

Langfristige Veränderungen der Bodenvegetation und von Bodeneigenschaften durch Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde an der Fakultät für
Forst-und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im
Breisgau

vorgelegt von

Carl Erhard Höcke

2006, Freiburg im Breisgau

Dekan: Prof. Dr. Ernst Hildebrand
Referent: Prof. Dr. Albert Reif
Korreferent: Prof. Dr. Ernst Hildebrand
Datum der Disputation: 27.06.2006

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken:

Die DFG übernahm im Rahmen des Graduiertenkollegs 692 „Gegenwartsbezogene Landschaftsgenese“ die wesentliche Finanzierung dieser Arbeit. Einen Teil der Anschlussfinanzierung übernahm freundlicherweise die Müller-Fahnenberg-Stiftung der Universität Freiburg.

Herr Professor Dr. Rüdiger Mäkel leitete mit hohem persönlichem Engagement das Graduiertenkolleg „Gegenwartsbezogene Landschaftsgenese“. Diesem Rahmen verdanke ich viele wertvolle Anregungen und Diskussionen für meine Arbeit.

Albert Reif hatte die Idee, dieses Thema zu bearbeiten und hat mich bei meiner Arbeit vielfältig unterstützt. Ich bedanke mich besonders für sein Vertrauen.

Herr Hoch (FVA Freiburg) überließ mir seine Materialzusammenstellung zu Versuchsdüngungen im Nordschwarzwald, die für die Flächensuche und den geschichtlichen Überblick unabdingbar waren. Eine wertvolle Hilfe bei der Beschaffung besonderer Literaturwünsche aus dem Archiv waren die beiden Mitarbeiterinnen der forstwissenschaftlichen Bibliothek Frau Gienke und Frau Lang.

Ich bedanke mich herzlich bei allen beteiligten Forstämtern für die Hilfe bei der Suche nach geeigneten Flächen durch die Möglichkeit der Akteneinsicht. Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern der ehemaligen Forstämter Bad Liebenzell und Villingen Staat, wo schließlich die Untersuchungen stattfanden. Herr Hockenjos (Villingen) hat sich sehr viel Zeit für mich genommen und Karl Günther, Dominik Dast und Frank Lindenberger vom Forstamt Bad Liebenzell haben mir in vielerlei Hinsicht unbürokratisch geholfen. Ohne ihre Hilfe wäre diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Die Forstdirektion Freiburg (Herr Moser und Herr Ressel) stellte mir FoGIS-Daten zur Verfügung, die für eine effiziente Flächensuche unerlässlich waren. Dort konnte ich mit freundlicher Unterstützung Forsteinrichtungswerke einsehen (Frau Ringwald) und erhielt eine Fahrgenehmigung für Waldwege (Herr Bransch). Herrn Ressel danke ich besonders für die Erklärung der Verschlüsselung der FoGIS-Daten.

Herr Wiebel (FVA Freiburg) half mir freundlich und sehr kompetent bei der Ansprache einiger Humusformen.

Die Abteilung Waldökologie (FVA Freiburg) überließ mir für die Flächensuche die forstlichen Standortskarten in digitaler Form, die mir eine effiziente Suche nach standörtlich vergleichbaren Nullflächen ermöglichte.

Frau Trefz-Malcher und Herrn von Wilpert (FVA Freiburg) sowie Frau Nitschke vom Waldbau-Institut verdanke ich eine kompetente und freundliche Beratung und Unterstützung bei der Analyse der Bodenproben.

Das Einmessen von Flächen und die Bodenprobennahme gingen dank der Hilfe von Dagmar Weiss, Michael Nill und Sonia Sanchez kurzweiliger und schneller von der Hand.

Positiv auf die Arbeit ausgewirkt haben sich die vielen kleinen Diskussionen über die optimale Anwendung statistischer Verfahren oder zu bodenkundliche Fragen mit Stefanie Gärtner, Jochen Engelhart, Martin Kohler, Partap Khanna und ein Gespräch mit Michael Rudner (Lehrstuhl für Geobotanik).

Für Hilfe beim Übersetzen der Zusammenfassung bedanke ich mich bei David Butler-Manning.

Ganz besonders herzlich bedanke ich mich bei Stefanie Gärtner für die mit vielen wertvollen Hinweisen verbundene Durchsicht meiner Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Kenntnisstand zu langfristigen Wirkungen von Walddüngungen	2
1.3	Zielsetzung der Arbeit	3
2	Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar	5
2.1	Überblick über die zeitliche Entwicklung der Düngung im Wald	5
2.1.1	Die Anfänge – Kulturdüngungen und Ödlandaufforstungen	6
2.1.2	Bestandesdüngungen seit den vierziger Jahren	7
2.1.3	Kompensationskalkungen gegen „neuartige Waldschäden“	8
2.1.4	Frühe Ideen zur Ursache und Vermeidung von Immissionsschäden	8
2.2	Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar	10
2.2.1	Das Untersuchungsgebiet	10
2.2.2	Quellenmaterial zu den Walddüngungen des Nordschwarzwaldes und des Baarschwarzwaldes	12
2.2.3	Versuchsdüngungen im Nordschwarzwald	12
2.2.4	Alte Walddüngungen im Nordschwarzwald in der Fachliteratur	17
2.2.5	Praxisdüngungen in den Forstbezirken Bad Liebenzell, Pfalzgrafenweiler und Villingen Staat	18
2.2.6	Kompensationskalkungen seit 1980	21
2.3	Vergleich der Zielsetzungen der Düngungen	24
3	Material und Methoden	25
3.1	Die Untersuchungsflächen	25
3.1.1	Auswahl der Untersuchungsflächen	25
3.1.2	Klima	25
3.1.3	Immissionen	26
3.1.4	Standorte und Böden der Untersuchungsflächen	27
3.1.5	Die Waldbestände	28
3.1.6	Walddüngungen	29
3.2	Datenaufnahme im Gelände	31
3.2.1	Anzahl und Auswahl der Aufnahmen	31
3.2.2	Aufnahme der Vegetation	31
3.2.3	Bodenprobenentnahme	32
3.2.4	Humusformen und organische Auflagen	33
3.2.5	Aufbereitung und Analyse der Bodenproben	33
3.2.6	Lichtschätzung mit hemisphärischen Photographien	34
3.3	Datenauswertung	34
3.3.1	Dateneingabe	34

3.3.2	Verwendete Computerprogramme	34
3.3.3	Statistische Analyse der Umweltfaktoren, besonders des Bodens . .	35
3.3.4	Statistische Analyse der Vegetation	39
4	Ergebnisse	46
4.1	Unterschiede im Oberboden zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen	46
4.1.1	pH-Werte	46
4.1.2	Kalziumgehalte	49
4.1.3	Magnesiumgehalte	50
4.1.4	Kaliumgehalte	51
4.1.5	Kohlenstoffgehalte	51
4.1.6	Stickstoffgehalte	52
4.1.7	Phosphorgehalte	53
4.1.8	C/N-Verhältnisse	53
4.1.9	C/P-Verhältnisse	54
4.1.10	N/P-Verhältnisse	54
4.1.11	Ergebnisüberblick Düngewirkungen im Oberboden	55
4.2	Die Veränderung der organischen Auflagen durch Düngung	56
4.2.1	Vergleich der Mächtigkeiten der Oh und Of-Lagen	56
4.2.2	Vergleich der Häufigkeit der Humusformen	56
4.3	Zusammenhänge zwischen organischen Auflagen und Mineralboden	59
4.3.1	Zusammenhänge zwischen den im Mineralboden gemessenen Variablen	59
4.3.2	Bodenchemische Charakterisierung der Humusformen	60
4.3.3	Zusammenhänge zwischen Umweltvariablen und Auflagemächtigkeit	62
4.3.4	Zusammenfassende Betrachtung	64
4.4	Auf Düngung mit unterschiedlicher Stetigkeit reagierende Kraut- und Moosarten	65
4.4.1	Durch Düngung geförderte Arten	65
4.4.2	Durch Düngung abnehmende Arten	68
4.4.3	Auf Düngung mit Stetigkeit indifferent reagierende Arten (I) . . .	70
4.4.4	Vergleich der Artengruppen mit R- und N-Zeigerwerten nach Ellenberg	70
4.5	Die Beziehung zwischen Vegetation und Umweltfaktoren	73
4.5.1	Ergebnisse der Redundanzanalyse (RDA)	73
4.5.2	Interpretation der Ordinationsachsen	74
4.5.3	Standortsansprüche der Arten in der Redundanzanalyse im Vergleich mit ihrer Zuordnung als Gruppe	75
4.5.4	Die Beziehung zwischen Deckungen dominanter und hochsteter Arten und Umweltvariablen	76
4.5.5	Düngungsbedingte Deckungsunterschiede ausgewählter Arten . . .	78
4.6	Ordination (RDA) der Aufnahmen	82
4.6.1	Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L1	82
4.6.2	Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L2	82
4.6.3	Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L3	83

4.6.4	Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L4	83
4.6.5	Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche V1	83
4.6.6	Gesamtbetrachtung aller Aufnahmen	85
4.7	Konsequenzen der Düngungen für die Artenzahl der Moos- und Krautschicht	86
4.7.1	Unterschiede in der Anzahl der Lebensformen durch Düngungen	86
4.7.2	Unterschiede in der Artenzahl der Krautschicht durch Düngung hinsichtlich Bindung an Waldstandorte	88
4.7.3	Unterschiede in der Artenzahl der Moos- und Krautschicht hin- sichtlich Düngereaktion	89
4.7.4	Unterschiede der Artenzahlen der Moos- und Krautschicht zwi- schen Aufnahmen mit unterschiedlicher Humusform	90
4.7.5	Rangkorrelationen (Spearman) zwischen Umweltvariablen und Ar- tenzahl	91
4.7.6	Erklärung der Artenzahl durch lineare multiple Regressionsmodelle	92
4.7.7	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Beeinflussung der Artenzahl durch Düngungen	94
5	Diskussion	97
5.1	Kritische Betrachtung der angewandten Methoden	97
5.1.1	Flächenauswahl	97
5.1.2	Analyse der Bodenproben	98
5.2	Diskussion der Ergebnisse	99
5.2.1	Die Veränderung des Oberbodenzustandes durch Düngung	99
5.2.2	Die Veränderung der organischen Auflagen durch Düngung	101
5.2.3	Langfristige Vegetationsveränderungen durch Walddüngungen	102
5.3	Beantwortung der Fragestellung	104
5.4	Vergleichbarkeit alter Walddüngungen mit aktuellen Kompensationskal- kulationen	105
5.5	Die Bedeutung von Wiederholungskalkulationen	106
5.6	Empfehlungen für die Praxis	107
	Zusammenfassung	108
	Summary	111
	Abbildungsverzeichnis	114
	Tabellenverzeichnis	116
	Abkürzungsverzeichnis	117
	Verzeichnis unveröffentlichter Quellen	118
	Literaturverzeichnis	119
	Anhang	130
	A Artenliste	130

B Vergleich der Standorte	134
C Validierung der Regressionsmodelle	135

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Graduiertenkollegs „Gegenwartsbezogene Landschaftsgenese“ und beleuchtet das Forschungsobjekt „Walddüngungen“ im Untersuchungsgebiet Nordschwarzwald und auf der Baar hinsichtlich langfristiger Folgen für die Bodenvegetation, die organischen Auflagen und den mineralischen Oberboden.

1.1 Problemstellung

Neben einem grundlagenorientiertem Forschungsinteresse an langfristigen Konsequenzen einer Düngung von Waldbeständen für den Stoffhaushalt im Boden und die Bodenvegetation, können aus solchen Untersuchungen auch die langfristigen Folgen heutiger Kompensationskalkungen für die durch Immissionen bedingte Bodenversauerung abgeschätzt werden (Becker et al., 1992; Schornick, 1990). Dabei sollten aber die zum Teil recht großen Unterschiede in den Dosierungen und der Zusammensetzung der Düngemittel beachtet werden.

Hintergrund dieser Überlegungen ist die seit etwa 30 Jahren beobachtete Veränderung der Standorte und der Vegetation in Wäldern Mitteleuropas. Die Ursachen sind in ihrem Zusammenwirken komplex und regional unterschiedlich ausgeprägt. Durch Einträge (NO_x , SO_x) aus Verkehr, Industrie und Landwirtschaft (NH_3) sind bei hoher Stickstoffzufuhr besonders in bodensauren Wäldern die pH-Werte im Oberboden langfristig gesunken (Heisner et al., 2003; Falkengren-Grerup, 1990; Persson et al., 1995), da bodensaure Standorte nur eine geringe Pufferkapazität besitzen. Veränderungen in der Artenzusammensetzung der Bodenvegetation vor allem in bodensauren Wäldern werden in vielen Untersuchungen auf diese Versauerungstendenz oder Stickstoffeinträge zurückgeführt (z. B. Økland et al., 2004; Falkengren-Grerup & Diekmann, 2003; Månsson & Falkengren-Grerup, 2003; van Dobben et al., 1999; Diekmann & Dupré, 1997; Økland, 1995; Zukrigl et al., 1993; Thimonier et al., 1992; Bürger, 1991; Rost-Siebert & Jahn, 1988).

Weitere Faktoren, die zur aktuellen Veränderung der Waldbodenvegetation beitragen, sind in der Aufgabe historischer Nutzungen, besonders der Streunutzung zu sehen (Dzwonko & Gawronski, 2002; Jandl et al., 2002; Glatzel, 1991; Pacher, 1980). Waldumbaumaßnahmen lassen weitere Konsequenzen für die Bodenvegetation (Gärtner, 2004) und den Bodenzustand (Fischer et al., 2002; Englisch, 2000) erwarten. Dieser Ursachenkomplex bewirkt auch eine Änderung des Humuszustandes vieler Standorte. Vielerorts ist eine Veränderung von „schlechten“ hin zu „günstigen“ Humusformen zu beobachten (z. B. Kraft et al., 2003; Fischer et al., 2002).

In zahlreichen Untersuchungen wird die kurz- bis mittelfristige Wirkung von Kompensationskalkungen auf die Bodenvegetation beschrieben. Die Artenzahl der Krautschicht nimmt zu (Schmidt, 2002; Weihs & Langhorst, 1991) und hinsichtlich der Nährstoffversorgung anspruchsvollere Kraut- und Moosarten werden gefördert (z. B. Schmidt, 2002; Dulière et al., 2000, 1999; Weihs & Langhorst, 1991; Schornick, 1990). Einige Kraut- und

1 Einleitung

vor allem Moosarten natürlicherweise bodensaurer Standorte, darunter auch einige felsbesiedelnde Arten, gehen nach einer Kalkung kurz- bis mittelfristig zurück (z. B. Kraft et al., 2003; Schmidt, 2002; Ahrens, 1995; Schornick, 1990).

Alle diese Einflussfaktoren wirken regional und lokal mehr oder weniger stark und können sich überlagern. Besonders Kraft et al. (2003) weisen auf eine mögliche Wechselwirkung von Kompensationskalkungen mit Stickstoffeinträgen hin, die sich in ihrer Wirkung auf Humusaufgaben und Waldbodenvegetation gegenseitig verstärken. In diesem Zusammenhang weisen Mrotzek & Schmidt (1998) auf eine Zunahme der Brennesselvorkommen *Urtica dioica* in niedersächsischen Wäldern durch Kompensationskalkungen hin.

Zu langfristigen Veränderungen der Bodenvegetation durch Walddüngungen liegen bisher einige Erkenntnisse vor, die im folgenden Abschnitt erläutert werden.

1.2 Kenntnisstand zu langfristigen Wirkungen von Walddüngungen auf Vegetation und Bodenzustand

Die folgenden Untersuchungen beschreiben Vegetationsveränderung als Folge lang zurückliegender Düngungen in nadelholzgeprägten bodensauren Wäldern.

Schornick (1990) konnte durch einen Vergleich 30 Jahre zuvor gedüngter Nadelholzbestände mit ungedüngten Vergleichsflächen Vegetationsveränderungen im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes feststellen. Gedüngt wurde damals mit einer Grunddüngung aus kohlensaurem Kalk, die meist mit Phosphat- oder Stickstoffdüngern kombiniert wurde. Vor allem stark gedüngte Flächen der ärmeren Standorte zeigten starke Veränderungen der Vegetation in Form eines Gesellschaftswandels von einem Luzulo-Abietetum (Oberd. 57) hin zu einem Galio-Abietetum (Wrab. 59). Auf reicheren Standorten (Galio-Abietetum Wrab. 59) hatte eine Düngung eine Zunahme von Arten mit höheren Nährstoffansprüchen zur Folge. Dies führte auch zu einer stärkeren mosaikartigen horizontalen Gliederung der Vegetation. *Vaccinium myrtillus* und einige Moosarten wurden durch Düngung beeinträchtigt, *Bazzania trilobata* fiel auf manchen Flächen aus.

Ähnliche Beobachtungen machten Jandl et al. (2002, 2000) 30 Jahre nach einer Düngung mit einer Kalk-, Phosphat-, Stickstoff-, Kalium- und Magnesiumkombination. Die gedüngte Fläche fiel durch eine mosaikartige Zunahme anspruchsvollerer Kraut- und Moosarten auf. Zwergsträucher wie z. B. *Vaccinium myrtillus* wurden dagegen beeinträchtigt. Der Humuszustand hatte sich hin zu „günstigeren“ Formen verändert, die Basensättigung und die pH-Werte des mineralischen Oberbodens wurden durch die Düngung langfristig erhöht.

Eine Veränderung des Auflagehumus von „ungünstigen“ Ausprägungen wie Rohhumus hin zu Moder oder Mull 35 Jahre nach einer kalkbetonten Düngung mit Phosphat und Stickstoff führten Immer et al. (1993) auf eine zurückliegende biologisch aktive Phase zurück. Die bodenchemischen Veränderungen, vor allem eine Erhöhung des pH-Wertes im mineralischen Oberboden und die Menge an austauschbarem Kalzium, ließen sich im Vergleich zur Nullfläche kaum nachweisen. Die Vegetation war mittelfristig durch Düngung krautreicher und mosaikartig über die Fläche verteilt, was die Autoren der ungleichmäßigen Verteilung des Düngers zuschrieben. Im Zeitverlauf hatte sich dort aber dieser Effekt auf die Vegetation abgeschwächt. Licht förderte hier die Düngewirkung auf die Vegetation.

Im Gegensatz zur der Untersuchung von Immer et al. (1993) stellten Hölscher et al. (1999) 38 Jahre nach einer mit 9 t/ha allerdings vergleichsweise stärker dosierten Kalkung neben Änderungen des Humuszustandes eine nachhaltige und deutliche Erhöhung der Kalziumpools am Austauscherkomplex und eine pH-Werterhöhung im Mineralboden fest.

Die Untersuchung von Becker et al. (1992) erlaubt durch eine mehrfaktorielle Versuchsanlage Aussagen über die Wirkung verschiedener Düngemittel mit Kalzium, Phosphat und Stickstoff nach 20 Jahren auf Vegetation und Humuszustand in einem Tannenwald in den Vogesen. Dabei wurde festgestellt, dass alleine der Kalkeffekt zu einer starken Vegetationsveränderung führte. Im Gegensatz zu den stark durch *Vaccinium myrtillus* geprägten Nullflächen, wurden die gekalkten Felder von *Festuca altissima* dominiert und weitere anspruchsvollere Arten – darunter einige Nitrophyten – nahmen zu. Einige Moosarten wie z. B. *Dicranum scoparium* wurden beeinträchtigt.

Der Vergleich dieser Ergebnisse zeigt, dass trotz unterschiedlicher Düngemittel und Dosierungen große Ähnlichkeiten in der langfristigen Düngewirkung auf die Vegetation und den Oberboden bestehen. Diese äußern sich in einer Zunahme anspruchsvollerer Kräuter und einem Rückgang besonders von Ericaceen und einigen Moosarten. Auch der Oberbodenzustand und der Auflagehumus verändern sich langfristig durch Düngungen.

Diese Veränderungen können im Wesentlichen auf Kalkung zurückgeführt werden (Becker et al., 1992), wobei auf anderen Standorten eine wichtige Rolle von Phosphat oder Stickstoff nicht auszuschließen ist. Der Grad der Düngewirkung auf Oberbodenzustand und Bodenvegetation ist dabei abhängig von der Dosierung (Hölscher et al., 1999; Immer et al., 1993; Schornick, 1990). Hier kann besonders auf die Beobachtungen von Schornick (1990, S. 154) hingewiesen werden, dass sich auf stark gedüngten Flächen nachhaltig ein Nährelementkreislauf mit höherem Nährstoffangebot und entsprechender Vegetation etabliert, während die Wirkung auf schwach gedüngten Flächen mit der Zeit nachlässt.

Die Auswirkungen und das Zusammenspiel mit einigen weiteren Einflussfaktoren bleibt dabei offen. So ist die Frage, wie sich Licht als weiterer Einflussfaktor bemerkbar macht, nicht hinreichend geklärt und nur selten durch Messungen abgesichert (z. B. Immer et al., 1993). Die Verbindung zwischen dem chemischen Oberbodenzustand gedüngter Flächen und der Ausprägung der Vegetation ist kaum durch Messvergleiche hergeleitet. Dies ist jedoch wichtig, um besser abschätzen zu können, welche Faktoren mit den langfristigen Vegetationsveränderungen durch Walddüngungen verknüpft sind.

In dieser Untersuchung soll die langfristige Wirkung von Walddüngungen auf die Waldbodenvegetation im Zusammenspiel mit Licht und die Wechselwirkung mit möglicherweise durch die Düngung veränderten Nährstoffverhältnissen im Oberboden geklärt werden.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, die langfristigen Auswirkungen von Walddüngungen auf die Waldbodenvegetation zu ermitteln. Dies geschieht durch den Vergleich von gedüngten und ungedüngten Flächen. Weitere vegetationsbeeinflussende Faktoren wie der Standort, Baumartenzusammensetzung, Stickstoffeinträge oder historische Nutzungen sind dabei auf den gewählten Untersuchungsflächen möglichst konstant zu halten.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Artenzusammensetzung der Krautschicht ist Licht. Durch Lichtmessungen soll das Zusammenspiel von Lichtgenuss und Düngung

1 Einleitung

ermittelt werden.

In der Praxis wurden verschiedene Dünger verwendet und je nach Ausbringungsmethode mehr oder weniger gleichmäßig auf der Fläche verteilt. Durch Bodenanalysen und eine Kartierung des Humuszustandes ist es möglich, die Auswirkungen auf den Boden bzw. auf den Stoffhaushalt des Standortes feiner aufzulösen und mit der Vegetation in Beziehung zu setzen.

Daraus werden folgende Arbeitshypothesen abgeleitet:

1. Eine Walddüngung lässt sich noch nach mehreren Jahrzehnten in einer veränderten Artenzusammensetzung der Moos- und Krautschicht nachweisen. Auf Düngung und Kalkung empfindlich reagierende Arten (z. B. *Bazzania trilobata*) haben nach Jahrzehnten die gedüngten Flächen wieder besiedelt, wobei Unterschiede in der Stetigkeit und eventuell in der Deckung im Vergleich mit ungedüngten Flächen zu erwarten sind. Auf gedüngten Flächen sind zu dem Artinventar der ungedüngten Flächen weitere anspruchsvollere Arten hinzugekommen.
2. Humuszustand und ein Teil der chemischen Parameter des Oberbodens unterscheiden sich im Vergleich gedüngter und ungedüngter Flächen. Der Grad dieser Unterschiede kann zum Teil auf unterschiedliche Mengen und Zusammensetzungen der Düngemittel zurückgeführt werden. Die Düngewirkung wird dabei durch weitere Einflussfaktoren wie die Baumartenzusammensetzung und Lichtgenuss, aber auch durch kleinräumige Standortsunterschiede überlagert.
3. Vegetationsunterschiede zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen können teilweise mit den Nährstoffverhältnissen im Oberboden, aber auch mit weiteren Einflussfaktoren, besonders mit unterschiedlicher Baumartenzusammensetzung, in Verbindung gebracht werden.

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

An dieser Stelle sollen die Hintergründe, also die Gründe, Vorstellungen und Voraussetzungen, die zur Anlage von Walddüngungen führten und deren praktische Ausführung, verdeutlicht werden. Im Kontext zur Fragestellung dieser Arbeit kann dieses Kapitel als Anknüpfungspunkt für eine weiterführende Diskussion zu den Zielen aktueller Kompensationskalkungen und selbstverständlich auch als ein Beispiel für die Dimensionen von Walddüngungen und Waldkalkungen im historischen Zeitverlauf verstanden werden.

Zunächst wird die allgemeine Geschichte der Walddüngungen überwiegend unter Verwendung von Sekundärliteratur beschrieben. In diesem Rahmen wird anhand von Material verschiedener Quellen anschließend die regionale Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar dargestellt.

Der Mensch macht die Geschichte, ohne es zu wissen

Louis Althusser

2.1 Überblick über die zeitliche Entwicklung der Düngung im Wald

Seit den 1980er Jahren bis heute wird in vielen Ländern Europas (z. B. von Wilpert & Schäffer, 2000) und Nordamerikas (z. B. Wilmot et al., 1996; Fyles et al., 1994) kohlen-saurer Kalk mit Magnesiumgehalten in großem Maßstab auf Waldböden ausgebracht. Damit sollen bodenversauernd wirkende Einträge aus Verkehr, Industrie und Landwirtschaft in Wälder kompensiert werden und dem komplexen Phänomen der „neuartigen Waldschäden“ und der Versauerung von Gewässern und des Grundwassers entgegenge-wirkt werden. Im Laufe der 1970er Jahre wurde festgestellt, dass diese Versauerung auch fern von Emissionsquellen stattfindet (Ulrich et al., 1979; Abrahamsen et al., 1977).

Die Verwendung von Kalk und anderen Düngemitteln im Wald hat – wenn auch mit anderen Zielsetzungen – eine lange Tradition. In aktueller Fachliteratur zu diesem Thema werden erste Walddüngungen bereits für das späte 19. Jahrhundert angegeben (Vejre et al., 2001; Tamm, 1995; Evers, 1991).

Auch im Schwarzwald haben Walddüngungen eine lange Tradition. Seit den 1980er Jahren werden Waldbestände gegen Bodenversauerung gekalkt. Viele dieser Kalkungen wurden besonders zu Anfang wissenschaftlich begleitet (z. B. Buberl et al., 1994; von Wilpert et al., 1993), um die Wirkung auf den Stoffhaushalt des Ökosystems Wald zu überprüfen und zu überwachen. Dabei konnten auch Erfahrungen aus langjährigen Dünge-versuchsreihen genutzt werden (von Wilpert, 2003; Hüttl & Zoetl, 1993; Evers, 1991; Kenk et al., 1984). Diese wurden mit der Zielsetzung, nämlich Melioration und Verbesserung des Bestandeswachstums, in den 1950er Jahren vor allem im Nord- und Ostschwarzwald mit einem Schwerpunkt in den Buntsandsteingebieten angelegt (z. B. Hausser, 1961, 1958).

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

In der geschichtlichen Entwicklung der Walddüngung lassen sich Epochen unterscheiden, die von verschiedenen Autoren mit spezifischen Schwerpunkten und Zielsetzungen verknüpft werden (Vejre et al., 2001; Evers, 1991; Gussone, 1983). Dies gibt in dieser Arbeit als überregionale Geschichte der Düngung im Wald zunächst den Rahmen für die Geschichte der Walddüngungen im Nord- und Baarschwarzwald.

