächen aus den 1950er, 1960er und 1970er Jahren sind nur vereinzelt im Nordschwarzwald und auf der Baar dokumentiert. Die Kalkungsfläche beläuft sich in den Jahren vor 1980 auf rund 2.700 ha, jedoch sind keine genauen Sachdaten zu diesen

Tab. 1: Größe der gekalkten Fläche in verschiedenen Zeiträumen. Angegeben ist jeweils die gesamte Flächengröße (in ha) des jeweiligen Intervalls, sowie die durchschnittliche jährliche Kalkungsfläche (in ha) für jedes Intervall. Es ist zu beachten, dass die Flächengrößen der einzelnen Intervalle in der Summe nicht die Gesamtkalkungsfläche darstellt, da manche Flächen in verschiedenen Zeitintervallen mehrfach gekalkt wurden.

Tab. 1: *Size of the limed areas at different time periods. Information given is the total area (ha) for each time period and the mean annual area limed (ha) for each interval. Note that the sum of all intervals does not equal the total limed area because several areas were limed numerous times at different time periods.*

Zeitraum	Fläche (in ha)	Durchschnittl. pro Jahr (in ha)
Vor 1980	2.689	
1980-1984	5.786	1.157
1985-1989	47.716	9.543
1990-1994	55.768	11.154
1995-1999	53.595	10.719
2000-2004	77.091	15.418
2005-2009	66.671	13.334
2010-2012	42.554	14.185
Ohne Zeitangabe	29.576	

Kalkungen vorhanden. Größtenteils handelt es sich hierbei um Einzelpflanzendüngungen in Kulturen und Vorbauten, wo eine kombinierte Kalk- und Phosphat-Mischung ausgebracht wurde.

Seit den 1980er Jahren wurde in Baden-Württemberg großflächiger gekalkt (siehe Tab. 1). Von 1980 bis 1984 wurde nur vereinzelt Kalk ausgebracht, teils im sogenannten Praxisdüngeversuch, teils weiterhin in Form von Pflanzlochdüngungen. Ab Mitte der 1980er Jahre ist eine deutliche Zunahme der durchschnittlichen jährlichen Kalkungsfläche zu erkennen: Von 1985 bis Ende der 1990er Jahre wurden jährlich rund 10.000 ha Waldfläche pro Jahr gekalkt. Die höchste Kalkungsfläche findet sich im Intervall von 2000 bis 2004 – hier wurden 15.400 ha/Jahr gekalkt. Von 2005–2009 waren es 13.300 ha/Jahr, im Intervall von 2010–2012 rund 14.200 ha/Jahr.

Auf 76% der Fläche (228.409 ha) erfolgte bis 2012 eine einmalige Kalkung, 22% der Fläche wurde bisher zweimal gekalkt, weniger als 2% der Fläche wurde öfter (drei bis sechs Mal) gekalkt.

3.1.1 Analyse nach Bodenlandschaften

Um zu verdeutlichen, auf welchen Böden die Kalkung stattfand, wurde eine Analyse nach Bodenlandschaften durchgeführt (Abb. 1). Insgesamt fand der größte Teil der Kalkungen im Verbreitungsgebiet des kristallinen Grundgebirges statt: 35% aller Kalkungsflächen liegen in diesem Gebiet. 28% aller Kalkungen fanden im Verbreitungsgebiet des Unteren und Mittleren Buntsandsteins sowie des Rotliegenden statt, 18% im Verbreitungsgebiet des Oberen Buntsandsteins. Im Verbreitungsgebiet der Altmoräne und von Deckenschottern fand knapp 6% der Kalkung statt, 4% im Oberrhein- und Hochrheingebiet, 2% im Keuperbergland

Kalkungen in Baden-Württemberg 1980 bis 2012

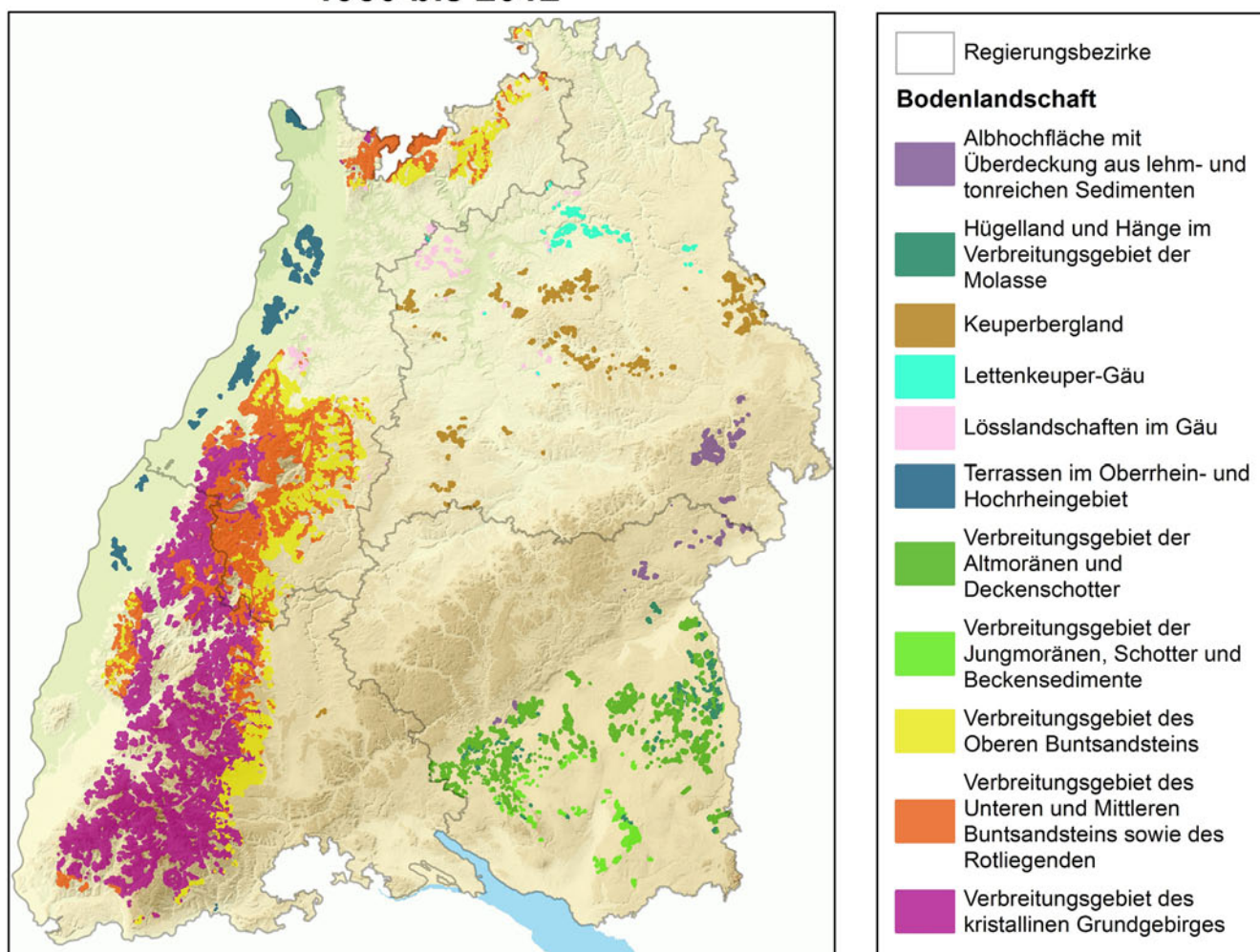


Abb. 1: Kalkung auf verschiedenen Bodenlandschaften in Baden-Württemberg. Der Schwerpunkt liegt hier auf dem Schwarzwald mit den Bodenlandschaften des kristallinen Grundgebirges (lila), sowie dem Oberen und Unteren Buntsandstein (gelb und orange). In Oberschwaben wurde im Verbreitungsgebiet der Alt- und Jungmoränen gekalkt (grün und hellgrün). Auch im Keuperbergland fanden Kalkungen statt (braun).

Fig. 1: Liming on different soil types in Baden-Württemberg. Liming was focused on the Black Forest region with soils of the crystalline basement rocks (violet) and upper and lower Bunter sandstone (Triassic; yellow and orange). In the Oberschwaben region liming occurred in areas of older and younger Pleistocene moraines (green, light green). Certain middle Triassic regions ("Keuper"; brown) were also limed.

und im Gäuland, sowie 2 % auf der Albhochfläche mit Überdeckung aus lehm- und tonreichen Sedimenten. Alle anderen Bodenlandschaften haben Anteile kleiner als 1 % an der Kalkungsfläche. Acht der 30 Bodenlandschaften in Baden-Württemberg wurden nicht gekalkt (v. a. Kalkgebiete).