2.1.1 Die Anfänge – Kulturdüngungen und Ödlandaufforstungen

Als wissenschaftliche Grundlage für die Düngung im Wald können die besonders von Liebig in den 1840er Jahren erarbeiteten Grundlagen der Düngung mit dem Gesetz des ertragslimitierenden Manglelementes gelten (Blume, 2002; Tamm, 1995; Evers, 1991).

Einen sehr frühen Hinweis von Walddüngungen gibt Schwappach (1916, S. 1) mit der Erwähnung von Kulturdüngungen, die bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts von einem „Oberförster Biermanns“ und einem „Forstmeisters Winneberger“ angelegt wurden. Eine weitere sehr frühe Literaturangabe zu Düngung im Wald mit bereits sehr gezielten Vorstellungen findet sich bei dem Österreicher Koderle (1865). Er bezog sich auf Liebig's Gesetz des ertragslimitierenden Manglelementes (Koderle, 1865, S. 15). Koderle (1865) führte zahlreiche Aschenanalysen von Pflanzen durch und beschrieb ein Verfahren zur Herstellung von Pflanzlochdünger. Die Düngung sollte die ihm zu gering erscheinende natürliche Nachlieferung von Mineralien aus der Verwitterung als einziger Quelle ergänzen (Koderle, 1865, S. 49): „Obzwar einzelne der fehlenden Bestandtheile des Bodens im Laufe der Zeit in der stets schaffenden Natur durch die mächtigen Agenten: Kohlensäure, Sauerstoff und Wasser aus den noch unaufgeschlossenen festen Mineralien ersetzt werden, so findet doch dieser Ersatz in den meisten Fällen viel zu langsam und in Perioden statt, welche mit jenen der natürlichen Pflanzenzunahme und Stoffconsumtion nicht im Einklange stehen.“

Aktuelle Veröffentlichungen zur geschichtlichen Entwicklung der Walddüngung (Vejre et al., 2001; Evers, 1991; Gussone, 1983) nennen spätere Zeitpunkte für den Beginn von Walddüngungen, was darauf hinweist, dass diese zunächst auf Initiative einzelner Forstleute zurückgingen. Laut Evers (1991) begannen in Deutschland erste systematisch angelegte Düngeversuche 1907 in Nordwestdeutschland, nachdem die Deutsche Agrargesellschaft dies 1905 befürwortet hatte.

Bereits um das Jahr 1870 begannen gezielte Düngungen zur Förderung von Kulturen im Zuge von Heideaufforstungen in Ostjütland, Dänemark (Vejre et al., 2001). Dort wurden seit Beginn des 19. Jahrhunderts großflächig Heidegebiete auf zuvor meliorierten Flächen aufgeforstet. Diese Periode reicht ungefähr bis 1950.

Evers (1991) nennt Heideaufforstungen mit Fichten in Belgien um 1880 als Beginn eines Düngeinsatzes im Wald; für 1888 sieht er eine Pflanzlochdüngung im elsässischen Kaysersberg dokumentiert.

In der Lüneburger Heide führte der Gutsbesitzer Toepffer in Eigeninitiative seit 1896 Meliorationen durch. Mit bis zu einem Meter tiefpflügenden, damals modernen englischen Dampfpflügen wurde der Ortstein aufgebrochen, anschließend wurde mit Kiefer aufgeforstet und mit Thomasmehl, Kalk und teilweise auch Salpeter gedüngt (Otto, 1996).

Diese ersten Walddüngungen beschränkten sich also weitestgehend auf Kulturdüngungen und Ödlandaufforstungen mit dem Ziel, die Etablierung der Kulturen u. a. durch

2.1 Überblick über die zeitliche Entwicklung der Düngung im Wald

Tabelle 2.1: Die Einführung der modernen Düngemittel (Angaben nach Finck, 1992).

Jahr	Düngemittel und Beschreibung
1830	Chilesalpeter nach England
1840	Guano aus Peru nach England
1843	Superphosphat (England) ab 1855 auch Deutschland
1860	Kalidünger aus Abraumsalzen (Deutschland)
1879	Thomasphosphat aus der Eisenindustrie (England)
1890	Ammoniumsulfat aus Kokereien (Deutschland)
1905	Kalkstickstoff aus Luftstickstoff (Deutschland)
1907	Salpeter aus Luftstickstoff (Norwegen)
1913	Ammoniak aus Luftstickstoff nach dem Haber-Bosch-Verfahren (Deutschland)
1916	Rhenaniaphosphat durch alkalischen Phosphataufschluss (Deutschland)
1921	Harnstoff aus Ammoniak (Deutschland)
1927	Nitrophoska als Volldünger (NPK)
1929	Kalkammonsalpeter als wichtiger N-Dünger

Düngung zu sichern. Zu dieser Zeit wurden bereits die bodenkundlichen Grundlagen über Nährstoffkreisläufe im Wald erarbeitet (z. B. Schütze, 1878; Schroeder, 1877b,a; Ebermayer, 1876; Schroeder, 1875; Weber, 1875). Gussone (1983, S. 63) weist hier deutlich auf den Zusammenhang zwischen „der Entwicklung einer eigenständigen forstlichen Bodenkunde“ und einer „Anwendung der Düngemittel im Walde“ in Deutschland seit kurz vor dem Ersten Weltkrieg und danach in den dreißiger Jahren und „nach dem letzten Krieg“ hin. So wird um die Jahrhundertwende bereits an langfristige Erfolge von Kulturdüngungen gedacht. Der Eberswalder Bodenkundler Albert (1905) kritisierte deutlich die Übertragung landwirtschaftlicher Methoden auf den Forstbetrieb mit ihren „kurzfristigen Erfolgen“. Er forderte vergleichende Versuche für eine langfristige Wirkung von bodenkundlich angepassten Düngungen, die er bei einigen Versuchen später als bestätigt ansah (Albert, 1936).

In der Periode dieser frühen Kulturdüngungen und Ödlandaufforstungen wurden viele häufig eingesetzte Düngemittel (Tab. 2.1), besonders Kalkammonsalpeter (vgl. Gussone, 1964) oder Nitrophoska, erst im Laufe des 20. Jahrhunderts entwickelt, die dann mit weiteren technischen Neuerungen die nächste Epoche der Bestandesdüngungen seit etwa 1940 charakterisierten.

2.1.2 Bestandesdüngungen seit den vierziger Jahren

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden in Deutschland zunehmend auch Waldbestände gedüngt. Dies wurde besonders im Laufe der 1950er Jahre möglich, da mit der Entwicklung geländegängiger Fahrzeuge mit Motorgebläse meist Kalke in verschiedenen Formen, oft zusammen mit Phosphat und stickstoffhaltigen Düngern, kostengünstig in Waldbeständen verblasen werden konnten (Gussone, 1983). Die damalige Zielsetzung war, die durch jahrhundertelange Streunutzung und andere bäuerliche Waldnutzungen verarmten Böden gezielt auf ein höheres Ertragsniveau zu bringen (Evers, 1991; Gussone, 1983). Evers (1991) spricht von einer Korrektur des Nährstoffdefizits, das durch diese Nutzungen ver-

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

ursacht wurde. Aber auch der Zuwachs bereits ertragreicher Bestände sollte zusätzlich gesteigert werden (Gussone, 1983). Daneben wurde besonders in Buchenaltbeständen als verzüngerungsfördernde Maßnahme meist kalkbetont gedüngt (z. B. Piest, 1983; Huss & Stephani, 1978; Haun, 1958; Stier, 1958; von Wedel, 1969).

Wichtige bodenkundliche Grundlagen für derartige Meliorationen wurden in Deutschland seit Mitte der 1920er Jahre besonders durch die Forschungen Walter Wittichs erarbeitet (Gussone, 1983). Der gesamte Stoffumsatz des Bodens sollte durch Düngung langfristig belebt werden, so dass in Humusaufgaben gebundene Nährstoffe durch Überführung in günstigeren Humuszustand dem Bestand zugute kämen (Wittich, 1952, 1942). Dieser Zustand sollte durch höhere Laubbaumanteile mit besser zersetzbarer Streu langfristig stabilisiert werden (Wittich, 1943, 1939, 1934).

In den 1960er Jahren gingen die Bestandesdüngungen in der Bundesrepublik wieder stark zurück, was Gussone (1983) ausschließlich fallenden Holzerlösen zuschreibt, die Düngungen nicht mehr rentabel erscheinen ließen. Auch die sinkenden Dosierungen der Düngergaben führt er teilweise darauf zurück. In Dänemark wurde dagegen zwischen 1950 und 1980 vor allem NPK-Dünger und kaum Kalk eingesetzt (Vejre et al., 2001). Ziel war hier die Produktionssteigerung von Kulturen und jungen Waldbeständen und weniger eine langfristige Melioration.

2.1.3 Kompensationskalkungen gegen „neuartige Waldschäden“

In den 1980er Jahren wurde das Thema „Waldsterben“ besonders in Deutschland stark von den Medien aufgegriffen (Abb. 2.1). Eine immissionsbedingte schleichende Bodenversauerung wurde als eine wichtige Ursache ausgemacht. In Forstkreisen besann man sich wieder auf die Kalkung als Mittel zur Sanierung der Böden und Minderung der Waldschäden (z. B. Gussone, 1983; Evers, 1991; Vejre et al., 2001). Die Verbesserung des Ernährungszustandes der Bäume durch Düngemiteleinsetz ist nach Evers (1991, S. 78) eine therapeutische oder Schäden lindernde Maßnahme („a therapeutic or palliative measure“).

2.1.4 Frühe Ideen zur Ursache und Vermeidung von Immissionschäden

Die Idee, mittels Düngung und Kalkung Immissionschäden von Wäldern zu reduzieren, ist verhältnismäßig alt, wie der Blick in die Literatur des frühen 20. Jahrhunderts zeigt. Auch über mögliche Ursachen hat man sich schon früh Gedanken gemacht. Dies wird in neuerer Literatur kaum erwähnt und soll aus diesem Grund hier etwas ausführlicher beschrieben werden.

Die direkte Schädigung von Waldbäumen durch saure Industrieabgase ist ein Phänomen, das besonders in Sachsen mit seiner hohen industriellen Entwicklung früh untersucht wurde (z. B. Wislicenus, 1985; Schier, 1893; Schroeder, 1873).

Daneben wurden bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts von dem Aachener Botaniker Arwed Wieler „unsichtbare Rauchschiäden“ vor allem von Nadelbäumen beschrieben (Wieler, 1897, 1903). In ihren Symptomen gleichen sie aktuellen „neuartigen Waldschäden“. Wieler führte auf Veranlassung des preußischen Ministeriums bereits 1905 im Clausthaler Rauchschiadensgebiet (Harz) Saatversuche mit Laub- und Nadelbäumen auf jeweils einer gekalkten und einer ungekalkten Parzelle durch. Die Pflanzen entwickelten

2.1 Überblick über die zeitliche Entwicklung der Düngung im Wald



Abbildung 2.1: Die Titelseite des Nachrichtenmagazins „Der Spiegel“ (Der Spiegel, 1981, 47) als Beispiel für die Thematisierung des „Waldsterbens“ in den Medien. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des Spiegels.

sich auf der gekalkten Parzelle deutlich besser, die ungekalkte Parzelle war dagegen als „Rauchblöße“ fast vegetationsfrei (Wieler, 1922, S. 536).

Durch Vergleich von Untersuchungen, die Messungen von Abgasen in der Luft und Kalkauswaschung durch Schwefelsäure im Boden thematisierten, sah Wieler (1922, S. 539) die „Gefahr einer Entkalkung durch Rauchsäuren“ des Bodens gegeben. Seine Vermutung einer Schädigung der Bäume durch Bodenversauerung ist nach aktuellem Forschungsstand richtig (S. 536 Wieler, 1922): „Man wird also mit der Möglichkeit rechnen müssen, daß besonders bei den Rauchsäden, die ohne sichtbare Symptome auftreten, und wo das Kränkeln lange anhält und die Bäume langsam absterben, der Boden mit im Spiele, wenn nicht gar ausschlaggebend ist“. Die Größenordnung der Versauerung schätzte er als wesentlich höher ein als den potentiellen Nährstoffentzug durch jährliche Streunutzung. Weiterhin wies Wieler (1922) in diesem Zusammenhang auf die besondere Gefährdung natürlicherweise bodensaurer Standorte hin, was dem heutigen Forschungsstand entspricht und sich in aktuellen Kalkungsempfehlungen niederschlägt, die bodensaure Standorte als besonders kalkungsbedürftig einstufen (z. B. von Wilpert & Schäffer, 2000). Zum Ausgleich der Säure im Boden empfahl Wieler (1922) Kalk mit einer Menge von $70 \text{ g CaO/ m}^2/\text{a}$, was etwa $1,25 \text{ t/ha/a CaCO}_3$ entspricht. Leiningen-Westerburg (1920, S. 82) schloss sich dem auf frühere Arbeiten Wielers verweisend an und forderte zur Vermeidung „chronischer Schäden“ durch die immissionsbedingte Versauerung des Bodens ebenfalls Kompensationskalkungen: „Wo Kalk im Boden mangelt, sollte er in irgend einer Weise zugeführt werden“.

Dies ist bemerkenswert angesichts der Tatsache, dass das Ausmaß der schleichenden

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Bodenversauerung auch in industriefernen Wäldern erst gegen Ende der 1970er Jahre zum Konsens der Forschung wurde (Khanna, 2005; Ulrich et al., 1979).

Modern muten auch die Vorschläge von Harrer (1918) zur Vermeidung und Minderung von Immissionsschäden an: Er forderte falls nachgewiesen werden kann, dass 2 % Kalkzusatz zur Kohle bei der Montanindustrie schweflige Säure unschädlich machen, eine gesetzliche Einführung dieser Maßnahme, um so „großen Schaden von den Wäldern fernzuhalten“.

Diese frühen Ideen zeigen, dass die Zusammenhänge, die heutige Kalkungen zur Minderung von bodenversauernden Einträgen notwendig erscheinen lassen, in ihren Grundzügen bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts erkannt und mit gleichen Ansätzen zur Lösung bedacht wurden.

2.2 Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

2.2.1 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst Teile des Nordschwarzwaldes und des Baarschwarzwaldes, in denen alte Versuchs- (von Wilpert, 2001) und Praxisdüngeflächen liegen. Diese Düngungen wurden fast ausschließlich in durch Buntsandstein geprägten Gebieten durchgeführt (Abb. 2.2).

2.2.1.1 Naturräumliche Gliederung

Die Schwarzwald-Randplatten, aus Buntsandstein bestehend, werden naturräumlich vom Grindenschwarzwald und dem Nördlichen Talschwarzwald abgetrennt (Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, 1967a,b, 1959). Die Randplatten des Mittleren Schwarzwaldes sind als ein schmales Band von rund 10 km Breite ausgebildet.

Die triassischen Buntsandsteine (Abb. 2.2) liegen über dem Grundgebirge des Schwarzwaldes als von Westen nach Osten gekipptes Deckgebirge (Geyer & Gwinner, 1985). Am Ostrand des Schwarzwaldes geht der Buntsandstein in den Muschelkalk des Oberen Gäu und der Baarhochmulde über.

Die bis zu 350 m mächtigen Buntsandsteinschichten des Nordschwarzwaldes bilden besonders im Nordosten als typische Landschaftsform großflächige Hochebenen. In das verhältnismäßig weiche Gestein konnten die Flüsse Murg, Enz, Alb, Nagold und ihre Zuläufe tiefe Täler schneiden, die das Plateau zergliedern. Im danubisch geprägten Baarschwarzwald mit vergleichsweise niedriger Reliefenergie sind dies die Quellflüsse der Donau, Brigach und Breg mit ihren Zuflüssen. An den Talhängen sind der grobkörnigere und basenärmere Mittlere Buntsandstein und der Untere Buntsandstein oft bis an das Grundgebirge angeschnitten (Geyer & Gwinner, 1985).

2.2.1.2 Klima

Das Klima im Untersuchungsgebiet wird im Wesentlichen durch die Meereshöhe und die Lage im Lee des Schwarzwaldes bestimmt. So sind die östlichen Randplatten des Schwarzwaldes kontinental getönt. Die Jahresmitteltemperaturen liegen hier bei Höhen bis 700 m ü. N. N. um 8 °C, die Jahresniederschläge um 900 mm (Fiedler, 1995). Die Menge der Niederschläge nimmt sukzessive nach Westen hin zu.

2.2 Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

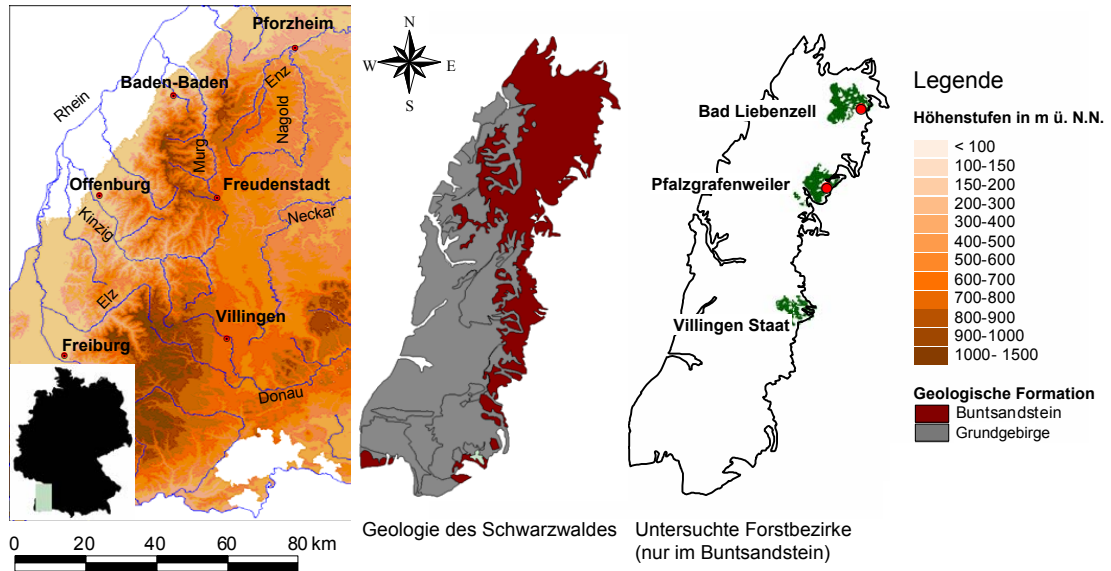


Abbildung 2.2: Kartenausschnitt des Untersuchungsgebietes mit der Geologie des Schwarzwaldes. Kartengrundlagen (s. S. 118): DGM: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de) Az.: 2851.9-1/11; Gewässernetz: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2006). Geologie nach Geyer & Gwinner (1985) und Waldeinteilung nach MLR Baden-Württemberg (2002a).

Weiter südlich im Baarschwarzwald ist das Klima durch den Loeffekt des Hochschwarzwaldes noch kontinentaler. In der sich östlich anschließenden Baarhochmulde sammelt sich Kaltluft, dadurch nimmt auch im Baarschwarzwald die Spätfrosthäufigkeit zu. Bei Meereshöhen zwischen 800–900 m liegt hier die Jahresmitteltemperatur bei 6 °–7 °C mit Jahresniederschlägen um 1000 mm (Fiedler, 1995). Der Baarschwarzwald im Lee des Hochschwarzwaldes mit Höhen um 800 m bis 900 m ü. N. N. ist damit deutlich höher gelegen als der östliche Nordschwarzwald.

2.2.1.3 Landnutzung

Der östliche Nordschwarzwald und der Baarschwarzwald werden heute durch große zusammenhängende Nadelwälder aus Fichte, Tanne und Kiefer geprägt. Der Bewaldungsanteil des Buntsandsteinbereichs liegt bei etwa 72 % (Statistisches Bundesamt, 2000). Entlang der Flußläufe finden sich Siedlungen und Industrie. Auf den Buntsandsteinhochflächen liegen die Siedlungen verstreut als Rodungsinseln. Die landwirtschaftliche Nutzung besteht hier hauptsächlich aus Grünlandbewirtschaftung mit kleineren Äckern (Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, 1967a,b, 1959).

2.2.1.4 Historische Waldnutzungen

Die Wälder des Untersuchungsgebietes sind in historischer Zeit stark genutzt worden. Regional und zeitlich in unterschiedlicher Ausprägung waren dies im Nordschwarzwald vor allem Weide-, Streu- und Brennholznutzungen, aber auch willkürliches Weidbrennen (Bund, 1998). Oft wurden die bäuerlichen Waldnutzungen genossenschaftlich innerhalb

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

eines „Kirchspiels“ oder „Waldgedings“, wie beispielsweise in Altensteig oder Dornstetten, organisiert (Bund, 1998, S. 43). Im Mittleren und seltener im Südschwarzwald war bis Ende des 18. Jahrhunderts die Reutfeldwirtschaft stark verbreitet (Hug, 2000).

Die schwachwüchsigen und vor den Entwässerungen feuchten Wälder des Oberen Buntsandsteins sind dabei vor allem streugenutzt und beweidet worden (Röntgen, 1993; Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 1991; Hesselman, 1925).

Nutzholzentnahme fand in großem Umfang statt. Im Einzugsgebiet der größeren Flüsse des mittleren und nördlichen Schwarzwaldes wurde nachweisbar seit 1234 mit einem Schwerpunkt im 18. Jahrhundert gefloßt; auf den Flüssen Murg, Enz und Nagold wurde das Brenn- oder Bauholz in einem kombinierten Floß-Fuhrwerk-System rheinwärts transportiert (Bund, 1998).

Nachdem große Teile des Nordschwarzwaldes im 18. Jahrhundert entwaldet waren, wurden große Gebiete vor allem mit den Nadelhölzern Fichte und Kiefer aufgeforstet. Es gab bereits im frühen 20. Jahrhundert Bestrebungen, den Laubholzanteil auch als Bodenpflegemaßnahme zu erhöhen, zum Beispiel im Revier Langenbrand in der Nähe von Bad Liebenzell (Hesselman, 1925).

2.2.2 Quellenmaterial zu den Walddüngungen des Nordschwarzwaldes und des Baarschwarzwaldes

Die hier vorgestellte Geschichte der Walddüngungen des Nordschwarzwaldes und des Baarschwarzwaldes basiert auf der Recherche folgender Quellen:

- Pläne älterer Düngeversuche wurden von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) Baden-Württemberg, Freiburg zur Verfügung gestellt.
- Informationen zu gekalkten oder gedüngten Flächen konnten bei den ehemaligen Forstbezirken des Untersuchungsgebietes vor der Gebietsreform 2005 aus Düngekarten und aus Flächenbüchern gewonnen werden. Gedüngte Flächen sind in Karten mit Zeitpunkt, verwendeten Düngemitteln, der Düngermenge und der Art der Ausbringung dargestellt. Besucht wurden die Forstbezirke (von Norden nach Süden) Bad Wildbad, Bad Liebenzell, Calw, Enzklösterle, Altensteig, Pfalzgrafenweiler, Freudenstadt und Klosterreichenbach im Nordschwarzwald und die beiden Forstämter Villingen Staat und Villingen Stadt im Baarschwarzwald. Der Erhebungszeitraum erstreckt sich bis zum Jahr 2000.
- In der zeitgenössischen forstlichen Fachliteratur finden sich zahlreiche Veröffentlichungen zu Düngungen im Untersuchungsgebiet, die die Informationen der Versuchspläne ergänzen und somit Hinweise auf weitere Walddüngungen geben.

2.2.3 Versuchsdüngungen im Nordschwarzwald

Die Versuchsdüngungen wurden mit unterschiedlichen Zielsetzungen zwischen 1900 und 1965 zunächst von einzelnen Forstleuten und später unter wissenschaftlicher Begleitung der Forstverwaltung angelegt. Sie liegen, soweit lokalisierbar, bis auf DV 48, ausschließlich im Bereich des Buntsandsteins des Nordschwarzwalds zwischen den Orten Bad Wildbad und Bad Liebenzell im Norden und Freudenstadt und Pfalzgrafenweiler im Süden

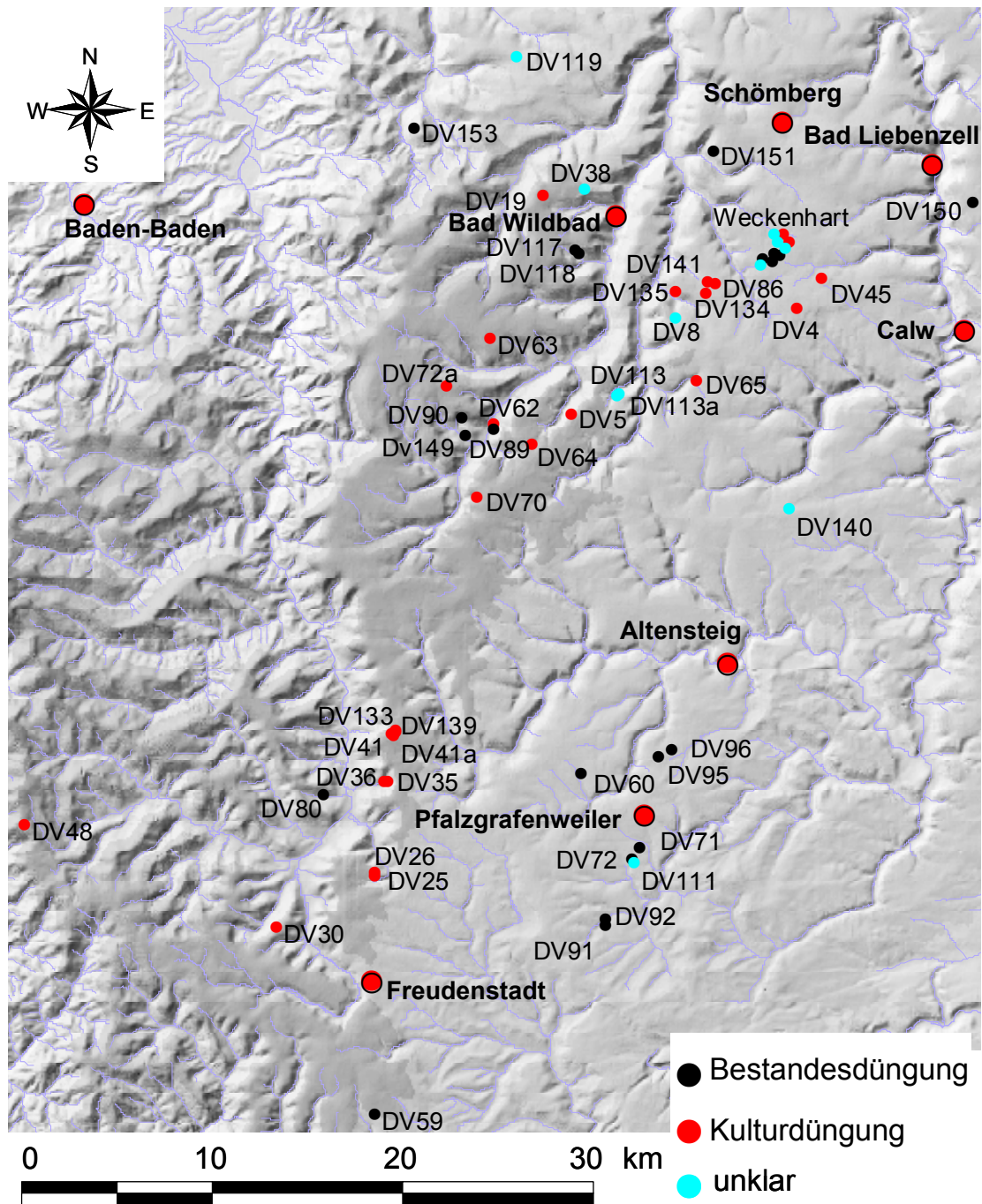


Abbildung 2.3: Alte Düngeversuche (DV) im Nordschwarzwald, angelegt zwischen 1900 und 1965 und eingeteilt in Kultur- oder Bestandesdüngungen (Tab. 2.2). Die Benennung ist aus dem Quellenmaterial übernommen. Im Weckenhart liegen die Düngeversuche (DV) 2, 3, 6, 98, 99, 104, 103, 102 und ein nicht benannter Versuch (u). Die genaue Lage einiger hier nicht gezeigter Versuche ist unbekannt. Kartengrundlagen (s. S. 118): DGM: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de) Az.: 2851.9-1/11; Gewässernetz: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2006).

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Tabelle 2.2: Übersicht der Düngeversuche im Nordschwarzwald, gegliedert nach Bestandes- und nach Kulturdüngungen mit Angaben zu Flächengrößen, Anzahl der Düngefelder (Varianten), Form der Düngemittel und weiteren Maßnahmen.

Bezeichnung ¹		Anlage (Jahr)	Größe (gesamt ha)	Felder (Anzahl)	SB	Bearbeitung		Art und Form der Düngung							
DV	Baumart					SE	BB	GD	RD	N	P	Ca	K	Mg	SD
Bestandesdüngungen															
DV 23	Fi374	1950	0,7	7					X	X	X				
DV 59	Fi375	1953	3	12					X	X	X				
DV 60	Fi385	1953	3,25	13					X	X	X				
DV 72	Fi 337	1953	3,25	13					X	X	X				
DV 80	Misch68	1954	0,75	3					X	X	X			Mü	
DV 71	Fi331	1954	1,2	6					X	X	X				
DV 95	Fi349	1955	1,25	5					X	X	X				
DV 88		1956	1,5	6					X	X	X				
DV 97	Misch81	1956	1	4					X	X	X				
DV 90	Kie118	1956	0,75	3					X	X	X				
DV 89	Kie117	1956	1,5	6					X	X	X				
DV 91	Fi339	1956	0,8	4					X	X	X				
DV 92	Fi340	1956	0,6	3					X	X	X				
DV 96	Misch50	1956	1	4					X	X	X				
DV 151	Kie149	1956	0,75	3					X	X	X				
DV 99	Kie53Misch53	1956	0,75	3					X	X	X				
DV 102	Kie54	1957	10	10								X	X		
DV 103		1957	7	14								X	X		
DV 104		1957	7,5	6								X	X		
DV 117	Kie141	1957	0,5	2					X	X	X				
DV 118	Kie142	1957	0,5	2					X	X	X				
DV 153	Ta201	1964	0,4	2					X	X	X				
DV 149	Misch66	1964	0,5	2					X	X					
DV 152	Kie85	1965	0,4	2					X	X	X				
DV 150	Kie150	1965	0,5	2					X	X	X	X			
Kultur- und Meliorationsdüngungen mit Kulturförderungsaspekt															
DV 30	Misch67	1900	0,84	7			X	X	X	X	X				
DV 34		1901	0,24	9			X		X		X	X	X		
DV 32		1914	0,3	3							X	X			
DV 11		1929	0,315	25	X		X		X		X	X		Ku	
DV 6		1929	0,125	5			X	X	X	X	X				
DV 46		1935	0,144	8				X		X	X	X			
DV 4		1949	1,2	24			X		X	X	X	X			
DV 35		1949	0,45	3				X			X			B	
DV 5	Kie146	1949	0,1	25			X		X	X	X	X	X		
DV 2		1949	1,5	6	X				X		X	X			
DV 18		1950	0,96	24					X		X	X	X	Cu	
DV 19		1950	3	60					X		X	X	X	Cu	
DV 25	Fi372	1950	2,1	42					X		X	X			
DV 26	Fi373	1950	0,9	9					X		X	X			
DV 36		1950	0,267	1			X				X				
DV 54		1950	0,72	24				X		X	X			B	
DV 48	Fi383	1950	2,5	25						X	X	X	X		
DV 12		1951	0,09	6							X	X	X		
DV 31		1951	1,8	18				X		X	X	X			
DV 63		1953	0,09	3					X	X	X	X	X		
DV 41	Fi378	1953	1	20				X		X	X	X	X		
DV 62		1953	0,297	9						X	X	X	X		
DV 64		1953	0,18	6						X	X	X			
DV 72a		1954	1,5	6						X	X	X	X		
DV 70		1954	0,6	12						X	X	X			
DV 65		1954	0,65	13				X		X	X	X			
DV 86	Misch80	1955	6,72	42			X	X	X	X	X	X		Ku	
DV 141		1955	0,06	6						X	X		X		
DV 41a	Fi379	1958	0,6	6				X		X	X				
DV 133		1960	-	-						X	X			Ku	
DV 139		1960	3,6	6				X	X					Ku	
DV 135		1960	-	-										Ku	
DV 134		1960	-	-										Ku	
Ziel aus Aktenlage nicht ersichtlich (unklar)															
DV 7		1949	1,4	7						X	X			B	
DV 3		1950	0,35	7						X	X	X	X		
DV 9		1950	2,64	11							X			B	
DV 29		1951	0,2	20						X	X	X			
DV 8	Fi380	1951	3,6	72						X	X	X			
DV 45		1951	0,3	6						X	X	X			
DV 113	Kie147	1954	0,55	5			X			X	X	X	X		
DV 119	Dgl142	1954	0,02	2						X	X	X			
DV 98		1956	1	4						X	X	X			
DV 38		1957	2,1	21				X		X	X	X			
DV 111		1957	0,25	25						X	X				
DV 112		1957	0,18	18						X	X				
unbekannt (u)		1957	-	3						X	X				
DV 140		1961	0,6	3						X	X	X	X		
DV 113a	Kie148	1963	0,4	4			X			X	X	X			

Abkürzungen: SB Streubekämpfung, SE Streuentfernung, BB Bodenbearbeitung, GD Gründüngung, RD Reisigdeckung
Düngemittel enthält: Ca Kalk, P Phosphat, K Kalium, Mg Magnesium
SD sonstige Dünger: B Basalt, Cu Kupferschlacke, Ku Kulturdünger, Mü Müllkompost

¹ Benennung der Versuche gemäß Archivmaterial und Fachliteratur

2.2 Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Tabelle 2.3: Übersicht über wichtige verwendete Düngemittel und -mengen von 44 Versuchsdüngungen (DV) im Nordschwarzwald. Die gemittelten Werte beziehen sich auf die jeweilige Maximalangabe für den jeweiligen Düngerversuch und die Anzahl von Versuchen, die damit gedüngt wurden.

	Bestandesdüngungen ($n = 21$) Zeitraum 1953-1965		Kulturdüngungen ($n = 23$) Zeitraum 1949-1960	
	Anzahl (Anwendungen)	Menge t/ha	Anzahl (Anwendungen)	Menge t/ha
Kalkbetonte Dünger				
Branntkalk			2	1,3
Kohlensaurer Kalk	20	2,7	18	3,2
Hüttenkalk	4	2,3	2	2,5
Mischkalk			2	4,4
Magnesiummergel			1	0,3
Phosphatbetonte Dünger				
Thomasphosphat	18	1,1	10	0,9
Weicherdiges Rohphosphat	2	0,7	9	0,6
Hyperphoskali	1	0,4		
Kalk- und Stickstoffdünger				
Kalkammonsalpeter	14	0,7	8	0,4
Kalksalpeter	6	0,4	2	0,2
Kalkstickstoff	1	0,5	1	0,7
Stickstoffdünger				
Schwefelsaurer Ammoniak	5	0,7	4	0,3
Ammoniakgas	1	0,2		
Ammonsulfatsalpeter	1	0,2		
Harnstoff	6	0,3	1	0,1
Kulturdünger				
Kalimagnesia			1	0,4
Nitrophoska			3	0,6

(Abb. 2.3). Die Versuchsdüngungen lassen sich in Kultur- und in Bestandesdüngerversuche gliedern (Tab. 2.2).

Die Kulturversuchsdüngungen wurden innerhalb eines mehr als 60 Jahren umfassenden Zeitraums etwa seit dem Jahr 1900 angelegt, während die Bestandesdüngungen alle zwischen den Jahren 1950 und 1965 angelegt wurden. Die Vielfalt von weiteren Maßnahmen wie Bodenbearbeitung und die Zahl benutzter Düngemittel war auf Kulturdüngungen wesentlich höher.

2.2.3.1 Kulturdüngungen

Die Gründe für die Anlage der frühesten Düngerversuche sind in Problemen bei der Kulturbegründung zu sehen und erfolgten laut Hausser & Schairer (1953) auf Initiative der lokalen Forstleute. So wurde die Mehrzahl der 20- bis 40-jährigen auf der Versuchsfläche stockenden Kiefern bei der Anlage des Versuchs DV 34 im Jahr 1901 als krüppelwüchsig und als zum Teil vom Heidekraut überwachsen dargestellt. Dies war damals typisch für viele Waldflächen im Schwarzwald (Hofmann, 1905). Diese Bedingungen erklären Maßnahmen wie die Entfernung der Streudecke und der Bodenvegetation auf vielen Kulturdüngungen vor dem Jahr 1950 (Tab. 2.2).

Für die Anlage des Düngerversuchs DV 46 aus dem Jahr 1935 nennen Hausser &

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Schairer (1953, S. 36–40) die konkreten Ziele des Veranlassers, des Landesforstmeisters Dr. Zimmerle. Erforscht werden sollte:

- Die Wirkung verschiedener Düngerarten auf das Gedeihen der Lupine.
- Die Wirkung der Lupinen-Zwischensaat auf das Höhenwachstum der Fichte.
- Die Wirkung direkter mineralischer Pflanzlochdüngung – insbesondere des mineralischen Stickstoffdüngers – auf das Höhenwachstum der Fichte im Vergleich zur Wirkung der Lupinenbeisaat.

Das Ziel dieser Düngeversuchen war damit ein besseres Gedeihen der Kultur. Das galt ebenso für die meisten anderen Kulturdüngungen dieser Zeit, wobei die stickstoffsammelnde Lupine oft als Alternative zu einer stickstoffbetonten Kulturdüngung geprüft werden sollte (Tab. 2.2).

Auch nach dem Zweiten Weltkrieg haben sich die Ziele der Kulturdüngungen nicht geändert. So sollte mit den Düngeversuchen DV 12, DV 48, DV 62b, DV 63 und DV 64 (alle ohne Gründüngung) geklärt werden, „ob und durch welche Düngungsmaßnahmen man den Zuwachs trügwüchsiger Nadelholzkulturen beleben kann“ (Hausser, 1958, S. 129).

Maßnahmen wie Streuentfernung und Bodenbearbeitung, aber auch Gründüngung, meist mit Lupinen, fanden ausschließlich auf den Kulturdüngungen statt (Tab. 2.2). Naheliegender ist dort die Verwendung von Kulturdüngern. Nach Henze (1904) wird die Gründüngung in Pflanzgärten bereits seit 1880 betrieben.

Nur zum Teil sind die als „Meliorationsdüngungen“ bezeichneten Düngungen auch als Kulturdüngungen zu verstehen: Neben der Förderung des Tannen- und Laubholzunterbaues als Kultur galt hier vor allem „zu klären, welche dieser Meliorationsmaßnahmen und welche Baumartenkombinationen auf lange Sicht das Gedeihen der als Hauptbaumart erwünschten Tanne am besten fördert“ (Hausser, 1973b, S. 205). Die Geschichte dieser Versuche beginnt mit dem Versuch DV 6. Dort wurden explizit verschiedene Verfahren (Tab. 2.2) mit dem Ziel der „Streubekämpfung“ und der „Bekämpfung der Heide- und Rohhumusbildung“ auf vernässenden Standorten auf Oberem Buntsandstein im Gebiet des Weckenhart (Abb. 2.3) verglichen (Zimmerle, 1949). Durch diese Maßnahmen sollte dort vor allem der Tannenunterbau unter krüppelwüchsiger Kiefer gefördert werden. Erfolge vor allem durch Bodenbearbeitung und Kalkung mit Reisigdeckung sowie Düngung mit Kalk, auch Branntkalk, und Phosphat führten 1949 bis 1955 zur Anlage weiterer „Meliorationsversuche“ (DV 4, DV 5, DV 86 und DV 65) in der näheren Umgebung (Hausser, 1973b). Hausser (1973b) nennt als Beweggründe für die Versuchsanlage die damalige Situation mit einer größeren Bedeutung der Forstwirtschaft mit guten Holzabsatzmöglichkeiten und nicht zuletzt die schädigende Streunutzung, die „in vielen Gemeinden eine nicht ablösbare Belastung, mit welcher auf lange Sicht zu rechnen war,“ darstellte (Hausser, 1973b, S. 205).

2.2.3.2 Bestandesdüngungen

Bestandesdüngungen wurden in jüngeren und älteren Altbeständen innerhalb eines engen Zeitraums zwischen 1950 und 1965 angelegt (Tab. 2.2). Als wichtigstes Ziel der Bestandesdüngungen konnte eine Zuwachssteigerung der Bestände durch Belebung des stockenden

2.2 Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Nährstoffkreislaufes gelten (Hausser, 1961). Besonderes in Kiefernbeständen sollten neue Düngeversuche angelegt werden, da im Gegensatz zur Fichte für diese Baumart in diesem Gebiet weder zu Jung- noch zu Altbeständen Erfahrungen mit Düngungen (DV 99, DV 102) vorlagen (Hausser, 1973a). Für Wertkiefernaltbestände im Gebiet des Enztalles sollte zudem geprüft werden, ob Nutzholz ohne Qualitätsverlust durch Düngungen (DV 88, DV 89, DV 90, DV 117 und DV 118) früher zu erreichen wären (Hausser, 1973a).

Die Bestandesdüngungen erfolgten meist auf mehreren etwa 500–3000 m² großen Feldern mit verschiedenen Kalkformen als Basis und mit Zusatz von verschiedenen Phosphat- und Stickstoffdüngern (Tab. 2.3). In den meisten Fällen wurde kohlenaurer Kalk ausgebracht; die häufigsten Anwendungen von Phosphat- und Stickstoffdüngern entfielen auf Thomasphosphat und Kalkammonsalpeter. Im Vergleich mit den Dosierungsempfehlungen aktueller Kompensationskalkungen in Baden-Württemberg in Höhe von 2,5–3,5 t/ha Kalk (von Wilpert & Schäffer, 2000; von Wilpert et al., 1993) wurden eher niedrige Dosierungen gewählt. So lag das Mittel der jeweils höchsten Dosierungen der Bestandesdüngungsversuche bei nur etwa 2,7 t/ha Kalk (Tab. 2.3).

2.2.4 Alte Walddüngungen im Nordschwarzwald in der Fachliteratur

Viele Hinweise zu Walddüngungen vor dem Zweiten Weltkrieg im Nordschwarzwald ergeben sich durch Recherche zeitgenössischer Fachliteratur und sind nicht (mehr) in den Forstämtern oder Archiven vorhanden. Neben dem ältesten Düngeversuch DV 30 aus dem Jahr 1900 (Tab 2.2) aus den Unterlagen und dem mehrfach in der Fachliteratur erwähnten Versuch DV 34 von 1901 (Hausser & Schairer, 1953; Eberhard, 1914; Hofmann, 1914; Ramm, 1911; Hofmann, 1905) finden sich dort weitere indirekte Hinweise zu Walddüngungen im Nordschwarzwald, deren Unterlagen vermutlich nicht mehr vorhanden sind.

Als Beispiel kann Reihling (1940) angeführt werden, der sich bei Bodenuntersuchungen im Raum Freudenstadt unklar darüber war, ob dort Kalkungen stattgefunden hatten: „Seit 25 Jahren wird der Bestand durch Einbringen von Kalk melioriert, jedoch kaum auf dem Gebiet der Ginsterversuchsfläche vor deren Anlage“ (Reihling, 1940, S. 204). Diese Unsicherheit gefährdet sogar die Sicherheit seiner Untersuchung. Belege für Düngungen vor dem zweiten Weltkrieg gibt es im Forstamt Freudenstadt keine mehr (Recherche im Jahr 2003).

Dass im Nordschwarzwald neben den Versuchen DV 30 und DV 34 bereits weitere sehr frühe Walddüngungen stattfanden, zeigen die Beiträge von Ramm (1911, 1902). In seiner Dissertation (Ramm, 1911) beschrieb er besonders für Standorte des Oberen Buntsandsteins im Bereich des Ortes Calmbach eine „Entartung“ des Bodens mit hohen organischen Auflagen und einer Tendenz zur Vernässung und „Klebsandbildung“. Als Gegenmaßnahme empfahl er langfristig eine Bestockung mit höheren Laubholzanteilen. Bei bereits „verdorbenen Objekten“ sah er Entfernung und eventuell anschließendes Verbrennen der Streu, Bodenbearbeitung zum Teil bis in einen Meter Tiefe, Entwässerung und auch Düngungen als Möglichkeiten, die Standorte kulturfähig zu machen. Im Bezirk Calmbach wurden mit Düngungen (kohlenaurer Kalk, Ätzkalk, Thomasmehl und Kali) zur Schaffung eines Keimbettes (Tanne) in „Riefen“ gute Erfahrungen gemacht (Ramm, 1911, 1902). Er stellte fest, dass der Rohhumus zusammen mit dem Dünger ein gutes

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Keimbett schuf und die Kulturen sich besser entwickelten.

Dass diese lokalen Erfahrungen mit verschiedenen Meliorationsverfahren in der damaligen Zeit auch international wahrgenommen wurden, zeigt die Untersuchung mehrerer Standorte durch den schwedischen Bodenkundler Hesselman im Jahr 1921 (Hesselman, 1925). Hesselman hatte die Rohhumusbildung als natürliches Phänomen und die Bedeutung des Feuers beim Stoffumsatz in skandinavischen Nadelwäldern untersucht. In vielen Gebieten Deutschlands galten Rohhumusaufgaben (auch Trockentorf), die als Folge historischer Nutzungen angesehen wurden, als ein zu beseitigendes Problem, das ungünstigen Nährstoffumsatz anzeigt (Wittich, 1952, 1942, 1930; Helbig, 1910).

Hesselman gab das Interesse an den lokalen bodenpflegerischen Maßnahmen als das Ziel seiner Reise an: „Im Verlauf der Untersuchungen zeigte es sich bald, dass es von Bedeutung wäre, die in Schweden gewonnenen Ergebnisse mit den in Mitteleuropa, besonders in Gegenden mit zielbewusster Bodenpflege, wie gewissen württembergischen Revieren und dem Anhalter Gut Bärenthoren, gewonnenen Erfahrungen zu verknüpfen“ (Hesselman, 1925, S. 508).

Die erfolgreiche Bodenpflege im Gut Bärenthoren erfolgte laut Möller (1920) durch Dauerwaldbewirtschaftung und durch bis zu einem halben Meter hohe Reisigdeckung, die als „Reisigdüngung“ bezeichnet wurde. Reisigdeckung wurde im Nordschwarzwald schon bei den ersten Versuchen (Tab. 2.2) betrieben und hatte sich als eine sehr erfolgreiche Maßnahme erwiesen: „Die Erfolge der Reisigdeckung stehen in 3 von 4 Versuchen an erster, in 1 Versuch an zweiter Stelle“ (Hausser & Schairer, 1953, S. 63). Es lässt sich nur vermuten, dass die Reisigdeckung damals in der Praxis zum Mulchen von Pflanzungen, also dem Schutz der oberen Bodenschicht vor Austrocknung und der Verdämmung von Unkraut, verbreitet war.

Insgesamt wird deutlich, dass im Nordschwarzwald neben den Versuchsdüngungen bereits seit etwa 1900 auch Meliorationen und Düngungen in der Praxis angewendet wurden. Die Methoden und Maßnahmen stehen im Zusammenhang zum damaligen Wissensstand und wurden lokalen Gegebenheiten angepasst.

2.2.5 Praxisdüngungen in den Forstbezirken Bad Liebenzell, Pfalzgrafenweiler und Villingen Staat

Durch die Forstämter Bad Wildbad, Bad Liebenzell, Calw, Enzklösterle, Altensteig, Pfalzgrafenweiler, Freudenstadt und Klosterreichenbach im Nordschwarzwald und die Forstämter Villingen Stadt und Villingen Staat mit Waldflächen im Baarschwarzwald wurden Praxisdüngungen im Zeitraum zwischen 1950 bis etwa 1970 durchgeführt. Diese Praxisdüngungen werden hier am Beispiel der drei Forstbezirke Bad Liebenzell, Pfalzgrafenweiler und Villingen Staat beschrieben. Ein Anspruch auf Vollständigkeit, vor allem zu der Frage, ob nicht auch schon zuvor Praxisdüngungen durchgeführt wurden, kann angesichts einiger Verwaltungsreformen in der Vergangenheit und den damit verbundenen Änderungen der Zuständigkeiten und der Überführung von Unterlagen nicht erhoben werden. So wurde etwa ein Großteil der hier dem Forstbezirk Bad Liebenzell zugeordneten Praxisdüngungen von den zwischenzeitlich aufgelösten Forstbezirken Calmbach und Hirsau veranlasst.

Während sich in den Bezirken Bad Liebenzell und Villingen Staat die gedüngte Flä-

2.2 Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

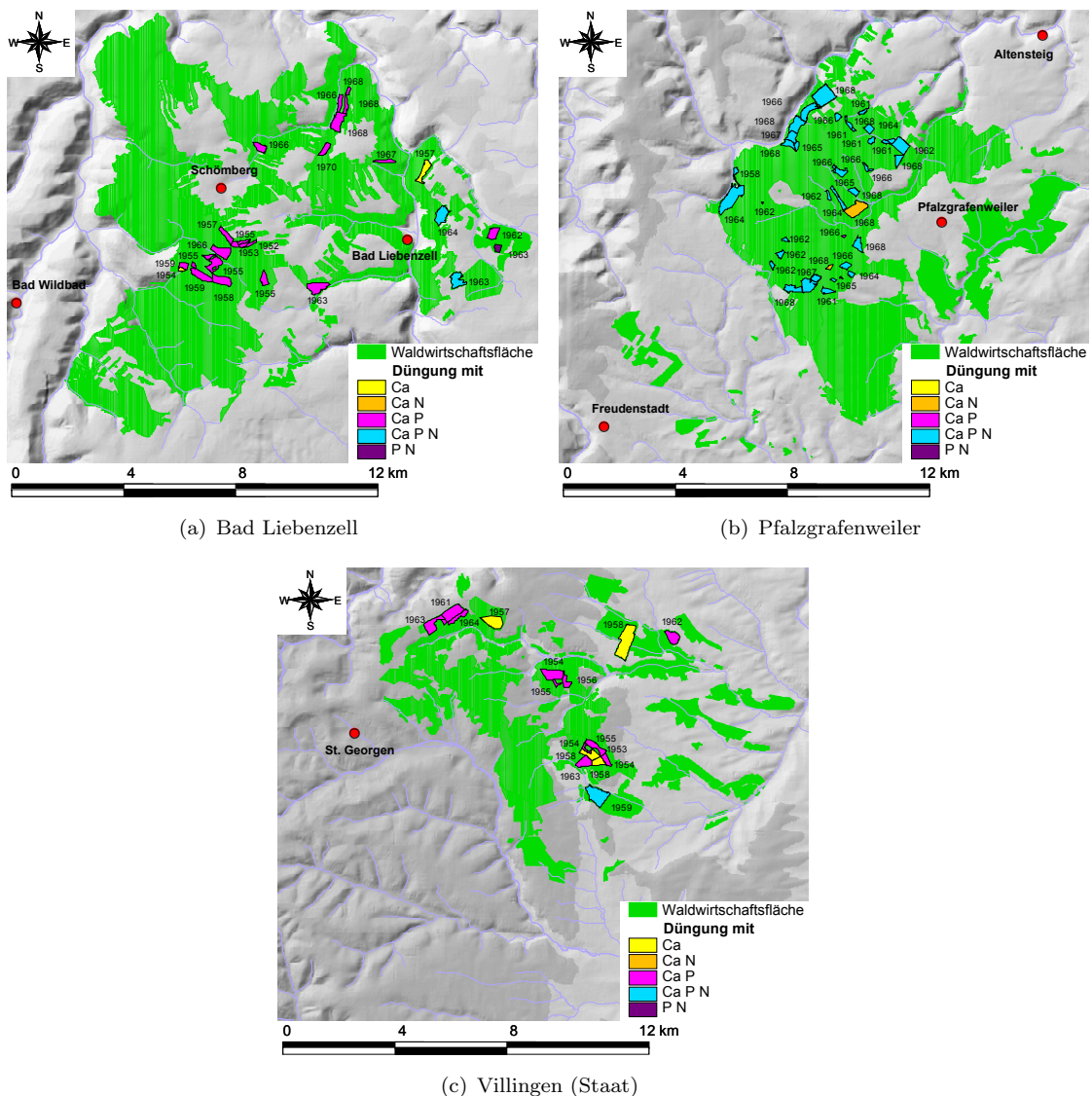


Abbildung 2.4: Praxisdüngungen zwischen 1950 und 1970 in den ehemaligen Forstbezirken Bad Liebenzell, Pfalzgrafenweiler und Villingen (Staat). Kartengrundlagen (s. S. 118): DGM: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de) Az.: 2851.9-1/11; Gewässernetz: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2006); Waldeinteilung nach MLR Baden-Württemberg (2002a).

che und die Anzahl der Praxisdüngungen mehr oder weniger auf die beiden Dekaden der 1950er und 1960er Jahre verteilten, wurde im Bezirk Pfalzgrafenweiler fast ausschließlich in den 1960er Jahren gedüngt (Tab. 2.4). Diese erfolgten nach der Aktenlage zum überwiegenden Teil als Bestandesdüngungen. Der Dünger wurde durch Verblasen mittels geländegängiger Fahrzeuge ausgebracht. Nach dem Jahr 1970 fanden in keinem der drei Forstbezirke mehr Forstdüngungen statt, was wohl auf geringen Erfolg der Düngungen und gesunkene Holzpreise zurückzuführen war (Gussone, 1983, vgl. S. 8).

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Tabelle 2.4: Flächen- und Düngebilanz der Praxisdüngungen von 1950–1970 in den Forstbezirken Bad Liebenzell, Pfalzgrafenweiler und Villingen (Staat).