In Abbildung 1 ist die gekalkte Waldfläche dargestellt. Dabei unterscheiden sich die jeweiligen Anteile der behandelten Flächen deutlich. Bis 2012 wurden 74 % aller Wälder auf Unterem und Mittlerem Buntsandstein gekalkt, 67 % der Wälder auf Oberem Buntsandstein und 53 % der Wälder im kristallinen Grundgebirge. Weiterhin wurden 41 % der Wälder auf den Terrassen des Ober- und Hochrheingebietes und 37 % im Verbreitungsgebiet der oberschwäbischen Altmoräne gekalkt. Das zeigt, dass in diesen Gebieten, auch wenn sie in der Gesamtfläche nur kleinere Teile ausmachen, trotzdem Kalkungs-Schwerpunkte liegen.

Betrachtet man die Kalkung in den unterschiedlichen Bodenlandschaften in den Zeitintervallen seit 1980, so lassen sich Trends bei den Kalkungs-Schwerpunkten festmachen. Von 1985 bis 2004 hat die Kalkung auf Oberem Buntsandstein stetig abgenommen (von 25 % auf 13 % Anteil an der Gesamtkalkungsfläche), seit 2005 hat wiederum ein Anstieg stattgefunden (auf 19 %). Auch im Unteren und Mittleren Buntsandstein gingen die Flächenanteile bis 2009 deutlich zurück (von 37 % auf 20 %), seit 2010 fand wieder ein Anstieg auf 26 % statt. Die Anteile der Waldflächen im kristallinen Grundgebirge schwanken seit 1985 zwischen 44 % und 19 %. Des Weiteren ist ein Trend in der Kalkung im Verbreitungsgebiet der Altmoräne (Oberschwaben) erkennbar, welche dort seit 1995 stetig ansteigt (von 5 % auf 14 % der Waldfläche). Ein leichter Anstieg ist auch auf den sandigen Terrassen im nördlichen Oberrhein, im Hügelland im Verbreitungsgebiet der Molasse sowie auf der Albhochfläche mit Überdeckung aus lehm- und tonreichen Sedimenten zu verzeichnen.

3.2 Ausbringungsmaterial

Das Ausbringungsmaterial und die Ausbringungsmenge bei der Kalkung richten sich nach dem jeweiligen Standort und wurden von der FVA in den Merkblättern 50/2000 und 54/2013 definiert. Frühere Kalkungen erfolgten nach einem FVA-Merkblatt aus dem Jahr 1987 (FVA 1987). Im Normalfall gilt die Dosierungsempfehlung von 3 t dolomitischen Kalkstaub pro Hektar. In Einzelfällen wird empfohlen Kalium oder Phosphat auf Mangelstandorten mit auszubringen.

In den Daten zur Kalkung in Baden-Württemberg finden sich zu 31 % der Kalkungsflächen keine genauen Angaben darüber, welches Dünge- bzw. Kalkungsmittel verwendet wurde. Das mit 63 % am häufigsten verwendete Ausbringungsmaterial sind die Kalke und Dolomite. Weitere eingesetzte Ausbringungsmaterialien sind Einzelstoffdünger, Mehrstoffdünger („Patentkali“) oder Gesteinsmehle (silikatisch und basaltisch), welche nur vereinzelt auf rund 5.000 ha (auf 1,3 % der Fläche) verwendet wurden. Zusätzlich wurde Kohlensäurer Kalk mit Holzaschebeimischung auf 12.074 ha eingesetzt. Im Folgenden wird detaillierter auf die verschiedenen Ausbringungsmaterialien eingegangen.

3.2.1 Kalke, Dolomite und Holzasche

Die Gruppe der eingesetzten Kalke und Dolomite lässt sich in 3 Kategorien unterteilen. Das am häufigsten eingesetzte

Ausbringungsmittel war dolomitischer Kalk ohne Beimischungen¹. Er wurde auf einer Fläche von 145.731 ha eingesetzt.

Weiterhin wurde auf 67.231 ha dolomitischer Kalk mit 3 % weicherdigem Rohphosphat (P_2O_5) eingesetzt, und auf 16.567 ha wurde eine Beimischung von 0,5 t/ha Kaliumsulfat verwendet.

Die Verwendung von Kalziumkarbonat mit weicherdigem Rohphosphat fand vor allem in den 1980er und 1990er Jahren statt. Von 2000 bis 2009 ging der Einsatz dieses Kalkungsmittels zurück. In den 1980er und 1990er Jahren machte der Anteil an Waldkalkungen mit Rohphosphat 28 % an der Gesamtkalkungsfläche aus, von 2000–2009 waren es nur noch 14 % und für die Jahre 2010 und 2011 waren es 3 % (Tab. 2).

Die Beimischung von Kaliumsulfat zu dolomitischen Kalk wurde besonders in den Jahren 2000 bis 2009 durchgeführt, seit 2010 ist diese Mischung nicht mehr verwendet worden. Dafür wurde seit 2010 vermehrt Holzasche als Beimischung eingesetzt, die ebenfalls die Nährelemente Calcium, Phosphor, Kalium und Magnesium enthält. Diese Kombination enthält einen Anteil von 30 % Holzaschen und 70 % dolomitischen Gestein und wird mit 4 t/ha Trockenmaterial ausgebracht (VON WILPERT 2013). Zwischen 2010 und 2012 wurden insgesamt 30 % aller gekalkten Flächen mit Dolomit-Holzaschemischungen gekalkt.

Der Anteil der Flächen, die mit dolomitischen Kalk ohne weitere Beimischungen gekalkt wurden, ist seit Beginn der Kalkung stetig gestiegen – von anfangs 11 % auf heute 60 %. Dies hängt wahrscheinlich mit der gleichzeitig verzeichneten Abnahme der Kalkungsflächen ohne vollständige Angabe des Ausbringungsmittels zusammen. Während diese in den 1980er und 1990er Jahren auf Grund von fehlenden Vorgaben der Kalkungsdokumentation bei etwa 40 % lagen, liegt seit 2010 nur noch ein Flächenanteil von 12 % ohne Angabe des Ausbringungsmittels vor (Tabelle 2).

3.2.2 Weitere Ausbringungsmaterialien

In der Kalkungsdokumentation finden sich einzelne Sonderausbringungen, die von der regulären Bodenschutzkalkung abweichen. Einzelstoffdünger wie Phosphat-, Stickstoff-, Magnesium- oder Kaliumdünger wurde auf einzelnen Flächen bereits 1955 und 1956 verwendet und danach wieder in den 1980er Jahren bis 1991. Auf einzelnen Flächen in Oberschwaben wurde Ammoniumsulfat zur Stärkung der Baumvitalität gegen die Fichtenspinnblattwespe (*Cephalcia abietis*) ausgebracht und Kieserit in Kulturen mit Magnesium-Mangel.

Mehrnährstoffdünger wurde in den Jahren zwischen 1968 und 1989 eingesetzt, hauptsächlich in Einzelpflanzendüngungen in Kulturen und Vorbauten bei Calw und Villingen-Schwenningen. Im Zeitintervall vor 1980 machen die Mehrnährstoffdünger einen Anteil von 21 % an der Gesamtkalkungsfläche aus, während sie einen sehr geringen Anteil in den 1980er Jahren und in den 2000er Jahren einnehmen (1,2 % und 0,3 %).

Silikatisches und basaltisches Gesteinsmehl fand zwischen 1985 und 1998 Einsatz, insbesondere im Breisgau-Hochschwarzwald, vereinzelt auch in Stuttgart, Calw, Schwäbisch Hall, im Schwarzwald-Baar-, Rhein-Neckar- und im Neckar-

1 CaCO₃ mit MgCO₃ > 12% bzw. CaCO₃ mit MgCO₃ < 12%

Tab. 2: Einsatz einzelner Kalkungsmittel in den verschiedenen Zeitintervallen. Es wird angegeben wie groß die gekalkte Fläche pro Ausbringungsmaterial ist und welchen Anteil das Mittel am Gesamteinsatz im jeweiligen Zeitintervall hat.