Forstbezirk (Stand 2003)	Bad Liebenzell		Pfalzgrafenweiler		Villingen (Staat)	
Zeitraum	1950-59	1960-70	1950-59	1960-70	1950-59	1960-70
Waldfläche*	7323 ha		5845		7046	
Anzahl Düngungen	13	13	1	38	12	7
mittlere Düngefläche (ha)	8,6	11,6	4,0	9,1	15,3	16,4
Gedüngte Fläche (ha)	111	151	4	349	184	82
Düngemittel	Flächenbilanz nach Düngemitteln (ha)					
Branntkalk					3	
Kohlensaurer Kalk	111	146			177	67
Hüttenkalk					15	
Thomasphosphat	7	16	4	322	25	
Rhenaniaphosphat					15	
Weicherdiges Rohphosphat	87	130			64	67
Hyperphoskali					49	
Kalkammonsalpeter			4	348	32	
Kalksalpeter					18	
Kalimagnesia					85	15
Nitrophoska					5	
Düngemittel	Durchschnittliche gedüngte Menge in t/ha (über die Fläche gemittelt)					
Branntkalk					11,3	
Kohlensaurer Kalk	6,1	4,1			3,4	3,7
Hüttenkalk					3,9	
Thomasphosphat	6,0	4,3	1,0	1,0	2,2	
Rhenaniaphosphat					3,9	
Weicherdiges Rohphosphat	6,3	4,1			4,6	3,7
Hyperphoskali					3,4	
Kalkammonsalpeter			4,0	1,0	4,0	
Kalksalpeter					3,6	
Kalimagnesia					3,7	3,9
Nitrophoska					0,4	
Elemente	Flächenbilanz gedüngter Elemente in t/ha (Werte aus Gussone, 1964)					
Ca	0,94	0,36	0,23	0,22	0,62	0,36
N			0,01	0,04	0,04	
P	0,09	0,05	0,01	0,01	0,02	0,05

* Aus dem vorliegenden FOGIS (MLR Baden-Württemberg, 2002b)

Die flächenmäßige Bedeutung der Düngungen in diesem Zeitraum ist im Verhältnis zur bewirtschafteten Waldfläche, die hier zur Einordnung nach MLR Baden-Württemberg (2002b) zugrundegelegt wird, nicht bedeutend (Tab. 2.4). Sie liegt für alle drei Forstbezirke in ähnlichen Größenordnungen zwischen etwa 250–350 ha (Abb. 2.4), was etwa 3,5–6 % der jeweils zum Bearbeitungszeitpunkt verwalteten Waldfläche ausmacht.

In den Forstbezirken wurde teilweise mit unterschiedlichen Düngemitteln gedüngt (Tab. 2.4): In Pfalzgrafenweiler wurde meist in ähnlich hoher Dosierung eine Kombination von Kalkammonsalpeter und Thomasphosphat, also eine Kalzium-, Phosphat- und Stickstoffkombination (Ca P N) gedüngt, die im Vergleich zu den Düngungen der beiden anderen Forstbezirke wenig Kalzium in der Elementbilanz enthält. Auf allen großflächigen Düngungen in Bad Liebenzell und Villingen (Staat) bildet kalkhaltiger Dünger, meist kohlensaurer Kalk, die Grundlage. Die durchschnittliche Menge liegt in Größenordnungen zwischen 4–6 t/ha. Neben wenigen Flächen dort, die ausschließlich gekalkt wurden (Ca), wurde meist ein Phosphatdünger (Ca P) und in wenigen Ausnahmen noch

2.2 Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

ein Stickstoffdünger (Ca P N) dazugegeben (Abb. 2.4). Die Phosphatdüngung erfolgte meist in Form von Thomasphosphat oder weicherdigem Rohphosphat, synonym auch Hyperphos (Mengel, 1986). Dies wurde oft auch kombiniert mit Kalium als Hyperphoskali. Die bedeutendsten Stickstoffdünger waren Kalksalpeter und Kalkammonsalpeter. Flächenmäßig unbedeutend war eine Kulturdüngung mit Nitrophoska (PN, Abb. 2.4) im Forstbezirk Bad Liebenzell.

Im Vergleich mit den in Altbeständen angelegten Düngeversuchen wurden in diesen Praxisdüngungen in ihrer Kombination und Dosierung ähnliche Düngemittel benutzt (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). In der Praxis wurde, im Gegensatz zu den auf Versuchsdüngungen meist gedüngtem Thomasphosphat, Phosphat sehr häufig in Form von weicherdigem Rohphosphat (synonym Hyperphos) gedüngt.

2.2.6 Kompensationskalkungen seit 1980

Kompensationskalkungen gegen Bodenversauerung durch Immissionen werden seit etwa 1980 auf dem überwiegenden Teil der Waldfläche in den besuchten Forstbezirken Bad Wildbad, Calw, Enzklösterle, Altensteig, Pfalzgrafenweiler, Freudenstadt, Klosterreichenbach und Villingen Stadt vorgenommen. In den Forstbezirken Bad Liebenzell und Villingen (Staat) wurde dagegen bisher (Stand 2003) nur eine geringe Fläche gekalkt, was im Wesentlichen auf die jeweils unterschiedliche Beurteilung der Notwendigkeit dieser Maßnahmen durch die zuständigen Forstleute zurückzuführen ist.

Ergebnisse von Bodenzustandserhebungen, Praxisversuchen zur Kompensationskalkung und vom aktuellen Bodenzustand älterer Versuchsdüngungen in Baden-Württemberg (u. a. von Wilpert, 2003, 1996; Buberl et al., 1994; von Wilpert et al., 1993; Kenk et al., 1984), führten zur Ableitung aktueller Ziele von Kompensations- oder auch „Meliorationskalkungen“ (von Wilpert & Schäffer, 2000):

- Neutralisierung aktueller Säureinträge an der Bodenoberfläche.
- Erhöhung der Basensättigung, Austauschkapazität und Pufferkapazität im Wurzelraum.
- Biologische Einarbeitung organischer Substanzen in den Mineralboden und damit verbunden eine Erhöhung der Stickstoffspeicherkapazität.
- Die Verbesserung der Magnesiumversorgung der Bäume.
- Die langfristige Erhaltung der Wasserqualität in Waldeinzugsgebieten.

Dabei weisen „dringend meliorationsbedürftige Standorte“ eine sehr geringe Basensättigung unterhalb von 5 %, und von pH-Werten niedriger als pH_{KCl} 3 auf, noch „meliorationsbedürftige Standorte“ liegen unterhalb von 15 %, Basensättigung und pH_{KCl} 3,8 (von Wilpert & Schäffer, 2000). Diese Standorte sind in Baden-Württemberg hauptsächlich im kristallinen Schwarzwald und Odenwald und in der Altmoränenlandschaft Oberschwabens zu finden.

In Baden-Württemberg wurden zwischen den Jahren 1984 und 1995 etwa 162.000 ha Wald gekalkt und weitere dringend kalkungsbedürftige Flächen, etwa 600.000 ha, sollen in den nächsten 30 Jahren in einem ersten Durchgang gekalkt werden (von Wilpert &

2 Die Geschichte der Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Tabelle 2.5: Übersicht über gekalkte Flächen im Forstbezirk Pfalzgrafenweiler im Zeitraum zwischen 1980 und 2000. Gekalkt wurde abgesehen von den Jahren 1984/85 mit Kalkammonsalpeter, sonst ausschließlich mit dolomitischen Kalken. Bis zum Jahr 1988 enthalten diese stets einen Phosphatzusatz von 3–4% P_2O_5 (vgl. auch Abb. 2.5), die Magnesiumgehalte der dolomitischen Kalke betragen zwischen 8–40% MgO.

Jahr	Fläche (ha)	Menge* (t/ha)	ZusätzeForm
1984	62	2,6	P
1984	21	3	P, KAS
1985	13	2,5	P
1985	15	0,5	KAS
1986	151	2	P
1987	338	2	P G
1988	42	3,2	P
1989	44	1,5	
1990	180	2,5	G
1991	762	2,8	G
1992	1210	2,5	G
1993	824	2,5	G
1994	108	2,5	G
1980-2000	3770	(64% der Gesamtfläche)	

Abkürzungen:
P Phosphatzusatz
KAS Kalkammonsalpeter
G granuliert, sofern erwähnt

*Durchschnitt für alle Flächen und Kalkungen

Schäffer, 2000). Es wird je nach Standort die Ausbringung von Kalken mit Magnesiumanteilen über 12%, mit gewissen Mindestanforderungen an Verteilung der Kornfraktionen, in Mengen zwischen 2,5–4 t/ha mittels Helikopter oder Verblasung erdgebundener Fahrzeuge empfohlen (von Wilpert & Schäffer, 2000). Für Wasserschutzgebiete mit der Gefahr einer verstärkten Nitratauswaschung durch Mineralisierung werden langsam wirkende Gesteinsmehle empfohlen, die auch höher dosiert werden können.

Die Umsetzung dieser Direktiven lässt sich gut am Beispiel des Forstbezirkes Pfalzgrafenweiler nachvollziehen. Dort wurden im Zeitraum zwischen 1984 und 1994 (Stand 2003) insgesamt 3770 Hektar und damit etwa 64% der bewirtschafteten Fläche gekalkt (Tab. 2.5). Im Vergleich zu den Praxisdüngungen der 1950er und 1960er Jahre beträgt die gekalkte Fläche sowohl insgesamt als auch für jede einzelne Düngungs- oder Kalkungsmaßnahme mit etwa 100 ha ein Vielfaches.

Abgesehen von den Jahren 1984 und 1985, die als Einzelfälle zu betrachten sind und in denen neben Kalk auch Kalkammonsalpeter (0,6 t/ha) allein oder in Kombination gedüngt wurde, kamen in Pfalzgrafenweiler dolomitische Kalke in verschiedenen Formen und durchschnittlichen Dosierungen von meist 2–3 t/ha zur Anwendung (Tab. 2.5). Bis zum Jahr 1988 ist ein Phosphatanteil in den Kalken enthalten, ab 1987 werden, soweit in den Unterlagen vermerkt, verstärkt granuliert Kalke (G) verwendet. Der Phosphatanteil für viele dieser Kalkmischungen beträgt etwa 3% P_2O_5 und der Magnesiumanteil kann zwischen 12 und 40% MgO liegen, wie dies auch am Beispiel eines Düngeplans des ehemaligen Forstbezirks Bad Wildbad belegt werden kann (Abb. 2.5). Bei einer zugrunde-

2.2 Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar

Meliorationsdüngung ab FWJ 1979				
Stadtwald Wildbad				
Stabilo-Nr	FWJ	Düngersorte	Dünger- menge	H : Hubschrauber T : Terrestrisch
8745	1979			
8756	1980			
8754	1981			
8739	1982	Konverterkalk (45% CaO+MgO und 4% P ₂ O ₅)	3 t/ha	T
8712	1983	Thomaskalk 4	3 t/ha	T
8729	1984			
8713	1985	Thomaskalk 4	3 t/ha	T
8791	1986	Forstsondermischung 111 (Magnesiumkalk mit mind. 8,4% MgO und 3% P ₂ O ₅)	3 t/ha	T
8727	1987	Forstsondermischung 111 (Magnesiumkalk mit mind. 8,4% MgO und 3% P ₂ O ₅)	3 t/ha	T
8741	1988	Forstsondermischung 111 (Magnesiumkalk mit mind. 8,4% MgO und 3% P ₂ O ₅)	3 t/ha	T
8740	1989	Forstsondermischung 111 (Magnesiumkalk mit mind. 8,4% MgO und 3% P ₂ O ₅)	3 t/ha	T
8743	1990	Forstsondermischung 111 (Magnesiumkalk mit mind. 8,4% MgO und 3% P ₂ O ₅)	3 t/ha	T
8732	1991	Wald 80 P3 (Magnesiumkalk mit mind. 8,4% MgO und 3% P ₂ O ₅)	3 t/ha	H
8744	1992	Wald 80 P3 (Magnesiumkalk mit mind. 8,4% MgO und 3% P ₂ O ₅)	3 t/ha	H, T
8757	1993	Wald 80 P3 (Magnesiumkalk 9 mit mind. 25% MgCO ₃ u. 3% P ₂ O ₅)		H, T

Abbildung 2.5: Beispiele für die Zusammensetzung von Kalkmischungen für Kompensationskalkungen in der Praxis (Forstbezirk Bad Wildbad).

gelegten Kalkung mit einer Dosierung von 3 t/ha und 3 % P₂O₅ würde die Phosphatgabe etwa 0,5 t/ha Thomasphosphat (Angaben nach Gussone, 1964) entsprechen. Damit ist die Phosphatgabe etwa halb so hoch wie es in den Praxisdüngungen der 1950er und 1960er Jahre üblich war.

Diese Phosphatbeigaben werden auch aktuell für Standorte mit Rohhumusauflagen und einem weiten C/P-Verhältnis über 200 zur „Reaktivierung biogener Stoffumsätze“ gefordert (von Wilpert & Schäffer, 2000).

Darüber hinaus sollen Kompensationskalkungen die Einbringung standortgemäßer Baumarten erleichtern, die als Tiefwurzler Nährstoffkreisläufe stabilisieren (von Wilpert & Schäffer, 2000), ein Ziel, das unter anderen Voraussetzungen zuvor auch mit Düngungen angestrebt wurde. Ein zusammenfassender Überblick über den Wandel der Zielsetzungen im Verlauf der Geschichte der Düngung im Wald folgt im nächsten Abschnitt.

2.3 Vergleich der Zielsetzungen der Düngungen

Im zeitlichen Vergleich aller dieser Düngemaßnahmen im Untersuchungsgebiet und eingebettet in einen überregionalen Kontext zeigen sich trotz der Unterschiede zwischen den Perioden der Walddüngungen auch Gemeinsamkeiten.

Obwohl zumindest bis in die 1970er Jahre immer Aspekte der Ertragssteigerung eine Rolle gespielt hatten, wurde bereits früh eine langfristige (s. o. Albert, 1905) Melioration von durch menschliche Nutzung verarmten Standorten angestrebt. Düngung dient dabei nicht unbedingt einer kurzfristigen Ertragssteigerung, sondern soll quasi als Startzündung in Nadelwälder eingebrachte Laubbäume als nachhaltige Streuverbesserer fördern, wie die für andere Gebiete beispielsweise von Bernhard (1921) oder Erdmann (1921) beschrieben wurde. Dies war auch das Ziel der frühen Düngungen und Meliorationen im Nordschwarzwald im Raum Calmbach und Langenbrand (s. o. Hesselman, 1925; Eberhard, 1914; Ramm, 1911) und zieht sich als Idee über die z. B. von Hausser (1973b) beschriebenen Meliorationsdüngungen um 1950 bis in die heutige Zeit des Waldumbaus und erhöhter Stoffeinträge (Dohrenbusch et al., 2000; von Wilpert & Schäffer, 2000; Weber, 1999).

Bei den Kultur- und Bestandesdüngungen, vor allem der 1950er und 1960er Jahre, spielten dagegen ökonomische Aspekte eine stärkere Rolle (Hausser, 1973a, 1961). Unter Beibehaltung des Ziels der nachhaltigen Verbesserung der Stoffkreisläufe (Wittich, 1958) sollte das Wachstum auch nicht schlechtwüchsiger Bestände gefördert werden (Gussone, 1983). Darunter fallen auch die Praxisdüngungen der 1950er und 1960er Jahre im Nordschwarzwald und im Forstbezirk Villingen (Staat).

Die Geschichte der Düngung im Wald mit ihren unterschiedlichen Zielsetzungen lässt sich von den Anfängen mit der Düngung schlechtwüchsiger Kulturen bis zu den heutigen Kompensationskalkungen am Beispiel des Nordschwarzwaldes und von Teilen des Baarschwarzwaldes verfolgen. Vor dem Zweiten Weltkrieg verbreitete Ideen zur Melioration wie die Reisigdeckung kamen neben Düngungen in unterschiedlicher Form auch im Nordschwarzwald zur Anwendung. Als eine regionale Besonderheit kann dabei die Melioration und Düngung der vernässenden Standorte des Oberen Buntsandsteins angesehen werden.

*Eine Generation verlässt die Unternehmungen der anderen wie gestrandete
Schiffe*

Henry David Thoreau

3 Material und Methoden

3.1 Die Untersuchungsflächen

Die hier vorgestellten Untersuchungsflächen sind aus einer Vielzahl von älteren Versuchs- und Praxisdüngungen im Nordschwarzwald und im Baarschwarzwald ausgewählt worden, die im vorigen Kapitel beschrieben wurden. Dort findet sich auch eine Beschreibung des Naturraumes Nordschwarzwald und Baarschwarzwald.

3.1.1 Auswahl der Untersuchungsflächen

Für die Klärung der Frage nach den langfristigen Veränderungen von Bodenvegetation und Standorten durch Walddüngungen und -kalkungen war es wichtig, sowohl Flächen mit lang zurückliegender Düngung, als auch entsprechende ungedüngte Flächen als Vergleich zu finden. Es wurden einschichtige, allenfalls leicht strukturierte Althölzer ausgewählt, die licht genug für die Ausbildung einer charakteristischen Moos- und Krautschicht sind.

Als Quellen zur Flächenauswahl standen die im vorigen Kapitel vorgestellten Düngeversuchsunterlagen und Düngekarten aus der Forstpraxis der Forstämter im Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Da bis auf die ehemaligen Forstämter Bad Liebenzell im Nordschwarzwald und Villingen (Staat) im Baarschwarzwald fast die gesamte Waldfläche des Untersuchungsgebietes seit den 1980er Jahren gegen Bodenversauerung gekalkt wurde, war besonders die Auswahlmöglichkeit ungedüngter Vergleichsflächen stark eingeschränkt.

Die Düngeversuchsflächen wurden bei den Kalkungen oft ausgespart, doch waren die meisten Flächen für eine Inventur nicht mehr geeignet, da die Düngeparzellen oft sehr klein oder nicht mehr exakt abgrenzbar waren oder die Bestände Stürmen zum Opfer gefallen sind.

Fünf geeignete, jeweils aus mehreren Beständen bestehende Untersuchungsflächen wurden ausgewählt (Abb. 3.1). Vier der Untersuchungsflächen (L1, L2, L3 und L4) liegen im Nordschwarzwald im Bereich des ehemaligen Forstbezirkes Bad Liebenzell, dessen Waldgebiete im Zuge einer Reform seit dem Jahr 2005 durch das Landratsamt Calw verwaltet werden. Eine Untersuchungsfläche (V1) liegt im Baarschwarzwald, ehemals verwaltet durch das Forstamt Villingen Staat, heute Landratsamt Villingen-Schwenningen. Die Abkürzungen der Untersuchungsflächen „L“ und „V“ stehen für die Forstbezirke, in denen sie liegen.

3.1.2 Klima

Alle Untersuchungsflächen liegen in Buntsandsteingebieten des Nord- und Baarschwarzwaldes.

Die Untersuchungsflächen L1, L3 und L4 liegen nah beieinander auf der Enz-Nagoldplatte im nördlichen Teil des Einzelwuchsbezirks 3/06 „Flächenschwarzwald“ (Abb. 3.1

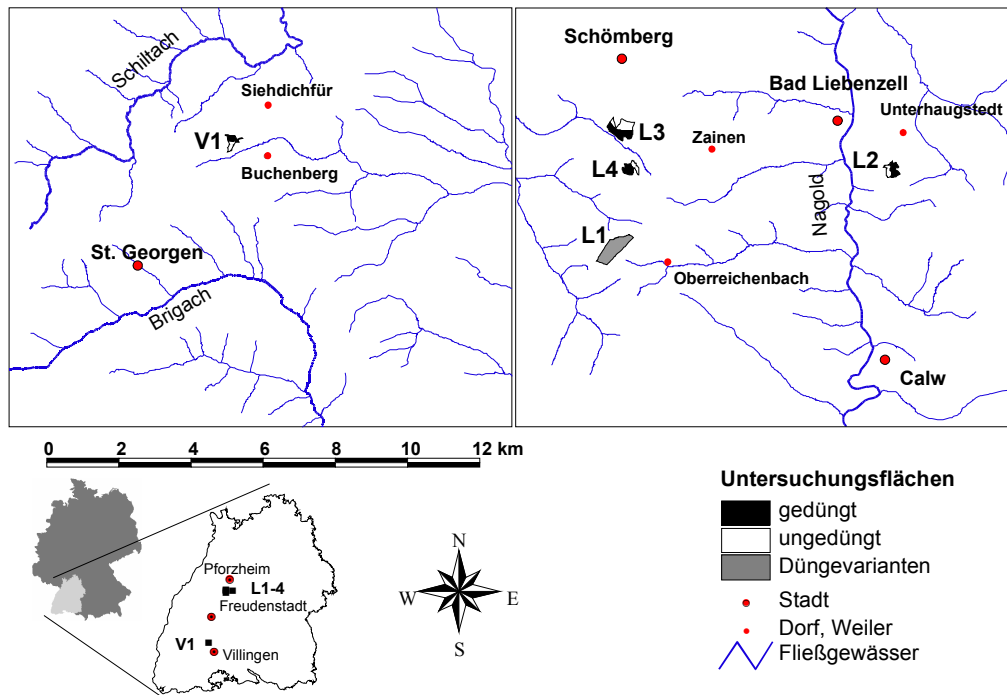


Abbildung 3.1: Die Lage der Untersuchungsflächen im Schwarzwald. Gewässernetz (s. S. 118): Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2006).

und Tab. 3.1). Die drei Flächen liegen auf Meereshöhen um 700 m mit Jahresniederschlägen um 1000 mm und Jahresmitteltemperaturen zwischen 7 °C und 8 °C in der montanen Höhenstufe. Durch den leichten Lee-Effekt des Schwarzwaldhauptkammes zeigt das Klima bereits eine schwach subkontinentale Tendenz (Fiedler, 1995).

In der submontanen Höhenstufe mit einer Meereshöhe um 550 m liegt die Untersuchungsfläche L2 östlich der Nagold mit entsprechend wärmerem Klima und etwas geringeren Niederschlägen im von 3/06 abgetrennten Einzelwuchsbezirk 3/06α „Ostrand des Flächenschwarzwaldes“ (Tab. 3.1).

Die Untersuchungsfläche V1 weicht von den anderen Flächen klimatisch stärker ab. Sie liegt mit 850 m Meereshöhe noch in der montanen Stufe, das Klima ist bei Jahresniederschlägen um 1000 mm und einer Jahresmitteltemperatur von 6–7 °C etwas kühler als auf den anderen Flächen. Durch die Lage im Lee des Hochschwarzwaldes und den Kaltluftstau der Baarhochmulde bei Inversionswetterlagen weist der Einzelwuchsbezirk 5/01 „Baar-Schwarzwald“ eine ausgeprägte kontinentale Klimatönung auf.

3.1.3 Immissionen

Viele beobachtete Veränderungen der Waldbodenvegetation auch im Schwarzwald werden auf erhöhte Stickstoffimmissionen zurückgeführt (Bürger, 1991). Dies spielt möglicherweise auch auf den Untersuchungsflächen eine Rolle und ist damit eine wichtige Störgröße für die Diskussion.

Die hier präsentierten Werte stammen aus Hug et al. (2005) und geben einen Überblick über die Situation der Stoffeinträge nahe liegender Messstationen der letzten 18 Jahre.

Tabelle 3.1: Klima und Geologie der Untersuchungsflächen und Anzahl der Probeflächen.

Untersuchungsfläche	L1	L2	L3	L4	V1
Probeflächen (N)	145	50	80	20	40
davon ungedüngt	35	25	40	10	20
Lage und Exposition	eben	eben	SSW- Hang	eben	eben
Meereshöhe (m)	700	550	680	680	850
Niederschlag im Jahr (mm)*	1000	800	1000	1000	1000
Jahresmitteltemperatur (°C)*	7-8	8-9	7-8	7-8	6-7
Buntsandsteinschicht**	so	so	smc2	so	so
Einzelwuchsbezirk***	3/06	3/06 α	3/06	3/06	5/01

*gemittelt und gerundet aus Fiedler (1995)

** Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1991)

*** nach Aldinger et al. (1998)

Baden-Württemberg lässt sich im Hinblick auf die Gesamtsäureeinträge in drei Regionen unterteilen (hydrologisches Jahr 2000). Am stärksten von Immissionen belastet sind die Luv- und Kammlagen des Schwarzwaldes und Odenwaldes mit jährlichen Protonenbelastungen von 1,6–2,5 (kmol_c)/a/ha, gefolgt vom Nördlichen Neckarland, Ostalb, Alpenvorland und niederschlagsreichen Schwarzwaldleelagen (Freudenstadt) mit 0,8–1,6 (kmol_c)/a/ha. Nur gering belastet (0,4–0,9 (kmol_c) sind Rheinebene, Südwestalb, Baar, südliches Neckarland und die Schwarzwaldstation Altensteig.

Bei sinkender Gesamtprotonenbelastung (direkt und indirekt) lässt sich kein Trend für einen Rückgang der Stickstoffeinträge in den letzten 18 Jahren erkennen. Dies ist auf gleichbleibend hohe Stickstoffeinträge zurückzuführen, wobei SO₂, das zu Beginn der Messungen besonders im Luv des Schwarzwaldes hohe Werte aufwies, inzwischen fast vollständig abgesenkt wurde. Für das hydrologische Jahr 2000 werden für Waldbestände (Modellberechnung aus Freilandmessungen) im Lee des Schwarzwaldhauptkammes (Altensteig 14,3 kg/a/ha N, Rosenfeld 16,3 kg/a/ha N, Löffingen 8,3 kg/a/ha N) geringere Werte als für die westlich des Schwarzwaldhauptkammes liegenden Stationen angegeben (Werte zwischen 23,6 bis 49,2 kg/a/ha N). Dabei überwiegt jeweils Nitrat-Stickstoff (ca. 70 %).

Die Lage der Untersuchungsflächen im Lee des Schwarzwaldhauptkammes lässt dort auf Einträge im niedrigen bis mittleren Bereich der vorgestellten Werte schließen.

3.1.4 Standorte und Böden der Untersuchungsflächen

Bis auf Untersuchungsfläche L3 liegen alle Untersuchungsflächen auf Oberem Buntsandstein (so) in ebenen oder allenfalls leicht geneigter Lage, während die Untersuchungsfläche L3 auf einem flachen, ca. 8° geneigten Süd-Süd-West-Hang (Mittlerer Buntsandstein, smc2) liegt. Dieser Hang ist zum Teil blocküberlagert.

In den ebenen Lagen des Oberen Buntsandsteins (L1, L2, L4, V1) tritt eine breite Palette (Tab. 3.2; MLR Baden-Württemberg, 2002b; Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 1991) verschiedener, teilweise kleinräumig wechselnder Standortseinheiten auf. Der Wasserhaushalt reicht von vernässenden über wechselfeucht- bis wechselfrockene

Tabelle 3.2: Standortseinheiten auf den Untersuchungsflächen L1, L2, L3 und L4.

Standortseinheit	Kurzform	Untersuchungsfläche
Mäßig frischer lehmiger Sand	lS	L1
Stark saurer wechselfeuchter lehmiger Sand	swflS	L1
Wechselfeuchter lehmiger Sand	wflS	L1
Stark saurer mäßig frischer lehmiger Sand	slS	L1, L2, L4
Stark saurer vernässender lehmiger Sand	svnlS	L1, L4
Schwach wechselfeuchter tongründiger lehmiger Sand	(wf)tlS	L1, L2
Saurer schwach wechselfeuchter Buntsandstein-Mischlehm	s(wf)ML	L4, L2
Stark saurer schwach wechselfeuchter tongründiger lehmiger Sand	s(wf)tlS	L4, L2
Stark saurer mäßig frischer Buntsandstein-Mischlehm	ssML	L4, L2
Stark saurer vernässender schluffiger Lehm	svnL	L4, L2
Wechselfeuchter Buntsandstein-Mischlehm	wfML	L2
Stark saurer mäßig frischer lehmig-sandiger Flachhang	slsFH	L3
Stark saurer mäßig frischer sandiger Flachhang	ssFH	L3
Mäßig frischer sandigem Flachhang	sFH	L3
Mäßig frischer lehmig-sandiger Flachhang	lsFH	L3

Aus MLR Baden-Württemberg (2002b)

bis zu frischen Verhältnissen. Dies ist durch wechselnde Anteile toniger wasserstauender Schichten im Ober- und Unterboden bedingt.