Tab. 2: Application of different liming substances during different time periods. Shown is the area limed for each liming substance and its proportion in relation to the total limed area.

Kalkungsmittel	Vor 1980	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2010–12
CaCO ₃ ohne Beimischung (in ha)	305,4	8.389,2	29.465,4	77.749,1	25.494,5
CaCO ₃ ohne Beimischung (Anteil in %)	11,4	15,7	26,9	54,1	59,9
CaCO ₃ mit Rohphosphat (in ha)	441,2	15.222,7	30.371,3	20.256,6	1.120,9
CaCO ₃ mit Rohphosphat (Anteil in %)	16,4	28,5	27,8	14,1	2,6
CaCO ₃ mit Kaliumsulfat (in ha)		73,8	2.911,4	13.577,5	
CaCO ₃ mit Kaliumsulfat (Anteil in %)		0,1	2,7	9,4	
mit Holzasche (in ha)	14,0			1.027,2	13.722,2
mit Holzasche (Anteil in %)	0,5			0,7	32,2
Mehrnährstoffdünger (in ha)	2.689,4	645,4		480,3	
Mehrnährstoffdünger (Anteil in %)	21,0	1,2		0,3	
ohne Angabe (in ha)	1.179,5	21.540,7	40.844,3	27.268,1	4.905,9
ohne Angabe (Anteil in %)	43,9	40,3	37,3	19,0	11,5
Gesamtfläche	2.689,4	53.501,9	109.362,7	143.761,9	42.554,3

Odenwald-Kreis. Auf Grund der geringeren Löslichkeit und damit langsameren Wirkungsweise von silikatischen Gesteinsmehlen werden diese insbesondere in Wasserschutzgebieten verwendet, um den Humusabbau und damit verbunden Nitratauswaschung möglichst gering zu halten.

3.2.3 Dosierung, Ausbringungsform und Ausbringungstechnik

Wie bereits erwähnt, wird in den Merkblättern der FVA 50/2000 und 54/2013 eine Dosis von 3 t/ha Kalkstaub empfohlen (VON WILPERT & SCHÄFFER 2000; WILPERT et al. 2013). Auf Grund der verschiedenen Standortsfaktoren sowie der unterschiedlichen Wirkweise der Ausbringungsmittel ist diese Angabe jedoch zu differenzieren. So sollte auf sehr stark versauerte Böden eine Dosis von bis zu 4 t/ha eingesetzt werden. Auf wasserdurchlässigen Böden sollte die Dosis auf 2,5 t/ha reduziert werden, um das Risiko von Auswaschungen in das Grundwasser zu verringern.

Die in den Merkblättern empfohlenen Ausbringungsmengen finden sich weitestgehend auch in der Kalkungsdokumentation wieder. Kalkungen mit einer höheren Dosis (>3,4 t/ha) fanden vor allem auf Plateaus der höheren Lagen im Schwarzwald, sowie auf flachhügeligen Lettenkeuper-Platten und der hügeligen Altmoränenlandschaft Oberschwabens statt. Dagegen konzentrierten sich Kalkungen mit geringerer Dosis (<3,0 t/ha) auf die stark geneigten bis steilen Hänge des Buntsandsteins sowie die steileren Hänge im Keuperbergland, bei denen die Gefahr der oberflächlichen Auswaschung gegeben ist.

Im Schnitt wurden die Kohlensäuren Kalke zu 3,2 t/ha ausgebracht. Die durchschnittliche Dosierung der Einzelnährstoffdünger war mit 2,4 t/ha etwas geringer, die der Mehrnährstoffdünger betrug sogar nur 0,4 t/ha, diese wurden jedoch, wie oben beschrieben, auch nur in Einzelpflanzungen

und Vorbauten eingesetzt. Gesteinsmehle wurden auf Grund der geringeren Löslichkeit des Materials in höheren Dosen eingesetzt, im Schnitt mit 5,5 t/ha. Bei Mischungen von Dolomit mit Holzasche wurde bisher im Schnitt mit 4,1 t/ha gearbeitet. Sonstige Düngemitteln wurden mit 3,2 t/ha eingesetzt, hier liegt jedoch der Großteil der Daten (86%) ohne Dosierungsangabe vor. Für 33% aller Flächen finden sich in der Kalkungsdokumentation keine Angaben über die Dosierung.

Auf 40% aller Flächen ist keine Ausbringungsform definiert. Stäube wurden auf 22% der Fläche ausgebracht, Granulat auf 17%, erdfeuchtes und gröberes Material auf 20% der Fläche. Je nach Ausbringungsform des Materials wurden unterschiedliche Ausbringungstechniken eingesetzt. Staub wurde generell vom Boden aus verblasen, teils auch per Helikopter in angefeuchteter Form ausgebracht. Granulat wurde hauptsächlich per Helikopter ausgebracht. Auch erdfeuchtes und gröberes Material wurde zum größten Teil aviotechnisch ausgebracht, teils jedoch vom Boden aus verblasen. In 90% der Fälle, in denen die Ausbringungsform nicht bekannt war, ist auch keine Ausbringungstechnik verzeichnet worden. Sonstige Ausbringungstechniken wie Streuen und Handausbringung wurden in Praxisdüngerversuchen in den 80er Jahren auf 6.164 ha angewandt. Auch die kombinierte Ausbringung sowohl auf dem Boden als auch in der Luft spielt insgesamt eine untergeordnete Rolle, sie wird nur bei erdfeuchtem und gröberem Material angewandt und fand bisher nur auf 5.682 ha statt.

3.2.4 Ausbringungsmittel in den Bodenlandschaften

Dolomitischer Kalk ohne Beimischungen war in nahezu allen Bodenlandschaften das Haupt-Ausbringungsmittel. Ausnahme bildet die Bodenlandschaft der Nördlichen Altmoräne in Oberschwaben, wo auf 50% der Flächen dolomitischer

Kalk mit Kaliumbeimischung und auf 26% der Flächen Holzaschebeimischungen verwendet wurde. Auch auf den Albhochflächen mit Überdeckung aus lehm- und tonreichen Sedimenten wurde auf 27% der Flächen Kalk mit Kaliumsulfat und auf 38% Kalk mit Holzaschebeimischung eingesetzt. In den drei Haupt-Kalkungs-Bodenlandschaften (Kristallines Grundgebirge, Oberer Buntsandstein sowie Unterer und Mittlerer Buntsandstein) wurde neben dem Kohlensäuren Kalk ohne Beimischung auch weicherdiges Rohphosphat auf jeweils rund 20% der Flächen eingesetzt. Auch im Keuperbergland fand das Rohphosphat auf 13% der Flächen Anwendung.

3.3 Analyse von Schwerpunkt-Regionen

Im Rahmen der Auswertung der Schwerpunkt-Regionen wurde eine detailliertere Auswertung vorgenommen, um die Kalkungen nach Öko-Serien² zu bestimmen. Die Ökoserien wurden hierbei in 11 Gruppen eingeteilt: Block- und Fels-hänge, Grus- und Rutschhänge, sandige Hänge, lehmige Hänge, Rücken und Kuppen, Sandböden, Lehm Böden, Rin- nen und Senken, vernässende Böden, Auen sowie sonstige Flächen. Dazu kamen noch Flächen, die nicht standortskarti- ert und daher ohne Daten waren. Sand- und Lehm Böden wurden des Weiteren unterteilt in vernässende und nicht vernässende Böden. Dabei ist zu beachten, dass die Aufgliederung der Kalkungsflächen in der Kalkungsdokumentation nach Ökoserien im Bereich von punktuellen Sonderstandor- ten wie z.B. Missen und Mooren nicht auswertbar ist, da die Kalkungsdokumentation auf analogen Karten der Forstämter basiert. Dort wurden nur die gekalkten Waldorte (Distrikte, Abteilungen) als Ganzes nachgewiesen. In diese Flächen eingebettete, nach den jeweils gültigen Kalkungsmerkblättern auszusparende kalkungssensitive Sonderstandorte wurden dort nicht konsequent und mit Sicherheit nicht flächenreprä- sentativ erfasst.

3.3.1 Waldkalkung im Nordschwarzwald

Seit Beginn der Kalkungen liegen die Wälder des Nord- schwarzwaldes³ im Fokus der Kalkungseinsätze (Tab. 3). Bisher wurde 62% der Waldfläche im Nordschwarzwald gekalkt, 70% davon ist einmal gekalkt worden, 27% zwei Mal, 3% drei Mal. Die vorherrschenden Bodenlandschaften sind hier das kristalline Grundgebirge, der Obere, Mittlere und Untere Buntsandstein sowie das Rotliegende.

Mittlerweile sind im Nordschwarzwald 54% der Waldflächen im Verbreitungsgebiet des kristallinen Grundgebirges gekalkt worden, 89% auf Oberem Buntsandstein und 88% auf Unte- rem und Mittlerem Buntsandstein.

Nach vereinzelt Kalkungen vor bzw. Anfang der 1980er Jahre fanden die häufigsten Kalkungen mit jährlich rund 3.800 ha gekalkter Waldfläche im Intervall von 1985 bis 1995 statt. Bis 2005 lagen die jährlichen Kalkungsflächen im Schnitt bei einer Größe von 3.000–3.500 ha. Obwohl noch

2 In einer Ökoserie werden Bodenformen zusammen gefasst, die für die Vegetation ähnliche Substrate bilden, die sich in Hinblick auf Bodenart, Bodenart-Schichtung und Struktur nahestehen und als Wurzelräume der Waldbaumarten gemeinsame Züge aufweisen (SCHLENKER 1964).

3 Als Nordschwarzwald werden hier die beiden Wuchsgebiete Östlicher und Westlicher Nordschwarzwald zusammengefasst. Der Großteil der Flächen mit Waldkalkung liegt in den Landkreisen Calw und Freuden- stadt, im Süden auch in Teilen des Ortenaukreises und des Kreises Rottweil, im Norden in Teilen der Kreise Rastatt und Pforzheim. Der Kreis Murgschifferschaft/Heiligenfon liegt ganz im Wuchsgebiet Nord- schwarzwald.

Tab. 3: Größe der Kalkungsflächen im Nördlichen Schwarz- wald und in der Nördlichen Altmoräne in den jeweiligen Zeitintervallen. Angegeben ist jeweils die Flächengröße insgesamt für jedes Intervall sowie die durchschnittliche Flächengröße pro Jahr des jeweiligen Zeitabschnittes.

Tab. 3: *Size of the limed area in the Northern Black forest and on the northern older moraine in Oberschwaben in relation to time intervals. Information is given about the size of the area limed for each time period, and the mean area limed annually for each time period.*

Zeitintervall	Nördlicher Schwarzwald		Nördliche Altmoräne	
	Fläche (in ha)	Pro Jahr (in ha)	Fläche (in ha)	Pro Jahr (in ha)
vor 1980	1.589		7	
1980–1984	2.082	417	563	113
1985–1989	19.124	3.825	572	115
1990–1994	18.908	3.782	0	0
1995–1999	16.760	3.352	2.618	524
2000–2004	15.326	3.065	3.207	642
2005–2009	17.647	3.530	9.376	1.875
2010–2012	14.647	4.882	5.364	1.788
unbekannt	4.592		11	

nicht alle Zahlen aus 2012 vorliegen, ist seit 2010 ein Anstieg auf knapp 5.000 ha pro Jahr erkennbar (Tab. 3).

Durch die Verschneidung der Kalkungsflächen mit der digitalen Standortskarte lässt sich erkennen, auf welchen Öko-Serien im Nordschwarzwald vorrangig Kalkungen durchgeführt wurden (Abb. 2) und welche zeitlichen Tendenzen erkennbar sind. Die Buntsandsteinböden lagen über den gesamten Zeitraum hinweg im Fokus der Bodenschutz- kalkungen im Nordschwarzwald. Die Gruppe der sandigen Hänge nimmt seit den 1980er Jahren konstant Flächenan- teile zwischen 35% und 40% ein. Dazu kommt noch die Ökoseriengruppe der Sandböden allgemein. In den 1980ern machten diese 28% aus, in den 1990ern ist ein Rückgang auf 21% erkennbar, ab 2000 ist der Flächenanteil wieder auf 27% angestiegen.

Die Lehm Böden machen im Schwarzwald generell nur einen kleinen Anteil aus, dementsprechend sind auch Kalkungen nur in sehr geringem Maße auf Lehm Böden durchgeführt wor- den. Die Anteile an der Gesamtkalkungsfläche schwanken für Lehm Böden zwischen 2% und 4% pro Jahrzehnt.

Im westlichen und nördlichen Nordschwarzwald haben seit den 1980er Jahren auch die Block- und Schutthänge Anteile an der Kalkungsfläche, die zwischen 8% und 11% lagen, zuletzt bei 5%. Auch die Grus- und Rutschhänge, die sich im westlichen und südwestlichen Teil des Nordschwarzwal- des befinden, wurden seit den 1980er Jahren kontinuierlich gekalkt: In den 1980er Jahren machten sie einen Anteil von 10% an der Kalkungsfläche aus, in den 1990ern waren es 17%. Zwischen 2000 und 2009 ist die Kalkung der Grus- und Rutschhänge auf 9% zurückgegangen. In den Jahren 2010 und 2011 wurden insgesamt 5% der Fläche dieser Ökoserien

Kalkungen im Wuchsgebiet Nordschwarzwald

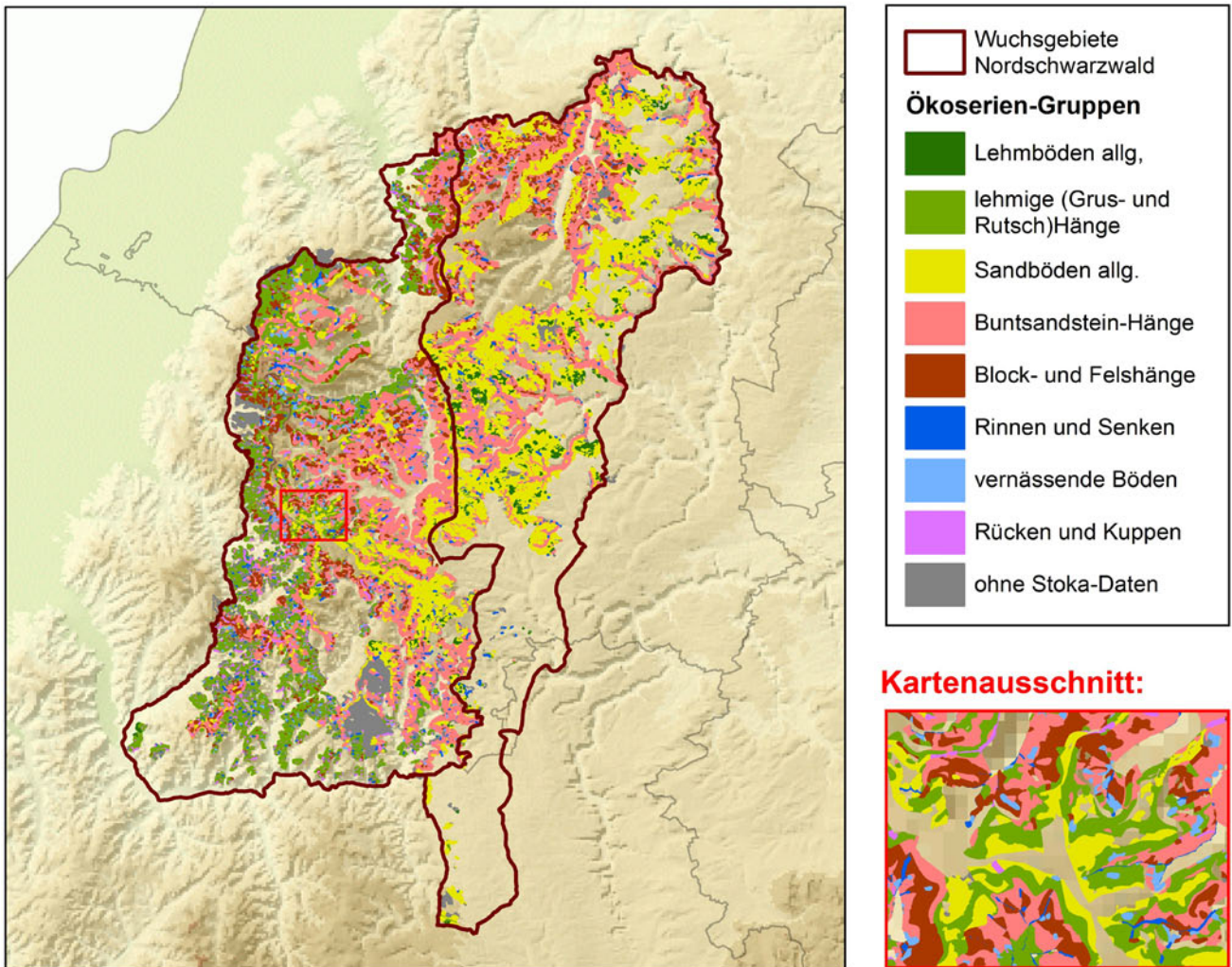


Abb. 2: Kalkungen im nördlichen Schwarzwald im Bereich verschiedener Ökoserien-Gruppen. Im westlichen Teil des Gebietes fand die Kalkung vorwiegend auf lehmigen Hängen statt (grün), im östlichen Teil größtenteils auf den Buntsandstein-Böden (gelb).