In den forstlichen Standortskarten (MLR Baden-Württemberg, 2002b) sind verschiedene Standortseinheiten nach Vernässungsgraden zusammengefasst. Einen kurzen Überblick über die Unterschiede in bodenchemischen Eigenschaften und Feuchte-Zeigerwerten der Vegetationsaufnahmen nach Ellenberg et al. (1992) zwischen als „nichtvernässende“ und „mehr oder weniger vernässende“ zusammengefasste Standortseinheiten ungedüngter Flächen, geben die Werte in Tabelle B.1, S. 134 und ein Diskussionsbeitrag in Abschnitt 5.1.1, S. 97.

Für Untersuchungsfläche V1 lagen keine digitalen Standortskarten vor, jedoch wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Krug (1996) das Gebiet mit den Einheiten „grundfrischer Decklehm“, „schwach wechselfeuchte, lehmig-sandige Böden“, „mäßig frischer Feinlehm“ und „mäßig frischer, sandiger Lehm“ kartiert. Auf Untersuchungsfläche L3 sind die Standorte einheitlicher.

3.1.5 Die Waldbestände

Auf allen fünf Untersuchungsflächen sind die Baumarten Kiefer, Tanne und Fichte bestandesbildend und einzelne Buchen eingemischt. Die Altersangaben zu den Beständen sind für die Untersuchungsflächen L1, L2, L3 und L4 aus MLR Baden-Württemberg (2002a) entnommen. Die Angaben für die Fläche V1 entstammen dem Forsteinrichtungswerk. Angaben zur Verteilung der Arten der Baumschicht auf den Vegetationsaufnahmen finden sich in Tabelle 4.18, S. 83.

Fläche L1 ist durch 100- bis 140-jährige Kiefernaltbestände mit aus dem Unterstand eingewachsenen, im Durchschnitt 40- bis 60-jährigen Tannen und einem etwas geringeren Fichtenanteil (20–40-jährig) geprägt. Wo die Kiefer ausgehauen wurde, dominiert die Tanne und selten auch die Fichte, Buchen sind einzeln beigemischt.

Fläche L2 besteht aus einem 140-jährigem Kiefernaltholz mit in den Oberstand eingewachsenen 40-jährigen Fichten und Tannen. Die ungedüngten Vergleichbestände der Un-

tersuchungsfläche L2 (Aussage der Besitzer) sind zum großen Teil Privatwälder. Hierzu liegen keine Altersangaben vor, es handelt sich jedoch vom Eindruck her um vergleichbare, etwas stärker strukturierte Bestände. Diese Wahl musste unter praktischen Gesichtspunkten getroffen werden, da es keine ungedüngten Vergleichsbestände in Staatsbesitz in der Nähe gibt. Diese Privatwälder sind durch die Standortkartierung erfasst. Auch hier sind einzelne Buchen in den Beständen eingemischt. Für die Untersuchung wurden stark strukturierte Bereiche ausgelassen, um die Vergleichbarkeit mit den gedüngten Flächen zu erhöhen.

Die vom Bestand her sehr einheitliche Fläche L3 ist ebenfalls durch 80- bis 120-jährige Kiefernalthölzer mit hohem 80-jährigem Tannenanteil auf der gesamten Fläche geprägt. In einigen Beständen sind noch 40-jährige Fichten vertreten. Einzeln beigemischt sind Altbuchen und alte Weymouthkiefern (ohne Altersangabe).

Untersuchungsfläche L4 ist durch 120- bis 150-jährige Tannenalthölzer mit geringen Fichten- und Kiefernanteilen geprägt. Auch hier treten vereinzelt Buchen im Bestand auf.

Untersuchungsfläche V1 besteht aus 120- bis 150-jährigen Tannen und Fichtenalthölzern in wechselnden Anteilen mit geringen Kiefernanteilen. Buchen und stellenweise Douglasien sind einzeln beigemischt. Große Teile der umgebenden Bestände sind durch Buchenvorbauten geprägt.

3.1.6 Walddüngungen

Das Untersuchungsgebiet L1 im Distrikt Weckenhart besteht aus einer Vielzahl von Düngeversuchen mit Düngungen unterschiedlicher Dosierungen und Kombinationen von Düngemitteln. Dies sind die zum Teil in der Literatur (Hausser, 1973a) beschriebenen Düngeversuche (DV) DV 102, DV 103, DV 104 und ein daran angrenzender Versuch des damaligen Forstamtes Hirsau, das zur Zeit der Versuchsanlage die Flächen verwaltete. Alle nicht von Sturmwurf betroffenen Bereiche des Gebietes wurden untersucht. Tabelle 3.3 gibt eine Übersicht über die Düngemaßnahmen auf den Flächen (hier nur die tatsächlich untersuchten). Aufgeführt sind die ausgebrachten Dünger mit Handelsbezeichnungen, das Jahr, in dem die Düngemaßnahme stattfand und eine Bilanzierung der in den Düngern enthaltenen wirksamen Elemente nach Gussone (1964). Als Vergleich sind ungedüngte Parzellen (L1 U) vorhanden. Alle geeigneten Parzellen wurden durch einen Vorbezug ausgewählt. Die Grenzmarkierungen der Parzellen waren nicht mehr vorhanden, konnten aber anhand alter Pläne nachvollzogen werden. Die Grenzen wurden mit einem Vertex III (kombinierter Distanz- Neigungs- und Höhenmesser) und mit einem Kompass vermessen und mit Markierungsband abgegrenzt. Als Orientierungspunkte dienten Wegkreuzungen.

Bei den vier anderen Düngungen handelt es sich um Praxisdüngungen. Hier wurden mit Hilfe der Forsteinrichtungs- und Standortdaten (MLR Baden-Württemberg, 2002a,b) in der näheren Umgebung nach standörtlich und vom Waldbestand her vergleichbaren ungedüngten Flächen gesucht (s. o.). Da es sich bei allen Düngeflächen um Nadelholzbestände mit Tanne, Kiefer oder Fichte handelt, wurden entsprechende Nullflächen gewählt. Die entgeltliche Auswahl wurde nach einer Begehung getroffen, da viele Waldbestände in den Forstämtern oft auf großer Fläche mit Tanne verjüngt sind, was

Tabelle 3.3: Applizierte Düngermengen (Handelsbezeichnung und Elementbilanz), Düngjahr und Anzahl der Probeffächen für die Untersuchungsffäche L1. L1 U bezeichnet die ungedüngten Parzellen.

Parzelle	L1 U	L1 A	L1 B	L1 C	L1 D	L1 E	L1 F	L1 G	L1 H	L1 I	L1 J	L1 K
Aufnahmen (N)	35	30	5	10	5	20	5	5	10	5	10	5
Jahr der Düngung		1957	1957	1957	1957	1957	1957	1957	1957	1957	1957	1957
Düngemittel in t/ha												
Kohlensaurer Kalk				2,5		2,5	2,5	2,5*		2,5	2,5	2,5
Thomaspohst			1,0		2,0	1,0	1,0	1,0	3,0	1,0	2,0	3,0
Kalkammonsalpeter		0,5										
Kalksalpeter										1,3		
Harnstoff							0,4					
Ammoniak								1,0				
Elementbilanz** (t/ha)												
Ca		0,07	0,6	0,9	1,1	1,4	1,4	1,4	1,7	1,9	2	2,5
P			0,07		0,14	0,07	0,07	0,07	0,21	0,07	0,14	0,21
N		0,12					0,20	0,21		0,16		

*Kalkung erfolgte in diesem einen Fall 1967

** Berechnet nach Gussone (1964), gerundet

aus den Unterlagen so nicht zu ersehen ist. Eine Übersicht über Düngungen und eine Bilanzierung der gedüngten Elemente gibt Tabelle 3.4.

In der weiteren Arbeit werden die Untersuchungsflächen mit ihrem Kürzel und einem Zusatz, der Aufschluss über die Düngung gibt, bezeichnet. Die Zusätze U und D (D^+) stehen dabei für die ungedüngten (U) bzw. gedüngten (D, D^+) Varianten. Das Pluszeichen ($V1 D^+$) kennzeichnet hier einen Teil der gedüngten Fläche $V1 D$, der sehr wahrscheinlich später im Rahmen eines Vorbaus mit Nitrophoska gedüngt wurde (Walter et al., 1998). Die gedüngten Varianten der Untersuchungsfläche L1 sind durch die Buchstaben A–K gekennzeichnet. Mit der Schreibweise (L1) FGI und HJK wird deutlich gemacht, dass diese Düngeflächen für die Auswertungen zusammengefaßt wurden, da sich diese Flächen in der Bilanz der gedüngten Elemente sehr ähnlich sind.

3.2 Datenaufnahme im Gelände

3.2.1 Anzahl und Auswahl der Aufnahmen

Die nach einem Geländebezug ausgesuchten Flächen wurden aus den digitalen FoGIS-Einrichtungsdaten (MLR Baden-Württemberg, 2002a) in ein GIS-Projekt geladen (Arc View 3.2). Mit der Arc-View Erweiterung „random sampling tools“ (Minnesota Department of Natural Resources, 2002) wurden in jeden einzelnen Bestand der gedüngten und ungedüngten Flächen zufällig fünf Punkte mit einem Mindestabstand von 25 m zueinander und 30 m zum nächsten Forstweg gelegt. Auf den kleinflächigeren Düngeparzellen der Untersuchungsfläche L1 waren die Abstandskriterien oft nicht erfüllbar, hier wurde iterativ ein möglichst großer Abstand gewählt.

Die Anzahl der Aufnahmen (in Tab. 3.3 u. Tab. 3.4) richtete sich nach der Größe untersuchbarer Bestände des gedüngten Teils einer Untersuchungsfläche. Die im GIS ausgewählten Punkte wurden im Gelände durch Kompasspeilung und Entfernungsmessungen (Vertex III) aufgesucht und exakt markiert. Bei Störungen wie Wurzeltellern, Entwässerungsgräben, Verjüngungsgruppen, Fahrspuren oder im Bereich von einzeln stehenden Buchen und deutlich sichtbaren inhomogenen Stellen wurde die Aufnahmefläche verschoben, bis ungünstige Verhältnisse vorlagen.

3.2.2 Aufnahme der Vegetation

Die Vegetation wurde während der Vegetationsperiode der Jahre 2002 (L1) und 2003 auf den restlichen Flächen aufgenommen. Der Mittelpunkt einer 40 m^2 großen quadratischen Aufnahmefläche war dabei jeweils einer der jeweilig zuvor ermittelten Probepunkte. Die Größe der Aufnahmefläche von 40 m^2 ist durch die eingeschränkte Auswahlmöglichkeit auf kleinen Düngeparzellen bedingt und ermöglicht einen guten Bezug zwischen aufgenommener Vegetation und gemessenen Umweltfaktoren.

Es wurden die Arten der Mooschicht, Krautschicht, einer Strauchschicht (bis 3 m Höhe) und von drei Baumschichten mit geschätzten Deckungswerten nach Londo (aus Glavac, 1996, Werte in Tab. 3.5) in Horizontalprojektion ausgehend von der abgesteckten Fläche aufgenommen. Die Baumschichten wurden frei ausgeschieden. Dabei musste wenigstens eine halbe Kronenlänge unter der höheren Baumschicht eine weitere Baumschicht, zum Beispiel durch einwachsende Bäume, erkennbar sein.

3 Material und Methoden

Tabelle 3.4: Applizierte Düngermengen nach Handelsbezeichnung und Elementgehalten und das Jahr der Düngung für die Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1. Die gedüngten Flächen V1 werden unterteilt in V1 D, 1963 gedüngt ($n = 10$) und V1 D⁺ ($n = 10$).

Untersuchungsfläche	L2 D	L3 D	L4 D	V1 D (V1 D ⁺)
Aufnahmen (N)	50	80	20	10 + (10)
davon ungedüngt	25	40	10	20
Jahr der Düngung	1963	1966	1958	1963
Düngemittel in t/ha				
Kohlensaurer Kalk	2,5	3,9	6,0	3,0
Hyperphosphat	0,4	1,0	1,5	0,6
Hyperphoskali	0,4			
Kalksalpeter	0,3			
Nitrophoskali				0,12*
Elementbilanz t/ha **				
Ca	1,22	1,76	2,69	1,28
P	0,11	0,13	0,19	0,08
N	0,04			
K	0,03			

* Pflanzlochdüngung mit NPK 1985 auf Fläche V1 D⁺ vermutet (vgl. Walter et al., 1998)

** Berechnet nach Gussone (1964), gerundet

Die Bestimmung der Pflanzen- und Moosarten erfolgte nach Möglichkeit im Gelände, kritische Moosarten wurden mitgenommen und unter einem Binokular nachbestimmt. Die Benennung der Gefäßpflanzen erfolgte nach Schubert & Vent (1994), die Benennung und Bestimmung der Moose (außer Torfmoose) erfolgte nach Frahm & Frey (1992). Die Torfmoose wurden nach Dierßen (1996) bestimmt. Bei der auf den Untersuchungsflächen vorkommenden Brombeere, die hier als *Rubus fruticosus* agg. bezeichnet wird, handelt es sich um eine eher kriechende dunkeldrüsig Form, die zur Sammelart *Rubus hirtus* Waldstein und Kitaibel agg. gestellt werden kann (vgl. auch Walter, 1996). Diese dringt im Schwarzwald von allen Brombeerunterarten in die höchsten überhaupt von Brombeeren besiedelten Lagen vor und reicht von der submontanen bis in die subalpine Stufe (Weber, 1996).

Die Höhen der Baumschichten wurden weitestgehend geschätzt, bei Unsicherheiten wurden die Höhen durch Messungen (Vertex III) überprüft.

Hangneigung und Exposition der Flächen wurden mit einem Vertex III und Kompass bestimmt.

3.2.3 Bodenprobenentnahme

Es wurden Bodenproben aus 0–5 cm Tiefe des Mineralbodenhorizontes gewonnen. Hierzu wurde auf der Aufnahmefläche eine hinsichtlich Vegetation und Humusform als repräsentativ erachtete Stelle mit mindestens 1,5 m Abstand von störenden Einflüssen wie Stammfüßen oder Stubben gewählt. Bei einer Deckung über 50 % der Aufnahmefläche mit Torfmoosen (*Sphagnum*) wurde die Bodenprobe im *Sphagnum*-Polster genommen. Die Bodenentnahme erfolgte an einem Spatenprofil. Dem anstehenden Profil wurden seitlich an mehreren Stellen insgesamt ca. 300 g Boden als Mischprobe entnommen. Auf

Tabelle 3.5: Skala zur Deckungsschätzung der Vegetation nach Londo (aus Glavac, 1996).

Kürzel	Deckungsbereich %
.1	< 1
.2	≥ 1- 3
.4	≥ 3- 5
1	≥ 5- 15
2	≥ 15- 25
3	≥ 25- 35
4	≥ 35- 45
5	≥ 45- 55
6	≥ 55- 65
7	≥ 65- 75
8	≥ 75- 85
9	≥ 85- 95
10	≥ 95-100

der Untersuchungsfläche L3 mussten an einigen Stellen größere Steine mit einer Spitzhacke entfernt werden. Die Mineralbodenproben wurden dort zwischen den Steinen in 0–5 cm Tiefe des Mineralbodenhorizontes entnommen.

3.2.4 Humusformen und organische Auflagen

Die Humusformen wurden am Bodeneinschlag im Gelände angesprochen und an anderen Stellen der Aufnahmefläche überprüft. Die Nomenklatur und Beschreibung der Humusformen richtet sich nach Arbeitskreis Standortskartierung, Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (1996). Die Mächtigkeit der organischen Auflagen wurde getrennt nach F- und H-Lage (ohne L-Lage) gemessen. Bei kleinräumigen Unterschieden der Humusform auf der Aufnahmefläche wurde die flächenmäßig repräsentative Humusform gewählt.

3.2.5 Aufbereitung und Analyse der Bodenproben

Die in einem Trockenschrank (8 h bei 40 °C) getrockneten Bodenproben wurden nach Auflockerung zusammengeklumpter Bodenteilchen und Entfernung von Steinen und Holzstücken mit einem Metallsieb (2 mm Maschenweite, Firma Retsch) gesiebt. Ein Teil des gesiebten Bodens wurde mit einer Achat-Planeten-Kugelmühle bei 3 Minuten und 600 Umdrehungen zur Aufbereitung für spätere CN-Messungen gemahlen.

Der gesiebte Boden wurde im bodenkundlichen Labor der forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) in Freiburg mit Königswasser nach DIN EN ISO 13657 unter Rückfluss (5 ml konzentrierte Salpetersäure, 15 ml konzentrierte Salzsäure, 2 g Einwaage, auf 100 ml aufgefüllt) aufgeschlossen und Phosphor und die Elemente (Ca, K, Mg, Na, Fe, Al, Mn, S und Zn) spektralanalytisch (induktiv gekoppelte Plasmaspektrographie, ICP) nach DIN EN ISO 11885 analysiert (Trefz-Malcher, 2001).

Die pH-Werte des (getrockneten und gesiebten) Mineralbodens wurden im Labor des Waldbau-Instituts Freiburg in H₂O und 0,01 molarer CaCl₂-Lösung (10 g Einwaage auf 25 ml Lösung nach viermaligem kurzen Schütteln in einem halbstündigen Abstand) an einer Elektrode (Firma Schott) auf zwei Dezimalstellen genau gemessen.

3 Material und Methoden

Die Messung des Kohlenstoffs und Stickstoffs erfolgte an einem Leco Truspec CN mit mehreren Einwaagen (zwischen 100 und 350 mg) pro Probe des gesiebten und gemahlten Mineralbodens (3 Minuten bei 600 Umdrehungen/ Minute mit Retsch PM 200 mit Achat-Garnitur).

3.2.6 Lichtschätzung mit hemisphärischen Photographien

Licht als wichtiger ökologischer Einflussfaktor wurde für jede Aufnahme mit einer hemisphärischen Photographie ermittelt. Die Aufnahme erfolgte einen Meter über dem Boden auf einem Stativ in der Mitte der Aufnahmefläche. Bei Abständen von weniger als einem Meter zu Baumstämmen oder unterständigen Bäumen wurde der Abstand auf einen Meter vergrößert. Die Aufnahme erfolgte mit einer „Nikon Coolpix 990“ Digitalkamera mit einem „Nikon FC-E8“ Fisheye Objektiv. Als Aufnahmeoption wurde an der Kamera die Funktion „Fisheye1“ (Schwarzweiß mit rundem Rand) bei einer Auflösung von 2048 x 1536 Pixeln (Format jpg, Auflösung 300 dpi) gewählt. Der Kameraboden wurde nach Norden ausgerichtet und die Kamera nivelliert. Die Aufnahme erfolgte bei gleichmäßig bedecktem Himmel Mitte September 2002 für die Fläche L1, Mitte September 2003 für die Flächen L2, L3, L4 und Mitte Juni 2004 auf Fläche V1.

Die Bilder wurden nach Brunner (1998) mit Adobe Photoshop 7.0 von Grauwerten in Schwarz-Weiß-Werte konvertiert, wobei Schwarz den Horizont bedeckende Gegenstände und Weiß den unbedeckten Himmel repräsentieren.

Mit dem Programm „Hemimage“ (Brunner, 1998) wurde für jede Aufnahme der prozentuale Anteil der ankommenden Strahlung (Percent Above Canopy Light, kurz: PACL) in der Vegetationsperiode als diffuse, direkte und gesamte Strahlung (hier der Mittelwert aus diffuser und direkter Strahlung) zum Waldboden (1 m Höhe) berechnet. Beginn und Ende der Vegetationsperiode und die geographische Breite wurden aus Fiedler (1995) und topographischen Karten abgelesen.

3.3 Datenauswertung

3.3.1 Dateneingabe

Die Dateneingabe erfolgte in einer relationalen Datenbank (Microsoft Access). Hier wurden alle für die Aufnahme relevanten Daten (Düngung) und die im Gelände und Labor erhobenen Daten (Vegetation, Bodenwerte, Lichtmessung) für eine einzelne Aufnahme aufgenommen. Durch die Kennzeichnung jeder Aufnahme mit Gauss-Krüger-Koordinaten ist ein geographischer Bezug gegeben. So ist es möglich, in einem Geographisches Informationssystem (GIS) weitere Daten mit den Aufnahmeflächen zu verknüpfen.

3.3.2 Verwendete Computerprogramme

Die Zusammenstellung der Daten für die statistische Auswertung und die Erstellung einiger Abbildungen erfolgte mit Microsoft Excel 2000. Die PACL wurde mit Hemimage (Brunner, 1998) berechnet. Die statistischen Auswertungen anhand von Mittelwertvergleichen mit statistischen Tests, Korrelationen und Regressionen wurden mit Statistica 6.0 (Statsoft, 1984-2001) vorgenommen. Die Gradientenanalyse erfolgte mit Canoco 4.5 (ter Braak & Smilauer, 2002). Die Erstellung von Karten und Berechnungen von

Flächengrößen erfolgte mit Arc View 2.3 (Environmental Science Research Institute, 1992-1999).

3.3.3 Statistische Analyse der Umweltfaktoren, besonders des Bodens

Datengrundlage für die statistische Analyse der Bodenverhältnisse auf den Untersuchungsflächen sind die gemessenen bodenchemischen Werte im Mineralboden, die Humusformen und die Mächtigkeit der organischen Auflagen. Weitere den Boden- und Humuszustand beeinflussende Faktoren können Lichtgenuss und die Baumart als Deckungssumme in den Baumschichten durch ihre Streu sein. Tabelle 3.6 gibt einen Überblick über die gemessenen Parameter und deren Skalenniveau.

3.3.3.1 Überprüfung der Umweltvariablen auf Ausreißer

„Extrem hohe oder niedrige Werte innerhalb einer Reihe üblicher mäßig unterschiedlicher Meßwerte, von denen fraglich ist, ob sie unter den vorgegebenen Bedingungen möglich sind“ (Sachs, 1997), bezeichnet man als Ausreißer. Einerseits können wenige Ausreißer die Ergebnisse von statistischen Berechnungen stark beeinflussen und so zu falschen Schlussfolgerungen führen, andererseits gehören sie (wenn Meßfehler oder Störungen ausgeschlossen werden können) zum Datensatz dazu. Sachs (1997) empfiehlt statistische Analysen mit und ohne Ausreißer zu rechnen und bei abweichenden Ergebnissen eine entsprechend umsichtige Interpretation. Auf jeden Fall sollten sie nicht verschwiegen werden.

Die vorliegenden Daten wurden nach Sachs (1997, S.364) auf Ausreißer überprüft. Dabei liegen Ausreißer im Bereich außerhalb der vierfachen Standardabweichung um den Mittelwert ($\bar{x} \pm 4s$), die jeweils ohne den ausreißerverdächtigen Wert durch iteratives Vorgehen mit dem Programm Microsoft Excel 2000 für den Gesamtdatensatz ermittelt wurden (Tab. 3.7).

Die Kalziumgehalte im Boden zeigen mit Abstand die stärkste Neigung zu Extremwerten im Vergleich zu den anderen Variablen. Dies gilt sowohl für die Anzahl (23 Ausreißer) als auch zumindestens z. T. für die Ausprägung (vier Ausreißer liegen z. B. über dem fünffachen von $\bar{x} \pm 4s$) und dem 14-fachen des Mittelwertes). Dagegen verhalten sich die anderen Variablen mit nur wenigen Ausreißern, die zudem knapp oberhalb dieser Grenze

Tabelle 3.6: Übersicht über die aufgenommenen und gemessenen Bodenvariablen und deren Skalenniveau.

Bodenkennwert	Skalenniveau
Humusaufgaben	
Humusform	ordinalskaliert
Mächtigkeit	intervallskaliert
Mineralboden 0-5 cm	
C und N	intervallskaliert
pH in CaCl ₂ und H ₂ O	intervallskaliert
chemischer Aufschluß (Elemente)	intervallskaliert

3 Material und Methoden

Tabelle 3.7: Umweltvariablen, die Extremwerte ober- oder unterhalb von $\bar{x} \pm 4s$ aufweisen und die Anzahl der Extremwerte (Gesamtdatensatz $n = 335$).

Variable	Ca	K	P	C/N	C/P	N/P	Of	pH H ₂ O*	Licht
Anzahl (n)	23	1	4	1	3	1	2	2	2

*delogarithmierte Werte.

liegen, moderat. Weiterhin wurden je zwei Ausreißer bei der Lichtmessung (PACL) und im delogarithmiertem pH in H₂O (logarithmiert als Ausreißer nach unten) festgestellt.

Nach Entfernung aller Datensätze mit mindestens einem Ausreißer verbleiben 300 von 335 Datensätzen.

3.3.3.2 Vergleiche von Düngungen hinsichtlich Bodenvariablen

Für die folgenden Bodenvariablen (vgl. Abschnitte 3.2.5 und 3.2.4) wurden arithmetische Mittelwerte für die einzelnen Düngevarianten (vgl. Tab. 3.3 und Tab. 3.4) berechnet und die Unterschiede anschließend statistisch überprüft:

- Die im Druckaufschluss gemessenen Kationen Kalzium, Magnesium und Kalium sowie Phosphor (Mineralboden 0–5 cm).
- Kohlenstoff und Stickstoff (Mineralboden 0–5 cm).
- Die daraus abgeleiteten Stoffverhältnisse C/N, C/P und N/P.
- pH-Werte in 0,01 molarer CaCl₂-Lösung und H₂O (Mineralboden 0–5 cm).
- Die Mächtigkeiten der organischen Auflagen Oh und Of.

Die Parzellen „F, G und I“ und „H, J und K“ der Untersuchungsfläche L1 wurden dabei für die Mittelwertbildung aufgrund ähnlicher Düngemittelmengen und -zusammensetzungen als L1 FGI (gedüngt mit N, P und Ca) und L1 HJK (gedüngt mit P und Ca) zusammengefasst (vgl. Tab.3.3, S. 30).

Die Berechnung der mittleren Kalziumgehalte im Mineralboden wurde jeweils mit und ohne Ausreißer (vgl. Abschnitt 3.3.3.1) vorgenommen, bei den anderen Variablen wurde trotz einiger weniger Ausreißer der komplette Datensatz verwendet. Diese liegen hier nur sehr knapp über der Grenze zum Ausreißerbereich, während die Ausreißer der Kalziumgehalte sehr deutlich sind.

Die Berechnung der arithmetischen Mittelwerte und die statistischen Vergleiche der pH-Werte (CaCl₂, H₂O) der Düngeflächen erfolgten mit vorzeichenvertauschten delogarithmierten Werten (Konzentration von H⁺-Ionen in der Bodenlösung). Zur Darstellung des Mittelwerts wurden die Werte wieder logarithmiert. Als Vergleichswert ist hier zusätzlich der Median der pH-Werte sowie zur Darstellung der Streuung sind das obere und untere Quartil angegeben.

Die Stoffverhältnisse C/N, C/P und N/P gingen als Quotienten in sämtliche Berechnungs- und Testverfahren ein. Die Ergebnisse und statistischen Aussagen gelten damit

für das jeweilige Stichprobenmittel der Stoffquotienten und nicht für den Quotienten der zuvor gemittelten Zähler und Nenner.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der restlichen Variablen sind untransformiert in den Einheiten g/kg (C, N, P, Ca, Mg, K) und cm (Oh- und Of-Lage) dargestellt.

Jede Variable wurde mit der Hypothese, dass die gedüngten und ungedüngten Stichproben der gleichen Grundgesamtheit entstammen, überprüft. Die Stichproben der Untersuchungsflächen L1 und V1 mit mehreren Düngevarianten wurden mit dem nichtparametrischen *H*-Test (Kruskal-Wallis-Test) überprüft (Sachs, 1997, S. 393). Bei einer Wahrscheinlichkeit unter 5% ($p \leq 0,05$) wurde die Nullhypothese als signifikant und gegebenenfalls unter 1% ($p \leq 0,05$) als hochsignifikant zurückgewiesen. Bei signifikanten Unterschieden des *H*-Tests wurden anschließend Einzelvergleiche mit dem ebenfalls nichtparametrischen Mann-Whitney-*U*-Test (weiterhin MWU-Test) zum Vergleich zweier unabhängiger Stichproben durchgeführt. Dieser Test wurde auch jeweils zum Vergleich der gedüngten und ungedüngten Paare der Untersuchungsflächen L2, L3 und L4 angewendet.

Es wurde zunächst angestrebt die schärfer trennenden parametrischen Gegenstücke Varianzanalyse (mit Scheffé-Test) und *t*-Test zu verwenden, doch sind die Voraussetzungen der Varianzhomogenität und Normalverteilung nicht in allen Stichproben erfüllt. Die beiden hier verwendeten Testverfahren zeigen jedoch beide eine hohe Trennschärfe (Power) von 95% gegenüber den beiden parametrischen Alternativen (Sachs, 1997) und ermöglichen so eine nicht mit Zweifeln behaftete und eindeutige Interpretation der Testergebnisse. Es sei angemerkt, dass in diesem Fall die parametrischen Tests trotz einiger Parameterverletzungen nicht zu anderen Ergebnissen geführt hätten.

3.3.3.3 Zusammenhänge zwischen den Variablen im Mineralboden

Zur Veranschaulichung gegenseitiger Abhängigkeiten der Variablen, die im Mineralboden (0–5 cm) gemessen wurden, wurde eine Korrelationsmatrix der Variablen pH (CaCl₂, H₂O), Ca, Mg, K, C, N, P, C/N, C/P und N/P über den Gesamtdatensatz ohne Ausreißer ($n = 300$, vgl. Abschnitt 3.3.3.1) erstellt, da schon ein Extremwert den Zusammenhang stark verändern kann (Bortz, 1999). Da die Voraussetzungen für Korrelationen nach Pearson mit den vorliegenden Daten zum Teil verletzt sind, wurden Rangkorrelationen nach Spearman berechnet. Da mit Rängen gerechnet wird, ist dieses Verfahren unempfindlich gegenüber Ausreißern und eine strikte Linearität der Zusammenhänge ist nicht erforderlich (Bortz, 1999; Sachs, 1997, S. 233).

3.3.3.4 Beschreibung der Auflagemächtigkeiten durch multiple Regression

Mit einer multiplen linearen Regression kann die Bedeutung und die Interaktion mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable als erklärender Ansatz bestimmt werden. Dabei wird iterativ nach der bestmöglichen Erklärung des Regressionsmodells mit den am meisten erklärenden Variablen gesucht (Backhaus et al., 2000; Bortz, 1999).

Hier soll die Frage nach der Bedeutung und dem Einfluss einzelner Umweltvariablen auf die Mächtigkeit der organischen Auflagen, ausgedrückt durch die Summe der Oh- und der Of-Lage, geklärt werden.

3 Material und Methoden

Die Erstellung des Regressionsansatzes erfolgt nach sachlich in Frage kommenden Kriterien. Als unabhängige Variablen für eine multiple Regression kommen deshalb zunächst einmal alle nach sachlichen Kriterien möglichen Umweltvariablen in Betracht, die mindestens intervallskaliert sein müssen (vgl. Tab. 3.8). Einfache Korrelationen (Spearman) zwischen der unabhängigen Variable (Auflagenmächtigkeit) und den Umweltvariablen (ausreißerfreier Datensatz) werden als wichtige Interpretationshilfe in Tabelle 4.8 (S. 62) im Ergebnisteil dargestellt.

Die Regression wurde aus dem ausreißerbereinigten Datensatz $n = 300$ nach Entfernung einer Zufallsstichprobe von $n = 40$ Datensätzen zur Validierung des Regressionsmodells berechnet. Die multiple lineare Regression erfordert die in Tabelle 3.9 dargestellten Prämissen (nach Backhaus et al., 2000, S. 34-43), die für die $n = 260$ Datensätze zur Modellerstellung überprüft wurden. Gegenüber kleineren Verletzungen der Voraussetzungen ist diese Methode aber recht unempfindlich (Backhaus et al., 2000; Bortz, 1999).

Der Algorithmus des schrittweisen Aus- oder Einschlusses hat nicht unbedingt zu sachlich zufriedenstellenden Ergebnissen, bzw. beim schrittweisen Einschluss („Forward“) nicht für alle Variablen zu signifikanten β -Werten geführt. Das im Ergebnisteil vorgestellte Regressionsmodell ist auf Basis der im „Forward“-Verfahren (vgl. hierzu Backhaus et al., 2000, S. 61) signifikant getesteten Variablen (β -Werte) durch weiteren iterativen Einschluss von Variablen im Hinblick auf Signifikanz der neuen Variablen und auf Erhöhung des Regressionskoeffizienten entstanden.

3.3.3.5 Häufigkeit der Humusformen

Für jede Düngevariante aller Untersuchungsflächen wurde die Häufigkeit der beobachteten Humusformen zusammengestellt. Auf eine statistische Überprüfung der Häufigkeit der Humusformen auf den unterschiedlichen Düngevarianten wurde verzichtet, die Ergebnisse sind deskriptiv gegenübergestellt.

3.3.3.6 Humusformen als Ausdruck bodenchemischer Kennwerte des Oberbodens

Hier wird geprüft, ob sich die kartierten Humusformen hinsichtlich der in Abschnitt 3.3.3.2 vorgestellten bodenchemischen Variablen unterscheiden. Hierzu wurden die Mit-

Tabelle 3.8: Umweltfaktoren als Variablen für Regressions- und Ordinationsverfahren.

Umweltfaktoren
Im Druckaufschluss gemessene Kationen (Kalzium, Magnesium und Kalium) sowie Phosphor (Mineralboden 0-5 cm)
Kohlenstoff und Stickstoff (Mineralboden 0-5 cm)
Stoffverhältnisse von C/N, C/P und N/P
Delogarithmierte und logarithmierte pH-Werte in 0,01 molarer CaCl ₂ -Lösung und in H ₂ O (Mineralboden 0-5 cm)
Lichtanteile (PACL)
Die Nadelstreu der Hauptbaumarten Fichte, Tanne und Kiefer, jeweils ausgedrückt als Summe der Baumartenanteile in den drei Baumschichten (Abschnitt 3.2.2)

Tabelle 3.9: Voraussetzungen und Überprüfung multipler linearer Regressionsmodelle.

Voraussetzung und Prüfung
Linearität der Zusammenhänge Graphische Überprüfung durch Auftragen der Wertepaare.
Multivariate Normalverteilung der beteiligten Variablen Diese Voraussetzung ist bei einer Stichprobe von $n > 40$ und $k < 10$ eingehenden Variablen zu vernachlässigen; zudem gibt es keine ausgereiften Testverfahren (Angaben bei Bortz, 1999, S. 435). Da multivariate Normalverteilung univariate Normalverteilung voraussetzt, wurden die in Rechnung eingehenden Variablen daraufhin geprüft und die Hypothese der Normalverteilung mit $p > 0,05$, Kolmogoroff-Smirnoff-Test nicht verworfen. Die Variablen Oh+Of, C, N, P, Ca, Licht (PACL) und die Baumartenanteile sind untransformiert nicht normalverteilt. Die Baumartenanteile zeigen hier im Gegensatz zu den anderen nicht normalverteilten Variablen auch grafisch eine schlechte Anpassung an die Normalverteilung, die weder durch \log_{10} - noch durch Quadratwurzeltransformation erreicht wurde. Eine \log -Transformation der Variablen C, N, P, Ca und Licht (PACL) sowie eine Quadratwurzeltransformation bei Oh+Of-Lage führen jeweils zu signifikanten Normalverteilungen.
Vollständigkeit des Modells Im Regressionsmodell sollten möglichst alle erklärenden Variablen enthalten sein, deren Fehlen zu einem unvollständigen Modell (underfitting) führt. Bei vielen eingehenden Variablen – vor allem bei sachlich nicht erklärbaren – wird das Modell ineffizient (overfitting). Diesen Gefahren lässt sich durch iteratives Vorgehen mit z. B. automatisierten schrittweisen Ein- und Ausschluss von Variablen („stepwise selection“) und sachlicher Interpretation der Ergebnisse begegnen. Wobei auch diese Verfahren nicht automatisch das optimale Regressionsmodell liefern müssen (Beispiel bei Bortz, 1999, S. 447). Schrittweise Prüfung aller möglichen Kombinationen würde zur besten Lösung führen.
Homoskedastizität der Streuung in den Residuen Graphische Überprüfung durch Auftragen der Wertepaare (Backhaus et al., 2000; Bortz, 1999). Die Residuen sind in der Grundgesamtheit unkorreliert (keine Autokorrelation) Prüfung mit dem Durbin-Watson-Test (Statistica 6.0). Keine starke lineare Abhängigkeit zwischen den unabhängigen Variablen (Multikollinearität) Vermeidung hoch untereinander korrelierter Variablen im Regressionsmodell (Backhaus et al., 2000).
Prüfung des Regressionsmodells Globale Prüfung der β -Werte innerhalb des Regressionsmodells mit F -Statistik; die jeder einzelnen Regressorvariable mit einem t -Test. Validierung des Regressionsmodells Validierung an einer zuvor entnommenen Zufallsstichprobe ($n = 40$) und zusätzlich am Ausreißerdatensatz durch Vergleich der beobachteten und im Modell berechneten Mittelwerte und Korrelation der Prognosewerte mit den beobachteten Werten.

telwerte dieser Variablen miteinander verglichen. Die globale Prüfung erfolgte mit Kruskal-Wallis'- H -Test, die Einzelvergleiche mit MWU-Tests.

3.3.4 Statistische Analyse der Vegetation

3.3.4.1 Vergleich der Flächen hinsichtlich Moos- und Pflanzenartenausstattung

Für jede gedüngte Fläche wurde die Häufigkeit des Auftretens einzelner Arten der Kraut- und Mooschicht im jeweiligen Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche mit Vierfeldertafeln (χ^2 -Test) auf Signifikanz überprüft. Für die Düngevarianten der Untersuchungsfläche L1 wurde dabei jeweils nur der Vergleich zur ungedüngten Fläche gezogen. Die

3 Material und Methoden

Testergebnisse sollen hier mehr der Orientierung und als Stütze der deskriptiven Interpretation von unterschiedlichen Häufigkeiten dienen, denn besonders bei geringen Stichprobenumfängen ist die Power des χ^2 -Testes gering (Sachs, 1997, S. 454, 465).

Alle Arten werden nach den Ergebnissen dieser Tests und aufgrund ihrer Häufigkeitsunterschiede in der Synopse aller Flächen in verschiedene Gruppen eingeteilt. Entscheidend für die Einteilung ist, ob eine Fläche gedüngt wurde oder nicht.

Die Düngevarianten B, C und D der Untersuchungsfläche L1 sind aus statistischen und sachlichen Gründen von der Gruppenbildung ausgenommen, aber dargestellt. L1 B und L1 D aufgrund der geringen Wiederholungsumfänge ($n = 5$), bei denen ein Testergebnis wenig Aussagekraft hat und L1 C ist trotz einer Düngung gegenüber ungedüngten Flächen durch Nährstoffarmut und niedrige pH-Werte im mineralischen Oberboden gekennzeichnet, was zu einer Fehlinterpretation führen kann. Die Einteilung wird hier mit Abkürzungssymbolen vorgestellt:

- Durch Düngung geförderte Arten:
 - Ds++: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche ausschließlich häufiger werden, dabei auf vielen Flächen signifikant häufiger.
 - Ds+: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche signifikant häufiger werden, jedoch in Einzelfällen leicht, aber niemals signifikant abnehmen.
 - D+: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche durchweg häufiger, aber nicht signifikant häufiger vorkommen.

- Durch Düngung abnehmende Arten:
 - Ds- -: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche ausschließlich seltener werden, dabei auf vielen Flächen signifikant seltener.
 - Ds-: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche signifikant abnehmen, jedoch in Einzelfällen leicht aber niemals signifikant zunehmen.
 - D-: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche durchweg seltener, aber nicht zwingend signifikant seltener vorkommen.

- I: Bezüglich Düngung indifferente Arten. Diese passen in keine der oben genannten Kategorien, können aber insgesamt und auf Teilflächen durchaus einen Schwerpunkt auf gedüngten oder ungedüngten Flächen haben.

Für diese Einteilung der Arten der Moos- und Krautschicht in Gruppen wurden jeweils Medianwerte und arithmetische Mittel für Reaktionszahl (R) und Stickstoffzahl (N) aus den Zeigerwerten nach Ellenberg et al. (1992) gebildet. Dies dient einer groben Einschätzung der mittleren Nährstoffansprüche dieser Artengruppen. Die Bildung von arithmetischen Mitteln mit ordinal skalierten Daten ist kritisch zu sehen, aber bei Zeigerwerten nach Ellenberg et al. (1992) durchaus üblich. Um Fehleinschätzungen zu vermeiden, wurden hier sowohl arithmetisches Mittel als auch Mediane verwendet. Eine statistische Prüfung wurde nicht vorgenommen, da die Gruppengröße stark schwankt und auch nicht für alle Arten Zeigerwerte vorhanden sind (vgl. Ellenberg et al., 1992). Zeigerwerte für die hinsichtlich Reaktionszahl und Stickstoffzahl eurypöken Baumarten (*Abies alba*, *Betula pendula*, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris* und *Quercus spec.*) wurden nicht verwendet.

3.3.4.2 Vergleich der Flächen auf Deckungsunterschiede ausgewählter Arten

Um Deckungsunterschiede einzelner Arten zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen vergleichen zu können, sind nach Ansicht des Verfassers zwei Aspekte von Bedeutung. So muss die Art mit einem gewissen Mindestmaß an Stetigkeit sowohl auf gedüngten, als auch auf ungedüngten Flächen vorkommen und die Deckungswerte müssen dabei eine gewisse Streuung aufweisen. Sonst ist die Reaktion auf Düngung oder die eine Düngefläche charakterisierenden Umweltfaktoren nicht mit einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn gegenüber Präsenz-Absenz-Vergleichen verbunden. Interessant für einen derartigen Vergleich sind daher besonders Arten mittlerer bis hoher Stetigkeit, deren Deckung stark variiert. Dies sind Arten, deren Verhalten sich gut in der Redundanzanalyse durch Umweltvariablen beschreiben lässt. Dieser Auswertungsschritt wird in Abschnitt 3.3.4.4 (S. 43) erläutert.

3.3.4.3 Direkte Ordination der Vegetation

Ziel von Ordinationsverfahren ist die Verdeutlichung von Beziehungen zwischen Pflanzenarten und möglichen Gradienten von Umweltfaktoren (Glavac, 1996). Während bei einer indirekten Ordination die Ähnlichkeitsstruktur des floristischen Raumes mit den Arten allein beschrieben wird, so wird in einer direkten Ordination das Auftreten einzelner Arten auf gemessene Umweltfaktoren bezogen.

Dabei tragen einzeln und damit möglicherweise zufällig auftretende Arten in einem Ordinationsverfahren wenig zur Erklärung des Modells bei. Daher wurden alle Arten, die im Gesamtdatensatz seltener als viermal vorkommen für die Berechnung der Ordination entfernt. Damit bleiben 67 Arten der Moos- und Krautschicht, die ins Ordinationsverfahren eingehen.

Sowohl skalare als auch vektorielle Transformationen der Deckungswerte von Arten können teilweise zu erheblichen Abweichungen der Ergebnisse einer Ordination führen (Glavac, 1996, S. 138). Eine Skalartransformation z. B. in Form einer Logarithmierung setzt den Einfluss dominanter Pflanzenarten herunter. Die Wirkung einer Standardisierung der Deckungswerte auf die Ergebnisse einer Ordination ist schwer vorherzusagen (Glavac, 1996, S. 138). Um den Einfluss dominanter Arten zu reduzieren, empfiehlt Glavac (1996) eine skalare Transformation der Einzelwerte vorzunehmen. Im vorliegenden Datensatz wurde mit logarithmierten Deckungswerten gearbeitet ($Y' = \log_{10}(A \cdot Y + B)$, $A = 1$, $B = 1$), um Arten hoher Stetigkeit mit regelmäßig hohen und niedrigen Deckungswerten vergleichbarer zu machen und um Arten mit hoher Dominanz, die die Vegetation in dieser Untersuchung bestimmen, etwas höher zu gewichten.

Eine Standardisierung der Werte der Ähnlichkeitmatrix der Arten führt in linearen Ordinationsmodellen (PCA, RDA) zu einer Matrix der Korrelationskoeffizienten statt zu einer Kovarianzmatrix. Dies führt zu einer Minderung der Dominanz einzelner Arten mit hoher Varianz in der Darstellung als Ordinationsdiagramm (ter Braak & Smilauer, 2002, S. 91). Die Länge der Artvektoren ist dabei der Maßstab für die Güte der Anpassung (R). Diese Option wurde für die Auswertung benutzt.

Welches Ordinationsverfahren schließlich gewählt wird, hängt auch von der Länge der Gradienten ab. So können die Deckungen der Arten entlang der Gradienten überwiegend linear oder unimodal auftreten. Dies kann mit einer DCA (Detrended Correspondence

3 Material und Methoden

Analysis) bestimmt werden (Leps & Smilauer, 2003; ter Braak & Smilauer, 2002). Dabei bedeutet eine Gradientenlänge von vier Standardabweichungen einen kompletten Artenwechsel entlang des Gradienten.

Die Länge des Gradienten beträgt im eigenen Datensatz für die erste Ordinationsachse 3,56 Standardabweichungen nach Berechnung einer DCA mit CANOCO 4.5 (mit 67 Arten, Deckungen $Y' = \log_{10}(A \cdot Y + B)$, $A = 1$, $B = 1$)-transformiert). Damit ist sowohl ein lineares (Redundanzanalyse, RDA) als auch ein unimodales (Kanonische Korrespondenzanalyse, CCA) Modell für die Auswertung des Datensatzes als direkte Ordination möglich (Leps & Smilauer, 2003; ter Braak & Smilauer, 2002), wobei das Modell mit höherem Erklärungsvermögen zu bevorzugen ist (Leps & Smilauer, 2003).

Im direkten Vergleich führt das lineare Ordinationsmodell (RDA) für den vorliegenden Datensatz mit 17,4 % Erklärungsanteil der Varianz der Arten auf den ersten vier Achsen (92,7 % davon erklären die Arten-Umwelt-Beziehung) zur besseren Erklärung als eine kanonische Korrespondenzanalyse (CCA) mit 9,0 % Erklärungsanteil der Varianz auf den ersten vier Achsen (78 % davon erklären die Arten-Umwelt-Beziehung, vgl. auch Abb. 3.2).

Da ein Teil der Umweltvariablen, insbesondere der Kalziumgehalt im Mineralboden, stark durch Ausreißer gekennzeichnet ist, wurde der Datensatz einmal ohne entsprechende Ausreißer mit $n = 300$ in den Umweltvariablen analysiert (vgl. Abschnitt 3.3.3.1, S. 35 zur Ausreißerproblematik und Abschnitt 3.3.4.3, S. 42 zur Methode). In beiden Fällen gehen die gleichen Umweltvariablen in das Modell ein. Auch der Erklärungsanteil der Varianz der Arten auf den ersten vier Achsen ist mit jeweils 17,4 % identisch. Nur der Erklärungsanteil der Arten-Umwelt-Beziehung der ersten vier Achsen ohne Ausreißerdatensätze berechnet ist mit 94,3 % geringfügig höher als mit allen Datensätzen (92,7 %) berechnet. Aufgrund dieses sehr geringen Unterschiedes wurde der komplette Datensatz zur Analyse herangezogen. Auf dieser Analyse beruhen sämtliche Ergebnisse von Ordinationsverfahren in dieser Arbeit.

Die Einfluss nehmenden Umweltfaktoren für das Ordinationsmodell wurden folgendermaßen ausgewählt und überprüft: Als Umweltfaktoren, die in der direkten Ordination einen Beitrag zur Erklärung der Vegetation leisten können, kommen zunächst alle in Ta-

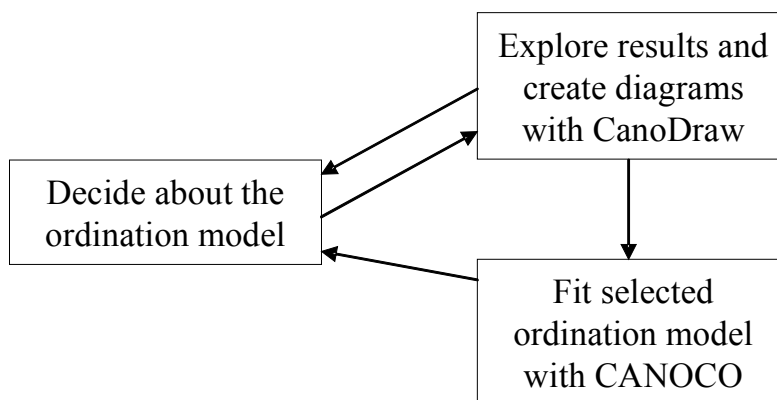


Abbildung 3.2: Ablauf der Analyse mit CANOCO (nach Leps & Smilauer, 2003, S. 49).

belle 3.8 bereits vorgestellten Variablen in Betracht. Welche Variablen einen signifikanten Einfluss auf die Vegetation haben, wird in einer RDA (auch reduced rank regression) mit voraussetzungs-freien Monte Carlo Permutationstests für jede Variable überprüft.

Dieser Test wurde benutzt, um jede Umweltvariable in einem schrittweisen Einschlussverfahren hinsichtlich eines signifikanten Erklärungsbeitrages zur Varianz der Deckungen der Arten zu prüfen. Dabei wurde zunächst die am besten erklärende Variable eingeschlossen und getestet; danach die nächstbesterklärende. Um der Gefahr einer Multikollinearität zu begegnen, wurden auch keine höher als $R = 0,8$ nach Spearman mit bereits eingeschlossenen Variablen korrelierende Variablen mehr aufgenommen. Diese Prozedur wurde so lange fortgesetzt, bis keine Variable mehr signifikant in das Ordinationsmodell eingeschlossen werden konnte. Diese Analyse wurde mit dem Programmpaket CANOCO 4.5 mit der Option „permutations under reduced model“ und 9999 Permutationen vorgenommen, da mit diesen Programmeinstellungen exakte Korrelationen mit der höchstmöglichen Genauigkeit berechnet werden (ter Braak & Smilauer, 2002, S. 100).

3.3.4.4 Reaktion einzelner Arten auf Umweltfaktoren

Bei der direkten Gradientenanalyse mit einer RDA zeigen die Arten eine unterschiedliche Reaktion auf die schrittweise eingeschlossenen Umweltvariablen. Interessant sind besonders Arten mittlerer bis hoher Stetigkeit, deren Deckung stark variiert und sich gut durch die ausgewählten Umweltvariablen erklären lässt.

Diese Ergebnisse werden bei der Analyse mit CANOCO 4.5 in einer gesonderten Ausgabedatei („solution file“) gespeichert (ter Braak & Smilauer, 2002). Daraus lassen sich anhand der Koordinaten, der „species scores“ jeder Art für die ersten beiden Achsen, Arten mit einem möglichst großen Abstand vom Ursprung des Koordinatenkreuzes ermitteln. Die Entfernung des Symbols für jede Art vom Ursprung des Koordinatenkreuzes ist die Stärke der Anpassung als Korrelation mit dem Ordinationsdiagramm (ter Braak & Smilauer, 2002, S. 91).

Neben den Ergebnissen aus dem Ordinationsdiagramm wurde hier noch eine einfache Korrelationsanalyse aller Arten mit mehr als 50 % Stetigkeit im Datensatz vorgenommen. Das Problem dabei ist, dass die Deckungen der Arten nicht stetig aufgenommen wurden, sondern durch die Deckungsskala eine feste Anzahl von Skalenniveaus vorgegeben ist. Dadurch ergibt sich für jeden Skalenwert eine hohe Zahl an Bindungen. Für diesen Fall sind Berechnungsarten wie die Rangkorrelation nach Spearman oder Kendalls Tau nicht zu empfehlen, sondern der Gamma-Koeffizient nach Goodman-Kruskal, der Bindungen explizit berücksichtigt (Statsoft, 1984-2001; Sachs, 1997). Beim Gamma-Koeffizienten „handelt es sich um die Differenz zwischen der Wahrscheinlichkeit, dass die Rangordnung für beide Variablen übereinstimmt und der Wahrscheinlichkeit, dass sie nicht übereinstimmt, dividiert durch 1 minus die Wahrscheinlichkeit von Bindungen“ (Statsoft, 1984-2001). Die metrisch skalierten Variablen werden dafür in Ränge transformiert. Damit misst der Gamma-Koeffizient den gemeinsamen Vorhersagefehler zweier Variablen.

3.3.4.5 Unterschiede der Artenzahlen in der Moos- und Krautschicht durch Düngung

Für jede Vegetationsaufnahme wurde die Artenzahl getrennt nach Arten der Moos- und Krautschicht ermittelt und jeweils für die Düngeflächen gemittelt.

Die Unterschiede zwischen gedüngten und nicht gedüngten Flächen wurden für die Artenzahl der Mooschicht, die der Krautschicht und für die Summe beider Schichten statistisch überprüft. Die Artenzahlen der Düngevarianten der Untersuchungsflächen L1 (ohne die Varianten L1 B und L1 D wegen zu geringer Fallzahl von $n = 5$) und V1 wurden mit Kruskal-Wallis' H -Test global auf Unterschiede getestet, bei signifikanten Unterschieden der Artenzahl erfolgten die Einzelvergleiche mit MWU-Tests. Die Artenzahlen der Untersuchungsflächen L2, L3 und L4 wurden jeweils paarweise gedüngt gegen ungedüngt mit MWU-Tests überprüft. Bei einer Wahrscheinlichkeit unter 5 % ($p \leq 0,05$) wurde die Nullhypothese als signifikant und unter 1 % ($p \leq 0,05$) als hochsignifikant zurückgewiesen.

Um eine weiterführende beschreibende Interpretation hinsichtlich Veränderungen des Artenreichtums durch Düngungen zu ermöglichen, wurden die Arten der Krautschicht weiter nach Lebensformen (nach Ellenberg et al., 1992) und nach ihrer Bindung an Waldstandorte des Berg- und Hügellandes in Deutschland (nach Schmidt et al., 2003) für die einzelnen Düngeflächen gemittelt. Auf eine Einteilung der Moose nach Lebensformen wurde verzichtet.

3.3.4.6 Zusammenhänge zwischen Artenzahlen in der Moos- und Krautschicht und verschiedenen Humusformen

Zur Klärung der Frage inwieweit Humusformen als Ausdruck der Nährstoffsituation mit Artenzahlen der Moos- und Krautschicht zusammenhängen, wurden die Artenzahl jeder Vegetationsaufnahme getrennt nach Arten der Moos- und Krautschicht ermittelt. Die Artenzahlen wurden nach der die jeweilige Aufnahmefläche prägenden Humusform gemittelt. Die Humusformen L-Mull und F-Mull wurden für diese Auswertung zusammengefasst.