Fig. 2: Liming in the Northern Black Forest for different ecoseries (= groups of similar site classes). In the western part liming was mainly done on loamy slopes (green), while in the eastern part predominantly on Bunter sandstone (Lower Triassic; yellow).

im Nordschwarzwald gekalkt. So wurden im Nordschwarzwald insgesamt etwa 7.000 ha Block- und Felshänge über Jahrzehnte und bis in jüngste Zeit gekalkt. Die Interpretierbarkeit dieser Daten ist dabei allerdings nur bedingt möglich, da Aussparungen, wie oben beschrieben, oft nicht verzeichnet wurden.

3.3.2 Waldkalkung in der Nördlichen Altmoräne

Im Gegensatz zum Nordschwarzwald ist das Wuchsgebiet der Nördlichen Altmoräne⁴ erst seit 1995 im größeren Stil gekalkt worden (Tabelle 3). Bis 2004 wurden hier auf Waldflächen zwischen 100 ha bis 600 ha pro Jahr Kalkungen durchgeführt. Seit 2005 sind es rund 1.800 ha pro Jahr. Insgesamt wurde auf der Nördlichen Altmoräne bislang

18.195 ha gekalkt, was 31% der Waldfläche darstellt. Davon wurden 90% der Flächen bisher einmal gekalkt, 10% zweimal.

Die vorherrschenden Bodenlandschaften sind hier das Hügelland und die Hänge im Verbreitungsgebiet der Molasse, sowie das Verbreitungsgebiet der Altmoränen und Deckenschotter. 20% der Wälder auf dem Hügelland und den Hängen der Molasse wurden bisher gekalkt sowie 41% der Wälder im Bereich der Altmoräne und Deckenschotter. Auch die Waldfläche in Auen und Uferbereichen des Bodensees machen im Wuchsgebiet eine größere Fläche aus, diese wurden aber nicht gekalkt.

Die Kalkung im Verbreitungsgebiet der Nördlichen Altmoräne fand vorwiegend auf Lehmböden statt, welche im Wuchsgebiet insgesamt die flächenbedeutendste Öko-Serien-Gruppe ausmachen (Abb. 3). Die Analyse der Öko-Serien-Gruppen zeigt, dass in den 1990ern rund 74% der gekalkten Flächen

⁴ Im Wuchsgebiet der Nördlichen Altmoräne befinden sich die Kreise Sigmaringen und Biberach, im Norden reicht das Gebiet bis in den Alb-Donau-Kreis und nach Ulm, im Westen bis Konstanz.

zu den Lehm Böden gehörten. Anfang 2000 sank der Anteil der Lehm Böden an gekalkten Flächen auf 51 % ab, seit 2005 sind es wieder 59 %. Da in den einzelnen Intervallen teilweise größere Flächen ohne Angabe der Öko-Serien-Gruppe vorliegen, ist es zu vermuten, dass der Anteil der Lehm Böden an der Kalkungsfläche insgesamt kontinuierlich zwischen 60 % und 70 % lag. Dazu kommt die Gruppe der lehmigen Hänge, die konstant einen Anteil von etwa 7 % ausmacht. Die Anteile der sandigen Böden an der Kalkungsfläche schwanken seit den 1990ern zwischen 8 % und 15 % und sind durch das geringe Vorkommen der Öko-Serien-Gruppe im Wuchsgebiet zu erklären.

4 Diskussion

4.1 Zeitliche Tendenzen

Der Schwerpunkt der Kalkung liegt seit Mitte der 1980er Jahre auf dem Verbreitungsgebiet des kristallinen Grundgebirges im Schwarzwald sowie dem Oberen, Mittleren und Unteren Buntsandstein im Schwarzwald, auf der Baar und im Odenwald. Auch im Keuperbergland werden seit den 1980er Jahren Kalkungen durchgeführt. Die Kalkung der Nördlichen Altmoräne mit den lehmigen Böden gelangt nach Kalkung kleiner Flächen in den 1980er Jahren dann erst ab 2005 in den Fokus der Kalkungen. Auch auf der Schwäbischen Alb werden zu diesem Zeitpunkt erstmals die Albhochflächen mit Überdeckung aus lehm- und tonreichen Sedimenten gekalkt. Hier deutet sich eine Veränderung der

Kalkungsausrichtung hin zu lehmigen Böden an. Die Böden des Buntsandsteins im Schwarzwald werden flächenmäßig ohne größere Veränderungen weiterhin relativ großflächig gekalkt. Im Verbreitungsgebiet des kristallinen Grundgebirges ist seit einem „Kalkungshöhepunkt“ zwischen 2000 und 2004 eine Abnahme der Kalkungsflächen erkennbar (von rund 6.000 ha/Jahr zwischen 2000 und 2004 auf rund 1.500 ha/Jahr in den Jahren 2010/2011).

Hier zeigt sich die Entwicklung von der „**Meliorationskalkung**“ vor den 1980er Jahren über die „**Kompensationskalkung**“ zwischen etwa 1983 und 2013 zur „**Regenerationskalkung**“, die seit 2013 durchgeführt wird. Grund für die Veränderung der Kalkungs-Ausrichtung ist die großflächig hohe Bodenversauerung, welche die die Bodenfunktionen auch nach dem Rückgang der sauren Schwefeleinträge der 1980er langfristig weiter belastet. Mit dem geänderten Konzept sollen diese „Versauerungsalasten“ schrittweise abgebaut werden.

Eine Veränderung der Kalkungsausrichtung zeigt sich auch in der Verwendung verschiedener Ausbringungsmaterialien. Mehrnährstoffdünger wurden insbesondere vor 1980 in Einzelpflanzendüngungen und Vorbauten eingesetzt. Der Einsatz von Kalium als Beimischung beschränkte sich auf kleine Flächen in den 90ern und größere Flächen bis 2009, da in den 1990er Jahren zunehmend Kaliummangel konstatiert wurde (VON WILPERT & HILDEBRAND 1994). Von 1990 bis 2008 wurde zu dolomitischem Kalk fallweise 500 kg/ha Kaliumsulfat beigemischt. Da Kaliumsulfat hoch löslich ist