Die Unterschiede der Artenzahlen zwischen den durch unterschiedliche Humusformen geprägten Vegetationsaufnahmen wurde jeweils für Moos-, Krautschicht und zusammen global mit Kruskal-Wallis' H -Test überprüft; bei signifikanten Unterschieden erfolgten die Einzelvergleiche mit MWU-Tests. Bei einer Wahrscheinlichkeit unter 5 % ($p \leq 0,05$) wurde die Nullhypothese als signifikant und unter 1 % ($p \leq 0,05$) als hochsignifikant zurückgewiesen.

Wie beim Vergleich der Düngungen untereinander, wurde auch hier für die einzelnen nach Humusform gegliederten Vegetationsgruppen eine weitere Differenzierung der Arten der Krautschicht nach Lebensformen (nach Ellenberg et al., 1992) und nach ihrer Bindung an Waldstandorte des Berg- und Hügellandes in Deutschland (nach Schmidt et al., 2003) vorgenommen.

3.3.4.7 Beeinflussung der Artenzahlen der Bodenvegetation durch Umweltfaktoren

Mit multiplen Regressionen soll geklärt werden, ob sich die Artenzahl der Moos- und Krautschicht jeweils für sich oder als Summe mit aufgenommenen Umweltvariablen und

deren Interaktion beschreiben lässt.

Als sachlich für die Fragestellung interessante Variablen kommen die bodenchemischen Werte und das mit Fisheyebildern geschätzte Licht (PACL) sowie die Deckungssummen der drei Hauptbaumarten Tanne, Fichte und Kiefer in der Baumschicht in Frage (Tab. 3.8, S. 38).

Die Voraussetzungen ihre Überprüfung sowie notwendige Transformationen wurden bereits für die Regressionsanalyse der organischen Auflage besprochen und kann dort nachvollzogen werden (Tab. 3.9, S. 39). Ergänzend gilt, dass die Artenzahl der Moos- und Krautschicht sowohl einzeln als auch als Summe den Kriterien univariater Normalverteilung ($p > 0,05$, Kolmogoroff-Smirnoff-Test) und der Linearität der Zusammenhänge genügt.

Es wurden drei Regressionsmodelle in einem iterativen Prozess erstellt. Eines für die Beschreibung der Artenzahl der Summe der Moos- und Krautschicht und zwei mit ähnlich hoher Erklärung für die Artenzahl der Krautschicht. Die Artenzahl der Mooschicht liess sich in diesem iterativen Vorgehen mit den vorhandenen Variablen nur unzureichend beschreiben ($R^2 > 0,1$, vgl. auch Abschnitt 4.7.6, S. 92).

Diese drei Regressionsmodelle wurden aus dem ausreißerbereinigten Datensatz $n = 300$ nach Entfernung einer Zufallstichprobe von $n = 40$ Datensätzen zur Validierung des Regressionsmodells mit dem Programmpaket Statistica 6.0 berechnet. Als Hilfe zur Modellerstellung dienten die Algorithmen des schrittweisen Aus- oder Einschlusses, die bei schrittweisem Einschluss („Forward“) nicht für alle Variablen zu signifikanten β -Werten führten. Beim schrittweisen Ausschluss („Backward“) wurden nur sehr wenige Variablen ausgewählt (Gefahr des „underfitting“).

Die im Ergebnisteil vorgestellten Regressionsmodelle basieren auf den im „Forward“-Verfahren (vgl. hierzu Backhaus et al., 2000, S. 61) signifikant getesteten Variablen (β -Werte). Es konnte damit durch weiteren iterativen Einschluss von (signifikanten) Variablen der Regressionskoeffizient erhöht werden. Die Artenzahl der Krautschicht kann dabei durch zwei Regressionsmodelle etwa gleich gut beschrieben werden.

4 Ergebnisse

4.1 Unterschiede im Oberboden zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen

In diesem Abschnitt werden alle chemischen Parameter, die im Oberboden gemessen wurden zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen verglichen.

4.1.1 pH-Werte

Die Mittel der pH-Werte (H_2O) im Oberboden der untersuchten Flächen (Tab. 4.1, Tab. 4.2) liegen im Bereich zwischen pH 3,4 und pH 4 und damit im Pufferbereich von Aluminium (Schachtschabel et al., 1992). Die mittleren pH-Werte in CaCl_2 liegen jeweils ca. 0,6 pH-Einheiten unter den in H_2O gemessenen.

Im Vergleich der ungedüngten Flächen untereinander liegen die Mittel der pH-Werte (CaCl_2) bei den Flächen L1 U, L2 U, L3 U und L4 U innerhalb eines engen Bereiches zwischen pH 2,8 und pH 3 (Tab. 4.1, Tab. 4.2). Untersuchungsfläche V1 U hebt sich mit einem leicht höheren pH (CaCl_2) von 3,2 von den übrigen ungedüngten Flächen ab.

Die globale Prüfung auf Unterschiede der Varianten von Untersuchungsfläche L1 mit dem Kruskal-Wallis H -Test in den pH-Werten (CaCl_2 , H_2O) ist hochsignifikant (Tab. 4.1). Alle Varianten erhielten unterschiedliche Kombinationen aus Kalzium-, Phosphat- und Stickstoffdüngern (Tab. 3.3, S. 30 mit Bilanzierung der Elementgehalte). Es sind bis auf L1 C, der einzigen reinen Kalkungsvariante, alle gedüngten Varianten gegenüber der Nullvariante L1 U in den mittleren pH-Werten (CaCl_2 , H_2O) erhöht. Die Varianten L1 HJK fallen hier besonders auf, da sie im Gesamtbild einen deutlich erhöhten pH-Wert (CaCl_2 , H_2O) aufzeigen, der zudem signifikant gegenüber allen anderen Varianten im Einzelvergleich ist. L1 HJK erhielten im Vergleich zu den anderen Varianten mit 1,7 bis 2,5 t/ha Kalzium (in der Bilanz) vergleichsweise die höchsten Düngegaben an Kalzium und an Phosphor. Die Varianten L1 E und L1 FGI (zusätzlich mit Stickstoff gedüngt), die sich unter einander in ihren pH-Werten (CaCl_2 , H_2O) kaum und nicht signifikant unterscheiden, erhielten mit Düngungen zwischen 1,4 und 1,9 t/ha Kalzium (in der Bilanz) geringere, aber ähnlich hohe Mengen verglichen mit L1 HJK. Variante L1 A mit einer im Vergleich sehr niedrigen Dosierung in Form von 0,5 t/ha Kalkammonsalpeter (0,07 t/ha Kalzium) lässt sich vom pH-Wert (CaCl_2 , H_2O) mit den Varianten L1 E und L1 FGI vergleichen. Die Varianten L1 B und L1 D wurden nicht getestet ($n = 5$), weichen aber weder in der Düngung, noch im mittleren pH-Wert vom Gesamtbild der Fläche L1 ab.

Auf den Untersuchungsflächen L2, L3 und L4 wurde paarweise die gedüngte mit der ungedüngten Fläche verglichen (Tab. 4.2). Hier sind die pH-Werte (CaCl_2) auf den Flächen L2 D, L3 D und L4 D jeweils signifikant gegenüber den ungedüngten Vergleichsflächen erhöht. Fläche V1 zeigt ein abweichendes Bild: hier zeigt die Düngung von 1963 einen niedrigeren mittleren pH-Wert (CaCl_2 , H_2O) im Vergleich zur Nullfläche. Die Fläche V1 D⁺, die neben der Düngung von 1963 in den 1980er Jahren vermutlich mit Nitrophos-

4.1 Unterschiede im Oberboden zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen

Tabelle 4.1: Chemische Charakterisierung des Mineralbodens (0–5cm) für die Varianten von Untersuchungsfläche Liebenzell 1. Globaler Test mit Kruskal-Wallis H -Test, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$, Mann-Whitney- U -Test). Die Varianten B und D wurden aufgrund geringer Stichprobengröße ($n = 5$) nicht statistisch überprüft. Angaben zur Düngung vgl. Tab. 3.3.

N	Düngevarianten Liebenzell 1							
	L1 U	L1 A	L1 C	L1 E	L1 FGI	L1 HJK	L1 B	L1 D
	35	30	10	20	15	25	5	5
pH_{H₂O}	(K-W $p < 0,0001$)							
	abc	d	ac	bd	bd	e	–	–
Q_1	3,38	3,58	3,38	3,58	3,54	3,78	3,71	3,55
\bar{X}	3,49	3,69	3,46	3,70	3,69	3,85	3,72	3,65
\bar{X}	3,48	3,70	3,46	3,71	3,63	3,93	3,70	3,60
Q_3	3,67	3,89	3,59	4,04	3,79	4,46	3,75	3,85
pH_{CaCl₂}	(K-W $p < 0,0001$)							
	abc	abd	ac	bd	bd	e	–	–
Q_1	2,81	2,94	2,77	2,96	3,00	3,12	3,01	3,08
\bar{X}	2,96	3,06	2,82	3,13	3,07	3,28	3,04	3,16
\bar{X}	2,92	3,04	2,84	3,08	3,08	3,30	3,02	3,10
Q_3	3,15	3,14	2,98	3,40	3,18	3,61	3,13	3,21
C (mg/g)	(K-W $p = 0,7296$)							
\bar{X}	57,5	57,8	57,2	51,0	65,5	58,1	61,0	50,4
s	22,4	28,0	18,6	10,4	22,0	23,3	12,4	15,1
N (mg/g)	(K-W $p = 0,2661$)							
\bar{X}	2,55	2,64	2,42	2,51	3,31	2,76	3,03	2,47
s	0,96	1,33	0,80	0,68	1,23	0,86	0,51	0,49
P (mg/g)	(K-W $p < 0,0001$)							
	abc	abc	ab	ac	d	d	–	–
\bar{X}	0,21	0,22	0,17	0,22	0,35	0,32	0,24	0,33
s	0,08	0,11	0,05	0,06	0,18	0,09	0,05	0,07
C/N	(K-W $p = 0,0204$)							
	a	a	a	ab	b	b	–	–
\bar{X}	22,6	22,0	23,9	20,9	20,1	20,5	20,2	20,1
s	4,0	3,2	3,2	3,9	2,0	2,8	2,6	2,4
C/P	(K-W $p < 0,0001$)							
	abc	abc	ab	acd	cde	de	–	–
\bar{X}	278	261	333	234	207	182	252	150
s	104	59	142	57	63	61	52	22
N/P	(K-W $p = 0,0001$)							
	a	a	a	a	a	b	–	–
\bar{X}	12,2	12,0	14,0	11,2	10,4	8,8	12,4	7,5
s	3,7	2,7	5,5	2,0	3,3	2,1	1,5	1,1
Ca (mg/g)	(K-W $p = 0,0001$)							
	a	a	a	b	a	b	–	–
\bar{X}	0,16	0,27	0,17	0,31	0,13	0,49	0,12	0,17
s	0,23	0,49	0,19	0,25	0,08	0,39	0,04	0,05
Mg (mg/g)	(K-W $p = 0,0430$)							
Mg	abcd	abc	ab	acd	acd	cd	–	–
\bar{X}	1,01	0,88	0,76	1,05	1,02	1,08	1,01	1,30
s	0,43	0,37	0,21	0,40	0,30	0,24	0,30	0,22
K (mg/g)	(K-W $p = 0,0819$)							
\bar{X}	2,50	2,21	2,00	2,37	2,59	2,61	2,52	3,11
s	0,95	0,92	0,48	1,02	0,77	0,53	0,58	0,67

Abkürzungen: K-W: Kruskal-Wallis H -Test; \bar{X} : Mittelwert; s : Standardabweichung; \bar{X} : Median; Q_1 , Q_3 : Erstes (25 %), bzw. drittes (75 %) Quartil.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.2: Chemische Charakterisierung des Mineralbodens (0–5cm) für die Untersuchungsflächen Liebenzell 2, 3, 4 und Villingen 1. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$, Mann-Whitney- U -Test). Angaben zur Düngung vgl. Tab. 3.4.

N	Düngevariante								
	L2 U 25	L2 D 25	L3 U 40	L3 D 40	L4 U 10	L4 D 10	V1 U 20	V1 D 10	V1 D+ 10
Vergleich	paarweise		paarweise		paarweise		gruppenweise		
pH_{H₂O}							(K-W $p < 0,0001$)		
	a	b	a	b	a	a	a	b	a
Q_1	3,51	3,71	3,52	3,58	3,59	3,62	3,66	3,56	3,79
\bar{X}	3,64	3,77	3,57	3,65	3,61	3,71	3,75	3,61	3,82
\bar{X}	3,62	3,79	3,59	3,71	3,62	3,68	3,73	3,59	3,86
Q_3	3,71	3,90	3,67	3,99	3,67	3,84	3,87	3,68	3,86
pH_{CaCl₂}							(K-W $p < 0,0001$)		
	a	b	a	b	a	b	a	b	a
Q_1	2,79	3,04	2,75	2,85	2,86	2,99	3,15	3,02	3,20
\bar{X}	2,87	3,12	2,84	2,94	2,90	3,00	3,20	3,07	3,28
\bar{X}	2,88	3,13	2,83	3,00	2,91	3,01	3,21	3,00	3,32
Q_3	2,95	3,18	2,92	3,26	2,95	3,04	3,34	3,13	3,37
C (mg/g)							(K-W $p = 0,1763$)		
	a	b	a	a	a	b			
\bar{X}	28,4	39,6	37,3	40,7	29,8	59,9	38,1	50,3	42,9
s	13,2	9,3	16,0	15,1	11,9	32,6	10,9	19,0	10,1
N (mg/g)							(K-W $p = 0,5673$)		
	a	b	a	b	a	b			
\bar{X}	1,25	1,86	1,68	2,00	1,52	2,81	2,16	2,44	2,34
s	0,34	0,44	0,71	0,76	0,64	1,46	0,48	0,75	0,66
P (mg/g)							(K-W $p < 0,0741$)		
	a	b	a	b	a	b			
\bar{X}	0,12	0,19	0,18	0,24	0,12	0,28	0,18	0,21	0,27
s	0,02	0,06	0,07	0,11	0,05	0,12	0,03	0,06	0,15
C/N							(K-W $p = 0,0610$)		
	a	a	a	b	a	a			
\bar{X}	22,5	21,4	22,1	20,4	19,6	21,2	17,6	20,4	18,5
s	6,9	2,8	2,9	2,3	1,7	4,2	2,7	4,1	1,3
C/P							(K-W $p = 0,0535$)		
	a	a	a	b	a	a			
\bar{X}	236	210	222	178	231	217	200	231	171
s	106	41	82	54	59	87	42	73	37
N/P							(K-W $p = 0,0763$)		
	a	a	a	a	a	a			
\bar{X}	10,4	9,9	10,1	8,7	11,7	10,5	11,5	11,3	9,2
s	2,1	1,7	3,6	2,5	2,6	4,2	2,6	2,5	2,1
Ca (mg/g)							(K-W $p = 0,0001$)		
	a	b	a	b	a	a	a	a	b
\bar{X}	0,11	0,30	0,15	0,46	0,10	0,10	0,10	0,12	0,35
s	0,04	0,17	0,12	0,75	0,05	0,04	0,04	0,05	0,45
Mg (mg/g)							(K-W $p = 0,5207$)		
	a	b	a	b	a	a			
\bar{X}	0,77	1,07	0,49	0,82	0,77	1,08	1,41	1,31	1,41
s	0,38	0,31	0,28	0,33	0,25	0,41	0,37	0,15	0,13
K (mg/g)							(K-W $p = 0,0004$)		
	a	b	a	b	a	a	ab	a	b
\bar{X}	1,84	2,32	0,85	1,34	1,59	2,67	2,38	2,08	1,80
s	0,83	0,69	0,33	0,44	0,41	1,54	0,73	0,32	0,19

Abkürzungen: K-W: Kruskal-Wallis H -Test; \bar{X} : Mittelwert; s : Standardabweichung; \bar{X} : Median; Q_1 , Q_3 : Erstes (25 %), bzw. drittes (75 %) Quartil.

4.1 Unterschiede im Oberboden zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen

ka behandelt wurde (vgl. Tab. 3.4, S. 32 und Krug (1996)), ist gegenüber der Nullfläche V1 U im pH-Wert (CaCl_2 , H_2O) nicht signifikant erhöht.

In der Gesamtbetrachtung schwanken die Mittel der pH-Werte (CaCl_2) auf allen Flächen nur wenige 0,1 pH-Einheiten um ein Niveau von ca. pH 3. Die pH-Werte der gedüngten Flächen liegen dabei fast alle auf einem signifikant höherem Niveau. Dabei ist zu beachten, dass eine Zunahme um einem Zehntel pH-Wert ca. einer Abnahme auf 80 % der ursprünglichen H^+ -Ionenkonzentration entspricht.

4.1.2 Kalziumgehalte

Die Mittelwerte des Kalziumgehaltes im Mineralboden sind auf einigen Varianten der Flächen L1, L2, L3 und V1 stark durch Ausreißer (vgl. Abschnitt 3.3.3.1, S. 35) beeinflusst. Dies wird im Vergleich der mit und ohne Ausreißer gebildeten Mittelwerte und der sehr hohen Standardabweichungen bei den Ausreißerdatensätzen deutlich (Tab. 4.1, Tab. 4.2 und Tab. 4.3). Die Größer-Kleiner-Beziehungen der Mittelwerte und die Testergebnisse werden durch Entfernung von Ausreißern allerdings kaum beeinträchtigt. Auf den gedüngten Flächen ist die Anzahl der Ausreißer, die auch stärker den Mittelwert beeinflussen, mit $n = 21$ gegenüber den ungedüngten ($n = 2$) ungleich höher. Die Düngungen L3 D und L1 HJK fallen hier mit fünf und sieben Ausreißern besonders auf. Die mittleren Kalziumgehalte der ungedüngten Flächen, die zudem kaum Ausreißer enthalten, liegen dabei in einem engen Bereich zwischen 0,1 g/kg und 0,13 g/kg (Tab. 4.1, Tab. 4.2 und Tab. 4.3).

Die globale Prüfung auf Unterschiede der Varianten von Untersuchungsfläche L1 mit dem Kruskal-Wallis H -Test ist sowohl mit als auch ohne Ausreißer hochsignifikant. Alle Varianten der Fläche L1 wurden gekalkt. Hier heben sich die Varianten L1 E und L1 HJK signifikant höher von den anderen ab, die sich weder von der Nullparzelle noch untereinander signifikant unterscheiden (Tab. 4.1). Diese erhielten zusammen mit L1 FGI die höchsten Düngegaben an Kalzium (s. o. und vgl. Tab. 3.3), sodass für Fläche L1 etwas eingeschränkt gelten mag, dass sich Kalziumgaben als erhöhte Kalziumspiegel im Mineralboden nachweisen lassen. Die Varianten L1 FGI unterscheiden sich in der Düngung von L1 E und L1 HJK durch eine zusätzliche Stickstoffgabe.

Auf den Flächen L2, L3 und V1 spiegelt sich die Düngung (alle mit Kalkbeimischung, Tab. 3.4) meist in höheren Kalziumgehalten im Mineralboden wieder (Tab. 4.2), der Unterschied ist auf Fläche L2 besonders groß, auf Fläche V1 lässt sich eine Steigerung entlang der Düngungsmenge erkennen, der allerdings zwischen V1 U und V1 D nur gering und nicht signifikant ist. Auf Fläche L4 ist auf der ebenfalls im Vergleich stark gekalkten Düngefläche L4 D (Tab. 3.4) kein signifikanter Unterschied im mittleren Kalziumgehalt des Mineralbodens zur ungedüngten Fläche L4 U zu erkennen (Tab. 4.2).

Auf den meisten Untersuchungsflächen lassen sich bis auf Düngefläche L1 C, und L4 D auf (Kalk-)düngungen erhöhte Kalziumgehalte im Mineralboden im direkten Vergleich zu ungedüngten Flächen nachweisen. Allerdings sind weder mit noch ohne Ausreißer Abstufungen der Mittelwerte im Mineralboden im Verhältnis zur der gedüngten Kalziummenge erkennbar.

Fläche L4 D erhielt mit einer Düngung von ca. 2,7 t/ha Kalzium in der Bilanz (Tab. 3.4) von allen Flächen die höchste Kalziumgabe aller untersuchten Düngungen und zeigt gar

4 Ergebnisse

Tabelle 4.3: Darstellung der Kalziumgehalte im Mineralboden (0–5 cm) ohne Ausreißer für die verschiedenen Düngevarianten und die Humusformen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$, Mann-Whitney- U -Test).

Düngevarianten von Untersuchungsfläche Liebenzell 1								
	U	A	C	E	FGI	HJK	B	D
N	34	27	9	18	15	18	5	5
Ca ausreißerfrei (Druckaufschluss)								
K-W $p = 0,0224$ (ohne L1 B und L1 D)								
	a	a	a	b	a	b	–	–
\bar{X}	0,12	0,14	0,11	0,25	0,13	0,29	0,12	0,17
s	0,06	0,09	0,04	0,15	0,08	0,17	0,04	0,05

Untersuchungsflächen Liebenzell 2, 3, 4 und Villingen 1									
	L2 U	L2 D	L3 U	L3 D	L4 U	L4 D	V1 U	V1 D	V1 D+
N	25	23	39	35	10	10	20	10	9
Ca ausreißerfrei (Druckaufschluss)									
K-W $p = 0,0004$									
	a	b	a	b	a	a	a	a	b
\bar{X}	0,11	0,27	0,13	0,19	0,10	0,10	0,10	0,12	0,21
s	0,04	0,13	0,06	0,09	0,05	0,04	0,04	0,05	0,14

Humusformen							
	L-Mu	F-Mu	muMo	Mo	roMo	RH	F-RH
N	1	36	38	101	94	22	20
Ca ausreißerfrei (Druckaufschluss)							
K-W $p < 0,0001$							
	–	a	b	ce	de	cde	de
\bar{X}	0,20	0,30	0,20	0,14	0,13	0,13	0,11
s	–	0,15	0,13	0,07	0,08	0,10	0,05

Abkürzungen: K-W: Kruskal-Wallis H -Test; \bar{X} : Mittelwert; s: Standardabweichung.

keine erhöhten Kalziumspiegel gegenüber der ungedüngten Vergleichsfläche. Fläche L3 D erhielt gegenüber Fläche L2 D fast die 1,5-fache Menge an Kalzium zu vergleichbaren Zeitpunkten (Tab. 3.4) und doch ist der mittlere Kalziumgehalt mit und ohne Ausreißer (Tab. 4.2, Tab. 4.3) auf Fläche L2 D deutlich höher als auf Fläche L3 D.

4.1.3 Magnesiumgehalte

Magnesium wurde auf keiner der hier untersuchten Flächen gezielt gedüngt (Tab. 3.3), allerdings enthalten Kalke in der Regel einen gewissen Magnesiumanteil (von Wilpert, 2003), der hier nicht bekannt ist.

Die mittleren Magnesiumgehalte im Mineralboden der ungedüngten Flächen zeigen im Vergleich große Unterschiede, die im Bereich von ca. 0,5 g/kg (L3 U) und 1,4 g/kg (V1 U) liegen (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

Die Varianten der Untersuchungsfläche L1 unterscheiden sich global getestet signifikant, jedoch zeigt keine der gedüngten Flächen einen signifikanten Unterschied im Vergleich zur Nullvariante L1 U (Tab. 4.1). Vielmehr liegen die signifikanten Unterschiede hier zwischen den stark mit Kalk und Phosphor gedüngten Flächen L1 E, L1 FGI und L1 HJK und den vergleichsweise gering gedüngten Flächen L1 A (sehr wenig Kalzium und Stickstoff gedüngt) und besonders L1 C (ausschließlich Kalzium gedüngt, Tab. 3.3). Bis auf L1 C mit besonders niedrigem Magnesiumspiegel und L1 HJK mit einem vergleichsweise hohen liegen alle Werte innerhalb eines geringen Schwankungsbereichs um 1 g/kg.

4.1 Unterschiede im Oberboden zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen

Auf den paarweise verglichenen Flächen L2, L3 und L4 liegen die Mittel der Magnesiumgehalte auf den gedüngten Flächen höher, sind aber trotz vergleichbar großer Unterschiede nur auf den Flächen L2 und L3 signifikant. Die Mittel der Magnesiumgehalte befinden sich auf den Varianten der Fläche V1 (Tab. 4.2) alle ohne große und nicht signifikante Unterschiede auf ähnlichem und auf im Gesamtvergleich sehr hohem Niveau. Dabei ist das Mittel der ungedüngten Fläche V1 U geringfügig höher.

In der Gesamtbetrachtung sind die mittleren Magnesiumgehalte im Mineralboden auf gedüngten Flächen tendenziell erhöht, wobei zwischen den fünf Untersuchungsflächen selbst große Unterschiede bestehen. Auf Fläche V1 ist der Magnesiumgehalt im Mineralboden auf der ungedüngten Fläche höher als auf den gedüngten, jedoch sind die Unterschiede dort äußerst gering (Tab. 4.2).

4.1.4 Kaliumgehalte

Die mittleren Kaliumgehalte im Mineralboden der ungedüngten Flächen schwanken stark. Sie liegen etwa im Bereich zwischen 0,85 g/kg (L3 U) und 2,5 g/kg (L1 U), wobei die übrigen Flächen im Bereich um 2 g/kg liegen (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

Die mittleren Kaliumgehalte im Mineralboden unterscheiden sich nicht signifikant (Tab. 4.1) auf der Fläche L1 und liegen auf allen Varianten bei Gehalten knapp über 2 g/kg innerhalb eines engen Bereichs. Sie sind hier auf den Varianten L1 C und L1 A und nicht auf der Nullvariante am geringsten. Die Variante L1 D zeigt den höchsten Kaliumspiegel, jedoch wurde diese nicht mitgetestet, da fünf Wiederholungen keine klare Aussage erlauben. Auf keiner Düngevariante der Fläche L1 wurde Kalium gedüngt.

Die Flächen L2, L3 und L4 zeigen auf gedüngten Flächen höhere Kaliumgehalte im Mineralboden (Tab. 4.2). Nur Fläche L2 D erhielt davon eine geringe Kaliumdüngegabe (vgl. Tab. 3.4). Wie auch schon beim Magnesiumspiegel sind auch hier nur die Unterschiede der Flächen L3 und L2 signifikant. Der große Unterschied auf Fläche L4 ist durch Ausreißer verursacht. Auf der Untersuchungsfläche V1 finden sich die höchsten Kaliumgehalte auf der ungedüngten Fläche und die niedrigsten auf V1 D⁺, die vermutlich etwas Kalium in Form von Nitrophoska erhielt (vgl. Tab. 3.4). Dieser gering höhere Kaliumgehalt ist dabei signifikant gegenüber den Varianten V1 U und V1 D erhöht.