Kalkungen im Wuchsgebiet Nördliche Altmoräne

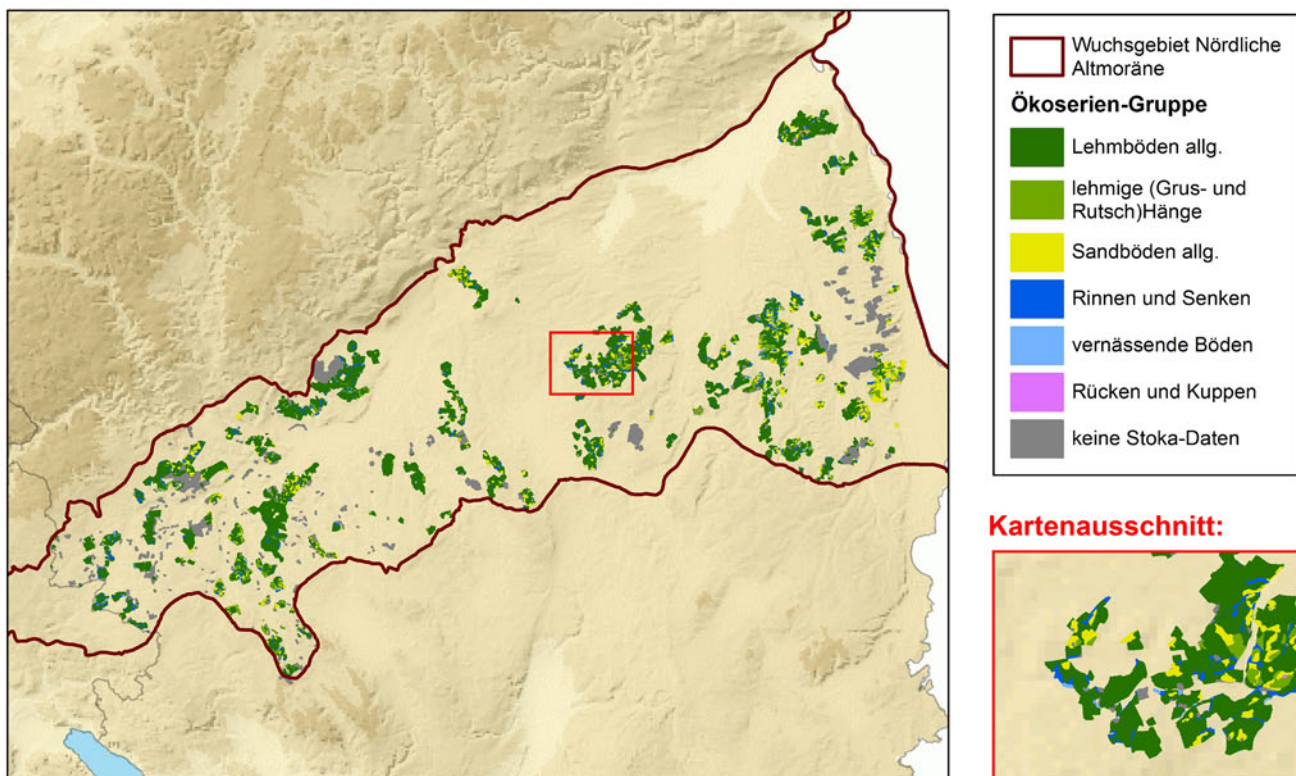


Abb. 3: Kalkungen im Gebiet der Nördlichen Altmoräne (Oberschwaben) im Bereich verschiedener Ökoserien-Gruppen. Hier fand die Kalkung hauptsächlich auf lehmigen Böden statt.

Fig. 3: Liming in the region of the northern older moraine in Oberschwaben within different groups of ecoseries. Liming occurred mainly on loamy soils.

und durch das mobile Sulfatanion einen äquivalenten Export an basischen Kationen provoziert, ist diese Maßnahme wenig ökosystemkonform. Seit 2008 wurden die Kaliumzuschläge zunehmend und seit 2010 ausschließlich durch die Beimischung von qualitätsgesicherter Holzasche ersetzt. Holzasche ist ähnlich langsam löslich wie fein aufgemahlener Dolomitmalk und enthält kein mobiles und dadurch versauernd wirkendes Anion. Sie gilt auf Grund ihrer Nährelementgehalte als calciumdominierter Mehrnährstoffdünger, der auch eine signifikante Verbesserung der Kaliumverfügbarkeit herbeiführen kann (SCHÄFFER 2002). Da insbesondere auf den stark aggregierten Lehmböden seit den 1980er Jahren größere Mengen an Kalium von den Aggregatoberflächen – das ist die Rhizospäre der Waldbäume im engeren Sinn – ausgewaschen wurden (VON WILPERT & HILDEBRAND 1994, MEINING et al. 2012, VON WILPERT et al. 2013), zudem das verstärkte Baumwachstum erhöhten Nährstoffbedarf nach sich zieht, wird angestrebt auf diesen Böden in Zukunft verstärkt Holzasche als Beimischung einzusetzen (VON WILPERT et al. 2013). Nach VON WILPERT et al. (2013) ist aktuell auf rund einem Drittel der kalkungsbedürftigen Flächen in Baden-Württemberg ein latenter Kalium-Mangel gegeben.

4.2 Interpretation der Ergebnisse

Die Interpretation der Ergebnisse ist auf Grund der Unschärfe des analogen Kartenmaterials (grober Maßstab, analoges Kartenmaterial) nicht eindeutig zu machen. Auch ist die Dokumentation der gekalkten Waldstandorte selbst in jüngerer Zeit noch lückenhaft. Seit 2000 liegen immer noch zwischen 10 % und 20 % der Kalkungsflächen ohne genaue Angabe des Kalkungsmittels sowie der Ausbringungsmenge vor.

Aus Sicht des Naturschutzes wurde in der Vergangenheit die Kalkung auf sensiblen Standorten, wie Müssen, Mooren oder Block- und Felshängen kritisiert. Die vorliegende Dokumentation kann in diesem Sinne nur teilweise eine Antwort geben auf die Frage ob, bzw. in welchen Mengen sensible Standorte gekalkt worden sind, da insbesondere bei Mooren und Müssen die Datengrundlage der Kalkungsflächen nicht ausreicht. Jedoch wurden im Nordschwarzwald rund 2.900 ha Block- und Felshänge zwischen 2000 und 2009 (ca. 9 % der im Nordschwarzwald gekalkten Flächen) gekalkt, was aus naturschutzfachlicher Sicht als kritisch einzustufen ist. Dieser hohe Anteil lässt sich nicht allein durch die Unschärfe der Kalkungsdokumentation erklären, sondern auch durch definitorische Unschärfen des Sammelbegriffs der Block- und Felshänge in der Standortkartierung. Seit 2010 das regenerationsorientierte Kalkungsprogramm greift, wurden noch etwa 5 % gekalkter Block- und Felshänge verzeichnet (knapp 700 ha zwischen 2010 und 2012). Dass sensible Standorte wie Müssen und Moore jedoch generell von der Kalkung auszuschließen sind, wird in den Merkblättern der FVA seit 2000 deutlich kommuniziert.

Die Ziele und Auswirkungen der Waldkalkung werden teilweise kontrovers diskutiert. Eine große Anzahl von Publikationen befasst sich mit den bodenchemischen und walddernährungskundlichen Aspekten von Waldkalkung (vgl. VON WILPERT et al. 1993, SIEFERMANN-HARMS et al. 1997, SCHÄFFER et al. 2001, SCHÄFFER et al. 2002, VON WILPERT & LUKES 2003, VON WILPERT 2003, VON WILPERT et al. 2013), aber auch mit den Wirkungen auf Stoffausträge und Wasservorsorge in bewaldeten Wassereinzugsgebieten (PUHLMANN et al. 2007, VON WILPERT et al. 2007, SUCKER et al. 2009). Aus bodenkundlicher Sicht überwiegen deutlich die befürwortenden

Argumente (VON WILPERT et al. 2013). Weniger gut untersucht sind die biozönotischen Auswirkungen, hier werden neben den positiven Auswirkungen auch eine Vielzahl an negativen Folgen gesehen wie Auftreten von Nitrophyten und Ruderalarten oder Rückgang von Säure- und Magerkeitszeigern (WEIHS & LANGHORST 1991, SCHMIDT 1992, FALKENGREN-GRERUP & TYLER 1993, AHRENS 1995, MATTERN 1996, SCHMIDT 2002, KRAFT et al. 2003, REIF et al. 2014).

Um die Folgen der Waldkalkung sowohl für den Bodenhaushalt als auch die Bodenvegetation zu überprüfen, wird seit 2015 durch die FVA ein systematisches Monitoring auf 12 über das gesamte Land Baden-Württemberg verteilten Standorten hinsichtlich Bodenzustand, Waldernährung und Zusammensetzung der Bodenvegetation durchgeführt. Hierbei wird jeweils eine ungekalkte Fläche mit drei Flächen von unterschiedlicher Kalkungsintensität verglichen. Ein systematisches biozönotisches Monitoring (Kryptogamen, Bodelebewesen) gekalkter versus ungekalkter, standortsgleicher Flächen findet zur Zeit nicht statt.

Der Begriff der Kalkung wird oftmals mit dem Begriff der Düngung gleichgesetzt. Im vorliegenden Artikel wurde die Kalkung jedoch von einer Düngung unterschieden, da die Kalkung auf eine Regeneration versauerter Bodenzustände abzielt, eine Düngung jedoch auf eine Verbesserung der Waldernährungssituation. Von einer düngenden Wirkung der Kalkung kann dann gesprochen werden, wenn zu dolomitischem Kalk zusätzliche Nährstoffe beigemischt werden. Laut VON WILPERT et al. (2013) sind Ernährungsstörungen wie der Kalium- und Magnesiummangel auf 1/3 der Waldflächen Baden-Württembergs jedoch auch auf versauerte Bodenzustände zurückzuführen, sodass eine Beimischung von Kalium zur Kalkung empfohlen wird, um eine langfristige Stabilisierung der Versorgung mit diesen Nährelementen zu erreichen.

Beimischungen von Kationen in Holzasche, einem Mehrnährstoffdünger, können zu einer langfristigen Stabilisierung der Versorgung mit diesen Nährelementen führen. Löslicher Phosphor dagegen kommt von Natur aus nur in geringen Mengen im Boden vor (MARSCHNER 2012). Der in jüngster Zeit für manche Regionen konstatierte Phosphormangel (JONARD et al. 2009, BRAUN et al. 2010) kann dagegen auf einen erhöhten Nährstoffbedarf durch das heute gesteigerte Baumwachstum und auf eine durch Bodenversauerung verringerte P-Aufnahmeeffizienz des Wurzelwerks der Bäume (MENDEL 1961) zurückgeführt werden, die P-Komponente bei Waldkalkungen ergänzt somit als weiteres düngendes Element die hohen Stickstoffeinträge aus der Luft (JONARD et al. 2015, TALKNER et al. 2015). Inhaltlich sind diese Phosphat-Zugaben bei der Waldkalkung jedoch von der Praxis landwirtschaftlicher Düngung abzugrenzen, da dort sehr viel höhere Nährelementgaben in hoch löslicher Form mit dem Ziel einer Ertragssteigerung ausgebracht werden.

In Baden-Württemberg wurden zwischen 1980 bis 2000 auf mehr als 25 %, 2000 bis 2009 auf etwa 15 % der Waldkalkungsflächen Phosphatbeimischungen eingesetzt. Dies erfolgte durch eine Beimischung von 3 % weicherdigem Rohphosphat, also 90 kg/ha schwer löslichem Rohphosphat, verabreicht im Turnus von 10 bis 15 Jahren, das 11,4 kg/ha P enthält. Unter der Annahme einer nach 10-Jahren erfolgenden Wiederholung der Kalkung würde das einer P-Gabe von 1,1 kg/ha/a entsprechen. Dies ist sehr genau die Größenordnung an P, die mit der Holzernte exportiert wird (VON WILPERT et al. 2011). Dabei ist zu beachten, dass die Kalkung

im 10–15-Jahresturnus erfolgt, aber Holzasche nur bei nachgewiesenem akutem oder latentem K- und/oder P-Mangel beigemischt wird. Die seit 2010 übliche Beimischung von max. 30% Holzasche enthält etwa 75% der früher mit Rohphosphat verabreichten P-Mengen.

Zum Vergleich: Eine bedarfs- und umweltgerechte Grunddüngung in der Landwirtschaft hat eine P-Dosierung von – je nach Standort – durchschnittlich 17,5 bis 39 kg/ha/a (LTZ 2011), die allerdings zu erheblichen Anteilen in hoch löslicher Form als Neutralsalz verabreicht wird. Die Beimischung von P bei der Waldkalkung mit Holzaschebeimischung beträgt also etwa 2 bis 5% dieser in der Landwirtschaft üblichen Intensität.

4.4 Ausblick

Die regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung ist in Baden-Württemberg bis 2050 als langfristige Maßnahme geplant, um die vorindustrielle Basenausstattung der Böden wieder anzunähern (VON WILPERT et al. 2013). Die Pläne künftiger Kalkungen unterlagen einer Revision, in welcher – je nach Bodenbedarf – 1-, 2- oder 3-fache künftige Kalkungen vorgesehen sind (VON WILPERT et al. 2013).

Die praktische Durchführung der Kalkung wird seit 2013 mittels eines GIS-basierten Planungsinstruments durchgeführt und dokumentiert. Dabei wird eine weitgehend automatisierte Klassifikation von Raumeinheiten in „zu kalkende Flächen“, „Prüfflächen“ und „nicht kalkungsbedürftige Flächen“ vorgenommen. Dieses vorläufige Ergebnis wird durch einen bodenkundlichen Experten an der FVA geprüft und durch Bodenprobenentnahme verifiziert. Bei der Ableitung der Kalkungskulissen werden Flächen, auf denen durch eine Kalkung naturschutzfachliche Aspekte negativ beeinträchtigt werden könnten, einschließlich eines 100 m breiten Pufferstreifens ausgeschlossen. Innerhalb der im Jahr 2014 beplanten Kalkungskulisse wiesen insgesamt 14–15% der potentiellen Kalkungsflächen den Schutzstatus von FFH-Gebieten, Bannwäldern oder kalkungssensibler Waldbiotope bzw. kalkungssensibler Standorteinheiten auf und sind deshalb von der Kalkung ausgenommen worden.

Bis 2021 ist geplant, landesweit jährlich 21.000 ha Waldfläche zu kalkan – ca. 30% mehr als die bisherige Kalkungsintensität, mit der bis 2010 die aktuellen Säureeinträge neutralisiert werden sollten und keine Regeneration der Bodenausstattung intendiert war. Der Fokus soll dabei auf den lehmigen Standorten liegen, während die von Natur aus sauren Standorte des Schwarzwalds von der Kalkung ausgespart werden oder nur noch ein weiteres Mal gekalkt werden sollen. Für die lehmigen Böden der Vorbergzonen von Schwarzwald, Odenwald und Schwäbischer Alb werden Kalkungsempfehlungen von bis zu 4-Mal alle 10 Jahre ausgesprochen, jeweils mit einer Ausbringungsmenge von 3 t/ha.

Insgesamt ist durch die neue Ausrichtung der Bodenschutzkalkung ein Anstieg der gekalkten Waldfläche auf 680.000 ha geplant, also von 20% gekalkter Landes-Waldfläche auf 45%. Die Kalkung soll zur langfristigen Stabilisierung der Kaliumversorgung der Wälder, insbesondere auf Lehmen vermehrt mit Holzasche als Beimischung zu dolomitischen Gesteinsmehlen durchgeführt werden.

Bodenschutz und Naturschutz vertreten gleichermaßen berechnete Vorsorgeaspekte. Diese müssen anhand objektiver Kriterien gegeneinander abgewogen werden.

Mögliche Konflikte werden dadurch vermieden, dass sensitive Naturschutzflächen mit bodensauer-oligotraphenten Lebensgemeinschaften bei der Bodenschutzkalkung konsequent ausgespart werden.

Literatur

- AHRENS, M. (1995): Einfluss der Waldkalkung auf die Moosflora und die Moosvegetation des Nordschwarzwalds. – Veröff. Naturschutz Landschaftspflege Bad.-Württ. **70**: 455-496.
- BRAUN, S., THOMAS, V.F.D., QUIRING, R., FLÜCKIGER, W. (2010): Does nitrogen deposition increase forest production? The role of phosphorus. *Environm. Pollut.* **158**: 2043-2052.
- ELLENBERG, H., MAYER, R., SCHAUERMANN, J. (1986): Ökosystemforschung – Ergebnisse des Sollingprojekts 1966-1986. 507 pp., Ulmer, Stuttgart.
- FALKENGREN-GRERUP, U., TYLER, G. (1993): *Experimental evidence for the relative sensitivity of deciduous forest plants to high soil acidity.* – *For. Ecol. Managem.* **60**: 311-326.
- FISCHER, R., WALDNER, P., CARNICER, J., COLL, M., DOBBERTIN, M., FERRETTI, M., HANSEN, K., KINDERMANN, G., LASCH-BORN, P., LORENZ, M., MARCHETTO, A., MEINING, S., NIEMINEN, T., PEÑUELAS, J., RAUTIO, P., REYER, C., ROSKAMS, P., SÁNCHEZ, G. (2012): THE CONDITION OF FORESTS IN EUROPE. EXECUTIVE REPORT. ICP FORESTS, HAMBURG, 24 PP. URL: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-executive-report>
- FVA – FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG (1987): Empfehlungen zur Walddüngung in Südwestdeutschland. Merkblätter Nr. **37**: 11 S.
- JONARD, M., ANDRÉ, F., DAMBRINE, E., PONETTE, Q., ULRICH, E. (2009): Temporal trends in the foliar nutritional status of the French, Walloon and Luxembourg broad-leaved plots of forest monitoring. *Ann For Sci* **66**: 412.
- JONARD, M., FÜRST, A., VERSTRAETEN, A., THIMONIER, A., TIMMERMANN, V., POTOCIC, N., WALDNER, P., BENHAM, S., HANSEN, K., MERILÄ PÄIVIONETTE, Q., DE LA CRUZ, A. C., ROSKAMS, P., NICOLAS, M., CROISÉ, L., INGERSLEV, M., MATTEUCCI, G., DECINTI, B., BASCIETTO, M., RAUTIO, P. (2015): Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology* **21**: 418-430, doi: 10.1111/gcb.12657.
- KRAFT, M., REIF, A., SCHREINER, M., ALDINGER, E. (2003): Veränderungen der Bodenvegetation und der Humusaufgabe im Nordschwarzwald in den letzten 40 Jahren. – *Forstarchiv* **74**: 3-15.
- LANDWIRTSCHAFTLICHES TECHNOLOGIEZENTRUM AUGUSTENBERG (LTZ) Hrsg. (2011): Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung, Grunddüngung im Ackerbau, H. **4**: 8 S.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2015): Düngung mit Phosphat, Kali, Magnesium. 4 S. <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/naehrstoffe.htm>, Zugriff 21.11.2015.
- MARSCHNER, P. (ed.) (2012): *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3. ed., Academic press, London: 651 pp.
- MATTERN, G. (1996): Auswirkungen der vergleichenden Kompensationskalkung auf Gefäßpflanzen, Moose und Pilze in rheinland-pfälzischen Forstökosystemen. Dissertation, Fachbereich Biologie, Universität Mainz: 218 S.
- MEINING, S., VON WILPERT, K., SCHÄFFER, J., HARTMANN, P., SCHUMACHER, J., DELB, H., AUGUSTIN, N. (2012): Waldzustandsbericht 2012. Hrsg. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg: 64 S.
- MENDEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. G. Fischer Verl. Jena: 466 S.

- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K., NIEDERBERGER, J., MARCO, B. (2007): Kleine Kinzig: forest liming to enhance the water quality in the catchment of a drinking water reservoir. In: PUHLMANN, H. SCHWARZE, R. (edits.): Forest hydrology – results of research in Germany and Russia Part I, German national committee of the Internat. Hydolog. Programme UNESCO and Water Ressource Program of WMO. p 91-113.
- REHFUESS, K.-E. (1995): Gefährdung der Wälder in Mitteleuropa durch Luftschadstoffe und Möglichkeiten der Revitalisierung durch Düngung. Ber. der Reinh.-Tüxen-Ges. **7**: 141-156.
- REIF, A., SCHULZE, E.-D, EWALD, J., ROTHE, A. (2014): Waldkalkung – Bodenschutz contra Naturschutz? - Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, urn:nbn:de:0041-afsv-01423 http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-14-2.pdf
- SCHÄFFER, J. (2002) : Meliorationswirkung und ökosystemare Risiken von Holzascheausbringung auf Waldböden Südwestdeutschlands. In: Holzasche-Ausbringung im Wald, ein Kreislaufkonzept. FVA-Kolloquium, in Freiburg vom 5. bis 6. März 2002, Berichte, Freiburger Forstliche Forschung Heft, **43**: 39-52.
- SCHÄFFER, J., GEISSEN, V., VON WILPERT, K. (2002): Waldkalkung: Düngung oder Bodenschutz? Freiburger Forstliche Forschung, Bd. **18**: 320-330.
- SCHÄFFER, J., GEISSEN, V., HOCH, R., VON WILPERT, K. (2001): Waldkalkung belebt Böden wieder. Allg. Forst Zeitschr. **56 (21)**: 1106-1109.
- SCHLENKER, G. (1964): Entwicklung des in Südwestdeutschland angewandten Verfahrens der Forstlichen Standortskunde. – p. 5-25 In: ARBEITSGEMEINSCHAFT „OBERSCHWÄBISCHE FICHTENREVIERE“ (Hrsg): Standort, Wald und Waldwirtschaft in Oberschwaben. Verein f. Forstl. Standortskde u. Forstpflanzenz., Stuttgart-Weilimdorf.
- SCHMIDT, W. (1992): Der Einfluß von Kalkungsmaßnahmen auf die Waldbodenvegetation. Zeitschrift f. Ökologie u. Naturschutz **1**: 79-88.
- SCHMIDT, W. (2002): Einfluss der Bodenschutzkalkungen auf die Waldvegetation. Forstarchiv **73**: 43-54.
- SCHULZE, E.-D. (1989): Air Pollution and Forest Decline in a Spruce (*Picea abies*) Forest. Science **244**: 776-783.
- SIEFERMANN-HARMS, D., HOCH, R., LUKES, M., TREFZ-MALCHER, G., VON WILPERT, K. (1997): Änderungen der Nährelement- und Chlorophyllgehalte von Nadeln einer durch Mg-Mangel, Stauwasser und Ozon belasteten Fichte nach Mg-Düngung. Ergebnisse der Schöllkopfstudie 1993–1996. FZKA-PEF **153**: 135-146.
- SUCKER, C., PUHLMANN, H., ZIRLEWAGEN, D., VON WILPERT, K., FEGER, K.H. (2009): Bodenschutzkalkungen in Wäldern zur Verbesserung der Wasserqualität – Vergleichende Untersuchungen auf Einzugsgebietsebene. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung **53 (4)**: 250-262.
- TALKNER, U., MEIWES, K. J., POTOČIĆ, N., SELETKOVIĆ, I., COOLS, N., DE VOS, B., RAUTIO, P. (2015): Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.) is decreasing in Europe. Annals of Forest Science **72**: 919-928. DOI 10.1007/s13595-015-0459-8.
- VON WILPERT, K. (2003): Drift des Stoffhaushalts im Fichten – Düngeversuch Pfalzgrafenweiler. AFJZ, **174 (2/3)**: 21-30.
- VON WILPERT, K., SCHÄFFER, J. (2000): Bodenschutzkalkung im Wald. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Merkblatt **50**: 21 S.
- VON WILPERT, K., LUKES, M. (2003): Ecochemical effects of Phonolite rock powder, Dolomite and Potassium sulfate in a spruce stand on an acidified glacial loam. Nutrient Cycling in Agroecosystems. **65**: 115-127.
- VON WILPERT, K., BÖSCH, B., BASTIAN, P., ZIRLEWAGEN, D., HEPERLE, F., HOLZMANN, S., PUHLMANN, H., SCHÄFFER, J., KÄNDLER G., SAUTER U.H. (2011): Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft **87**: 155 S.
- VON WILPERT, K., NIEDERBERGER, J., PUHLMANN, H. (2007): Fallstudien zur Bewertung und Entwicklung forstbetrieblicher Optionen zur Sicherung der Wassergüte in bewaldeten Einzugsgebieten – Wirkung von Bodenschutzkalkungen auf die Wasserqualität. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte H. **75**: 65 S.
- VON WILPERT, K., HARTMANN, P., SCHÄFFER, J. (2013): Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Merkblatt **54**: 41 S.
- VON WILPERT, K., HILDEBRAND, E.E. (1994): Stoffeintrag und Waldernährung in Fichtenbeständen Baden-Württembergs. Forst u. Holz **49**: 629-632
- VON WILPERT, K., HILDEBRAND, E.E., HUTH, T. (1993): Ergebnisse des Praxis-Großdüngungsversuchs. Mitt. d. FVA Bad.-Württ. **171**: 131 S.
- WEIHS, U., LANGHORST, U. (1991): Auswirkungen unterschiedlicher Düngungsmaßnahmen auf die Waldbodenvegetation typischer Harzhochlagenstandorte. Forst und Holz **46**: 172-177.
- submitted: 11.10.2014
reviewed: 03.04.2015
accepted: 20.07.2016

Autorenanschrift:

M. Sc. Alina Janssen
Professur für Standorts- und Vegetationskunde
Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Universität Freiburg
Tennenbacherstr. 4
79085 Freiburg im Breisgau
E-Mail: alina-janssen@posteo.de

Dr. Jürgen Schäffer
Bodenkunde und Standortsökologie
Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg (HFR)
Schadenweilerhof
72108 Rottenburg a.N.
E-Mail: schaeffer@hs-rottenburg.de

Dr. Klaus-Hermann von Wilpert
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Abteilung Boden und Umwelt
Wonnhaldestraße 4
79100 Freiburg
E-Mail: klaus.wilpert@forst.bwl.de

Prof. Dr. Dr. h.c. Albert Reif
Professur für Standorts- und Vegetationskunde
Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Universität Freiburg

Tennenbacherstr. 4
79085 Freiburg
E-Mail: albert.reif@waldbau.uni-freiburg.de