Zusammenfassend betrachtet sind die mittleren Kaliumgehalte im Mineralboden durch Düngung tendenziell erhöht. Dabei können die Unterschiede nur zwischen ungedüngten Flächen fallweise sehr hoch sein, ähnlich wie bei Magnesium. Auf nicht mit Kalium gedüngten Flächen können die Werte auf der Düngefläche höher (L3, L4), oder aber etwa gleich hoch (L1) oder sogar etwas niedriger (V1 U im Vergleich zu V1 D) als auf ungedüngten Vergleichsflächen sein. Die mit Kalium gedüngte Fläche L2 D hat gegenüber der ungedüngten Fläche L2 U zwar signifikant höhere Kaliumgehalte im Mineralboden, jedoch liegt auf der anderen Seite die vermutlich mit etwas Kalium (Tab. 3.4) gedüngte Fläche V1 D⁺ im Kaliumgehalt sogar signifikant niedriger als die nicht mit Kalium gedüngte Variante der Untersuchungsfläche V1.

4.1.5 Kohlenstoffgehalte

Unabhängig von einer Düngung bestehen bereits zwischen den fünf Untersuchungsflächen große Unterschiede im Kohlenstoffgehalt des Mineralbodens. So hebt sich im Vergleich

4 Ergebnisse

der fünf ungedüngten Untersuchungsflächen die Fläche L1 U mit Werten von knapp 60 g/kg Kohlenstoff im Mineralboden deutlich von den übrigen Flächen mit Werten zwischen etwa 25 g/kg und 40 g/kg ab (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

Die global mit dem Kruskal-Wallis-*H*-Test überprüften Varianten der Fläche L1 zeigen keine signifikanten Unterschiede untereinander und die Werte zeigen nur geringe Unterschiede um 60 g/kg Kohlenstoff. Variante FGI (N-Düngung, Tab. 3.3) ist hier im Wert gegenüber den anderen Varianten leicht erhöht. Die nicht getesteten Varianten L1 B und L1 D fallen innerhalb der Fläche mit ähnlich hohen Werten nicht aus dem Rahmen.

Auf den übrigen Untersuchungsflächen sind die Kohlenstoffgehalte im Mineralboden auf den meisten gedüngten Flächen leicht erhöht, aber nur auf L3 und L4 signifikant (Tab. 4.2). L4 ist gegenüber der Nullvariante stark erhöht, die Werte schwanken aber stark und sind mit $n = 10$ Wiederholungen nicht stark abgesichert. Auf Untersuchungsfläche V1 ist der Kohlenstoffgehalt im Mineralboden der beiden gedüngten Flächen gegenüber der ungedüngten geringfügig erhöht (nicht signifikant).

Zusammenfassend lässt sich eine leichte Tendenz zur Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes im Oberboden durch Düngungen feststellen. Diese Erhöhung ist jedoch nur in zwei Fällen (L2 und L4) statistisch abgesichert und zudem können die Unterschiede zwischen den ungedüngten Flächen selbst beträchtlich sein.

4.1.6 Stickstoffgehalte

Wie bei den Kohlenstoffgehalten im Mineralboden, so sind auch bei den Stickstoffgehalten die Unterschiede zwischen den einzelnen ungedüngten Flächen beachtlich. Mit mittleren Stickstoffgehalten zwischen etwa 1,2 g/kg (L2 U) und 2,6 g/kg (L1 U) im Oberboden schwanken die Mittelwerte für die fünf ungedüngten Untersuchungsflächen stark (Tab. 4.1, Tab. 4.2). Die Mittelwerte der übrigen ungedüngten Flächen liegen dabei zwischen 1,5 g/kg und 2,2 g/kg Stickstoff.

Auf Untersuchungsfläche L1 bestehen zwischen den Düngevarianten keine signifikanten Unterschiede (Tab. 4.1) und alle Mittelwerte liegen innerhalb eines Bereiches zwischen 2,4 g/kg und 3,3 g/kg Stickstoff. Die nicht getesteten Varianten L1 B und L1 D zeigen in ihren Mittelwerten keine Auffälligkeiten. Mit Stickstoff gedüngt wurden die Varianten L1 A (0,12 t/ha) und L1 FGI (0,16-0,21 t/ha, vgl. Tab. 3.3). Davon zeigt nur L1 FGI leicht erhöhte Stickstoffwerte im Mineralboden, auch im Vergleich gegenüber allen anderen Varianten. Diese sind aber statistisch nicht abgesichert.

Auf den Untersuchungsflächen L2, L3 und L4 ist Stickstoff im Mineralboden durch Düngung signifikant erhöht (Tab. 4.2). Auf Untersuchungsfläche V1 ist Stickstoff nur leicht und nicht signifikant gegenüber den ungedüngten Varianten erhöht. Auf Fläche L2 D wurde auch mit Stickstoff gedüngt (Tab. 3.4), da aber auch andere Stoffe gedüngt wurden, lässt sich die Erhöhung nicht auf Stickstoff allein zurückführen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass gedüngte Flächen eine Tendenz in Richtung erhöhte Stickstoffspiegel im Mineralboden zeigen, die auf drei Flächen statistisch abgesichert ist. Eine zusätzliche Erhöhung der Stickstoffgehalte im Mineralboden durch Stickstoffdüngung kann aus dem hier vorliegenden Datenmaterial weder ausgeschlossen noch bestätigt werden.

4.1.7 Phosphorgehalte

Im Vergleich aller fünf ungedüngten Flächen liegen die mittleren (Gesamt-)Phosphorgehalte im Oberboden zwischen etwa 1,2 g/kg auf Fläche L2 U und 2,2 g/kg auf der Fläche L1 U in einem weiten Wertebereich (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

Die globale Prüfung auf Unterschiede der Varianten von Untersuchungsfläche L1 mit dem Kruskal-Wallis *H*-Test ist hochsignifikant. Hier heben sich mit Ausnahme der Fläche L1 E die mit Phosphat gedüngten Flächen L1 FGI und L1 HJK signifikant von den nicht mit Phosphat gedüngten Flächen L1 U, L1 A und L1 C mit höheren Phosphorgehalten ab (Tab. 3.3, Tab. 4.1). Im Vergleich dieser drei mit Phosphat gedüngten Flächen erhielt L1 HJK (0,14–0,21 t/ha P) gegenüber L1 E und L1 FGI mit jeweils 0,07 t/ha P die höchste Phosphorgabe (Tab. 3.3). Beim Vergleich der Mittelwerte im Mineralboden zeigt jedoch L1 FGI die höchsten Phosphorgehalte, während L1 E auf einem vergleichbaren Niveau mit den nicht mit Phosphor gedüngten Flächen liegt. Die nicht getesteten Varianten L1 B (0,07 t/ha P) und L1 D (0,14 t/ha P) reihen sich mit ihrem durchschnittlichen Phosphorgehalten gut in das Gesamtbild der Fläche L1 ein. Die Variante L1 C (keine P-Düngung) hat den niedrigsten Phosphorgehalt im Oberboden.

Auf den übrigen Flächen L2, L3, L4 und V1 ist auf der gedüngten Fläche (alle Flächen erhielten Phosphor, vgl. Tab. 3.4) immer ein höherer Phosphorgehalt im Mineralboden erkennbar, der für die Flächen L2, L3 und L4 jeweils signifikant ist (Tab. 4.1). L4 erhielt mit einer Bilanz von 0,19 t/ha P die höchste Gabe und zeigt auch bei den Messwerten im Mineralboden die größten Unterschiede zwischen Dünge- und Nullfläche. Die Erhöhung der mittleren Phosphorgehalte im Oberboden auf Fläche V1 ist auf den gedüngten Flächen (V1 D, V1 D⁺) gegenüber der ungedüngten Variante V1 U nur gering und nicht signifikant.

Durchgängig sind auf allen mit Phosphat gedüngten Flächen im Mineralboden höhere Gesamtphosphorgehalte gegenüber ungedüngten Vergleichsflächen nachweisbar.

4.1.8 C/N-Verhältnisse

Die Mittel der C/N-Verhältnisse im Oberboden aller ungedüngten und gedüngten Flächen liegen bei leichten Schwankungen in einem engen Bereich um 20 (Tab. 4.1, Tab. 4.2). Auf Untersuchungsfläche V1 sind die Werte vor allem auf der ungedüngten Fläche V1 U im Gesamtvergleich etwas enger.

Auf Untersuchungsfläche L1 heben sich die beiden im Vergleich stark gedüngten Varianten L1 FGI und L1 HJK mit etwas engeren C/N-Verhältnissen um 20 signifikant von der Nullvariante L1 U und den schwächer gedüngten Varianten L1 A und L1 C ab (Tab. 3.3, Tab. 4.1), während Variante L1 E zu keiner der getesteten Flächen signifikante Unterschiede zeigt. Die nicht getesteten Flächen L1 B und L1 D liegen mit ihren Mittelwerten auch in dem etwas engeren Bereich der Flächen L1 FGI und L1 HJK. Auf Fläche L1 C finden sich die weitesten C/N-Verhältnisse.

Auf den übrigen Flächen ist das Bild uneinheitlich (Tab. 4.2). Auf den Untersuchungsflächen L2 und L3 sind die mittleren C/N-Verhältnisse im Oberboden auf der gedüngten Fläche im Vergleich zur ungedüngten Fläche enger, während bei Untersuchungsfläche L4 und V1 das Gegenteil zu beobachten ist. Signifikant ist allerdings nur der Unterschied auf Fläche L3. Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten sind gering.

4 Ergebnisse

Für alle fünf Flächen gilt, dass die Unterschiede in den Mittelwerten zwischen gedüngten und ungedüngten Werten gering sind und auf gedüngten Flächen nicht durchgängig eine Erhöhung oder Erniedrigung der C/N-Verhältnisse im Oberboden gegenüber ungedüngten Vergleichsflächen zu beobachten ist. Auf mit Stickstoff gedüngten Flächen (L1 A, L1 FGI und L2 D) ist ebenso wie bei den absoluten Stickstoffgehalten im Oberboden auch bei C/N-Verhältnissen keine Veränderung im Vergleich mit stickstofffreien Düngungen erkennbar (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

Die Stickstoffgehalte im Mineralboden sind sehr stark an den Kohlenstoffgehalt gebunden, wie der hohe Korrelationskoeffizient von $R = 0,93$ (Tab. 4.6) zeigt. Die beiden Elemente verhalten sich innerhalb eines engen Rahmens von etwa C/N 20 proportional zueinander, auch wenn die absoluten Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte sowohl in der einzelnen Messung als auch als Mittelwert der Flächen starke Unterschiede zeigen (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

4.1.9 C/P-Verhältnisse

Im Vergleich der fünf ungedüngten Flächen ist L1 U durch vergleichsweise weite (C/P= 278) und V1 U (C/P= 200) durch vergleichsweise enge mittlere C/P-Verhältnisse im Oberboden gekennzeichnet (Tab. 4.1, Tab. 4.2). Bei Betrachtung auch der gedüngten Flächen erweitert sich dieser Bereich mit L1 D (C/P= 150) und L1 C (C/P= 333) beträchtlich.

Auf Untersuchungsfläche L1 heben sich die Varianten L1 FGI und L1 HJK mit deutlich engeren C/P-Verhältnissen von der Nullvariante L1 U und den nicht mit Phosphat gedüngten Varianten L1 A und L1 C ab (Tab. 4.1, Tab. 3.3). Variante L1 E liegt im Wertebereich mit C/P um 230 dazwischen und Variante L1 C zeigt mit einem mittleren C/P von 333 bei hoher Standardabweichung das weiteste C/P-Verhältnisse überhaupt. Von den nicht getesteten Varianten fällt L1 D mit dem engsten mittleren C/P-Verhältnis überhaupt auf, diese Fläche wurde sehr stark mit Phosphat gedüngt (0,21 t/ha P, Tab. 3.3).

Auf den Untersuchungsflächen L2, L3 und L4 sind die mittleren C/P-Verhältnisse im Oberboden der gedüngten Flächen jeweils enger als die der ungedüngten, dabei ist nur das Ergebnis von Fläche L3 signifikant verengt (Tab. 4.2). Auf Untersuchungsfläche V1 liegen keine signifikanten Unterschiede vor, von den gedüngten Flächen hat V1 D weitere und V1 D⁺ engere mittlere C/P-Verhältnisse im Vergleich zur Nullfläche V1 U.

Insgesamt zeigen vor allem stark mit Phosphat gedüngte Flächen mit Ausnahme von Fläche V1 eine Tendenz zu engeren C/P-Werten im Vergleich zu nicht mit Phosphat gedüngten Flächen. Dies ist besonders deutlich auf den Untersuchungsflächen L1 und L3 zu beobachten. In dieser Untersuchung zeichnen Phosphorgehalte allerdings etwas besser als C/P-Verhältnisse des Oberbodens bezüglich Phosphatdüngung (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

4.1.10 N/P-Verhältnisse

Das mittlere N/P-Verhältnis im Oberboden schwankt auf allen Flächen um den Wert 10 und es gibt in der Gesamtschau aller Flächen keine eindeutigen Hinweise darauf, dass das N/P-Verhältnis durch (P)-Düngung im Vergleich zur ungedüngten Vergleichsfläche steigt oder sinkt (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

4.1 Unterschiede im Oberboden zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen

Einzig Düngevariante L1 HJK mit der höchsten gedüngten Phosphormenge (0,14-0,21 t/ha in der Bilanz, Tab. 3.3) der Untersuchungsfläche L1 zeigt im Vergleich zu den anderen Düngevarianten ein signifikant niedrigeres mittleres N/P-Verhältnis, wobei die ungetestete Fläche L1 D (0,21 t/ha P) durch ähnlich niedrige N/P-Verhältnisse gekennzeichnet ist (vgl. Tab. 4.1). Düngevariante L1 C (keine Phosphatdüngung vgl. Tab. 3.3) fällt auf Fläche L1 durch ein vergleichsweise weites und schwankendes (hohe Standardabweichung) mittleres N/P-Verhältnis auf, während die restlichen L1-Varianten durch etwa gleich hohe Werte gekennzeichnet sind.

4.1.11 Ergebnisüberblick Düngewirkungen im Oberboden

Bei der Betrachtung der Mittelwerte der pH-Werte, Elementgehalte und Stoffquotienten, sind die mittleren Gehalte an Gesamtphosphor (Mineralboden) auf gedüngten Flächen stets gegenüber den ungedüngten Vergleichsflächen erhöht, was auch statistisch gut abgesichert ist. Dies gilt auch für Kalzium mit der Einschränkung, dass auf Untersuchungsfläche L4 die Gehalte (Mineralboden) auf gedüngten und ungedüngten Flächen etwa gleich hoch sind. Nicht so eindeutig ist dies bei den Gehalten der Kationen Magnesium und Kalium, beim pH (CaCl_2 , H_2O) und Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten im Oberboden. Hier sind die Werte auf gedüngten Flächen im Vergleich erhöht, jedoch besonders auf Untersuchungsfläche V1 oft auf gedüngten Flächen erniedrigt. Die Mittel der Stoffquotienten C/N und C/P sind auf gedüngten Flächen tendenziell verengt, wobei die Werte hier auf Untersuchungsfläche L4 beim C/N-Verhältnis und Untersuchungsfläche V1 bei C/N- und C/P-Verhältnis diesem Trend entgegenlaufen. Die N/P-Verhältnisse sind auf gedüngten Flächen eher weiter.

Auf Untersuchungsfläche L1 fällt die Variante L1 C mit stets niedrigeren Elementgehalten und pH -Werten (CaCl_2) sowie weiteren C/N- und C/P-Verhältnissen als die ungedüngten Vergleichsflächen auf.

4.2 Die Veränderung der organischen Auflagen durch Düngung

4.2.1 Vergleich der Mächtigkeiten der Oh und Of-Lagen

Die Mächtigkeit der organischen Auflagen (Summe von Oh und Of) ist im Mittel auf gedüngten Flächen in der Regel geringer als auf ungedüngten (Tab. 4.4, 4.5). Dies gilt auch für die getrennte Betrachtung jeweils von Oh- und Of-Lage. Ausnahmen bilden Fläche L4 und die Düngevariante V1 D. Die höhere Auflagenmächtigkeit auf den gedüngten Flächen L4 und V1 D gegenüber den ungedüngten Flächen ist jedoch nur schwach und in keinem Fall signifikant.

Auf den stärker gedüngten Varianten der Fläche L1 E, FGI und HJK ist die niedrigere Mächtigkeit jeweils von Oh- und Of-Lage gegenüber der ungedüngten Fläche L1 U signifikant. Die mit geringeren Düngemengen (vgl. Tabelle 3.5) gedüngten Varianten zeigen dabei ähnlich hohe mittlere Auflagenmächtigkeiten wie die Nullfläche.

Insgesamt ist auf gedüngten Flächen mit Ausnahme der Untersuchungsfläche L4 und V1 D eine starke Abnahme der organischen Auflagen gegenüber ungedüngten Flächen zu beobachten. Eine Steigerung der Düngemenge führt im Vergleich der Düngevarianten der Untersuchungsfläche L1 zu stärkerer Abnahme der Mächtigkeiten der organischen Auflagen.

4.2.2 Vergleich der Häufigkeit der Humusformen

Auf gedüngten Flächen ist gegenüber ungedüngten Vergleichflächen eine Veränderung der Häufigkeit der kartierten Humusformen (nach Arbeitskreis Standortkartierung, Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 1996) zu erkennen (Tab. 4.4 und 4.5). Diese besteht auf allen fünf Untersuchungsflächen in einer deutliche Zunahme „günstigerer“ Humusformen wie mullartigem Moder und F-Mull auf den gedüngten Flächen gegenüber Moder und besonders auch gegenüber rohhumusartigem Moder, Rohumus und nur auf Fläche L1 auch gegenüber von durch historische Streunutzung entstandenem F-Rohhumus.

Im Vergleich der Düngeflächen von Variante L1 fällt auf, dass sich mit einer Steigerung der Düngermenge (Tab. 3.3) der Anteil der günstigeren Humusformen wie Mull und Mullartiger Moder erhöht (Tab. 4.4). Auf den schwach gedüngten Varianten L1 A haben im Vergleich zur ungedüngten Variante L1 U kaum günstige Humusformen zugenommen, auf der ausschließlich mit Kalk gedüngten Variante L1 C überwiegen sogar ungünstige Humusformen, besonders F-Rohhumus gegenüber der Nullfläche. Aber selbst auf den im Vergleich stark gedüngten Flächen (L1 E, FGI, HJK, B und D) findet sich stets ein Anteil von 5–20 % ungünstigerer Humusformen wie rohhumusartiger Moder, Rohumus und F-Rohhumus.

Auf den Untersuchungsflächen L2, L3 und L4 nehmen Mull und Mullartiger Moder von vernachlässigbaren Anteilen auf Anteile von ca. 40–50 % zu (Tab. 4.5). Auf Fläche V1 D ist diese Verschiebung in den Häufigkeiten geringer als auf den anderen Flächen. Insgesamt kommen die Humusformen Mull und mullartiger Moder auf keiner ungedüngten Fläche in nennenswerter Häufigkeit vor. Dabei sind auf den gedüngten Flächen die ungünstigen Humusformen noch mit nennenswerten Anteilen von 20–40 % vertreten. Die Anteile der Humusform Moder verzeichnen dabei meist nur einen leichten Rückgang auf der Düngefläche gegenüber den ungedüngten Flächen.

4.2 Die Veränderung der organischen Auflagen durch Düngung

Tabelle 4.4: Aufagemächtigkeit der Humusformen für die Düngewarianten von Untersuchungsfläche Liebenzell 1. Globaler Test mit Kruskal-Wallis H -Test, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$, Mann-Whitney- U -Test). Die Varianten B und D wurden aufgrund geringer Stichprobengröße ($n = 5$) nicht statistisch überprüft. Vergleich der Häufigkeit der Humusformen ohne statistische Überprüfung. Angaben zur Düngung vgl. Tab. 3.4.

Fläche	L1 U	L1 A	L1 C	L1 E	L1 FGI	L1 HJK	L1 B	L1 D
N	35	30	10	20	15	25	5	5
Oh-Lage (cm)								
	(K-W $p = 0,0002$)							
	a	a	b	b	b	b	–	–
\bar{X}	1,8	1,8	0,7	0,6	0,6	0,6	1,1	0,2
s	1,7	1,7	1,0	0,7	0,7	1,1	0,8	0,3
Of-Lage (cm)								
	(K-W $p < 0,0001$)							
	ab	abd	ab	cde	bcd	ce	–	–
\bar{X}	5,8	4,6	6,1	2,5	3,6	2,0	3,6	2,4
s	3,4	3,3	2,3	1,2	2,2	1,5	1,1	1,4
Häufigkeit der Humusformen (absolut und in Prozent)								
L-Mu	0	0	0	0	0	2	0	0
%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0
F-Mu	0	2	0	5	2	10	0	1
%	0,0	6,7	0,0	25,0	13,3	40,0	0,0	20,0
muMo	4	6	0	8	4	5	1	1
%	11,3	20,0	0,0	40,0	26,7	20,0	20,0	20,0
Mo	9	6	2	6	6	6	2	2
%	25,8	20,0	20,0	30,0	40,0	24,0	40,0	40,0
roMo	9	11	1	1	1	2	2	0
%	25,8	36,6	10,0	5,0	6,7	8,0	40,0	0,0
RH	4	2	1	0	0	0	0	1
%	11,3	6,7	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0
F-RH	9	3	6	0	2	0	0	0
%	25,8	10,0	60,0	0,0	13,3	0,0	0,0	0,0

Abkürzungen: K-W: Kruskal-Wallis H -Test; \bar{X} : Mittelwert; s : Standardabweichung; L-Mu L-Mull, F-Mu F-Mull, muMo mullartiger Moder, Mo typischer Moder, roMo rohhumusartiger Moder, RH Rohhumus, F-RH Streunutzungs-Rohhumus.

Die gedüngten Flächen sind insgesamt neben einer höheren Häufigkeit günstiger Humusformen durch ein breiteres Spektrum und stärkere Heterogenität an Humusformen gegenüber ungedüngten Flächen gekennzeichnet.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.5:

Auflagemächtigkeit der Humusformen für die Düngewarianten von Untersuchungsflächen Liebenzell 2, 3, 4 und Villingen 1. Paarweise Vergleiche jeweils für die Flächen Liebenzell 2, 3 und 4 mit dem Mann-Whitney-*U*-Test ($p < 0,05$). Fläche Villingen 1: Globale Prüfung mit dem Kruskal-Wallis *H*-Test, Einzelvergleiche bei Signifikanz mit dem Mann-Whitney-*U*-Test ($p < 0,05$). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede. Der Vergleich der Häufigkeit der Humusformen ohne statistische Überprüfung. Angaben zur Düngung vgl. Tab. 3.4.

Fläche	L2 U	L2 D	L3 U	L3 D	L4 U	L4 D	V1 U	V1 D	V1 D+
N	25	25	40	40	10	10	20	10	10
Vergleich	paarweise		paarweise		paarweise		gruppenweise		

Oh-Lage (cm)									
(K-W $p = 0,0039$)									
	a	b	a	b	a	a	a	a	b
\bar{X}	3,2	1,4	2,3	0,8	2,3	2,9	2,3	2,0	0,7
s	1,4	1,5	1,2	0,9	1,1	3,0	1,0	1,4	0,9

Of-Lage (cm)									
(K-W $p = 0,0234$)									
	a	b	a	b	a	a	ab	a	b
\bar{X}	4,3	2,7	4,6	2,3	3,9	4,1	3,1	4,2	2,0
s	1,7	1,7	2,1	2,0	1,3	1,8	1,3	1,7	2,0

Häufigkeit der Humusformen (absolut und in Prozent)									
L-Mu	0	0	0	0	0	0	0	0	1
%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0
F-Mu	0	8	1	13	0	1	0	1	4
%	0,0	32,0	2,5	32,5	0,0	10,0	0,0	10,0	40,0
muMo	0	3	0	5	0	3	1	1	0
%	0,0	12,0	0,0	12,5	0,0	30,0	5,0	10,0	0,0
Mo	9	8	8	13	4	2	14	5	3
%	36,0	32,0	20,0	32,5	40,0	20,0	70,0	50,0	30,0
roMo	15	5	21	9	6	1	5	3	2
%	60,0	20,0	52,5	22,5	60,0	10,0	25,0	30,0	20,0
RH	1	1	10	0	0	3	0	0	0
%	4,0	25,0	0,0	0,0	30,0	0,0	0,0	0,0	
F-RH	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Abkürzungen: K-W: Kruskal-Wallis *H*-Test; \bar{X} : Mittelwert; s: Standardabweichung;

L-Mu L-Mull, F-Mu F-Mull, muMo mullartiger Moder, Mo typischer Moder, roMo rohhumusartiger Moder, RH Rohhumus, F-RH Streunutzungs-Rohhumus.

4.3 Zusammenhänge zwischen organischen Auflagen und Mineralboden

4.3.1 Zusammenhänge zwischen den im Mineralboden gemessenen Variablen

Tabelle 4.6: Korrelationsmatrix der Variablen im Mineralboden (0–5 cm) für den ausreißerbereinigten Datensatz ($n = 300$), jeweils R nach Spearman. Signifikanz $R^* p < 0,05$, $** p < 0,01$.

	Variablen im Mineralboden										
	pH H_2O	pH $CaCl_2$	Ca	Mg	K	C	N	P	C/N	C/P	N/P
pH H_2O	-	0,72**	0,18**	0,35**	0,27**	-0,14**	0,01	0,15**	-0,41**	-0,38**	-0,21**
pH $CaCl_2$	0,72**	-	0,32**	0,70**	0,57**	0,06	0,23**	0,39**	-0,46**	-0,43**	-0,24**
Ca	0,18**	0,32**	-	0,24**	0,07	0,24**	0,25**	0,40**	-0,03	-0,19**	-0,19**
Mg	0,35**	0,70**	0,24**	-	0,83**	0,24**	0,37**	0,49**	-0,36**	-0,32**	-0,17**
K	0,27**	0,57**	0,07	0,83**	-	0,32**	0,39**	0,43**	-0,18**	-0,12*	-0,06
C	-0,14**	0,06	0,24**	0,24**	0,32**	-	0,93**	0,72**	0,25**	0,43**	0,36**
N	0,01	0,23**	0,25**	0,37**	0,39**	0,93**	-	0,77**	-0,01	0,27**	0,40**
P	0,15**	0,39**	0,40**	0,49**	0,43**	0,72**	0,77**	-	-0,09	-0,27**	-0,23**
C/N	-0,41**	-0,46**	-0,03	-0,36**	-0,18**	0,25**	-0,01	-0,09	-	0,47**	-0,04
C/P	-0,38**	-0,43**	-0,19**	-0,32**	-0,12*	0,43**	0,27**	-0,27**	0,47**	-	0,84**
N/P	-0,21**	-0,24**	-0,19**	-0,17**	-0,06	0,36**	0,40**	-0,23**	-0,04	0,84**	-

Die Zusammenhänge aller im Mineralboden (0–5 cm) gemessenen Variablen des Datensatzes ohne Ausreißer (vgl. Abschnitt 3.3.3.1) verdeutlicht eine Korrelationsmatrix (Tab. 4.6).

Zwischen den unterschiedlich gemessenen pH-Werten H_2O und $CaCl_2$ (Tab. 4.6) besteht ein deutlicher Zusammenhang. Die Zusammenhänge zwischen pH-Werten und Neutralkationen untereinander sind uneinheitlich. Der pH_{CaCl_2} zeigt hier deutlich höhere Zusammenhänge mit den Neutralkationen, besonders mit Magnesium und Kalium, als der pH_{H_2O} . Magnesium und Kalium korrelieren sehr hoch miteinander, während Kalzium kaum mit Magnesium und gar nicht mit Kalium korreliert.

Sehr starke Zusammenhänge bestehen zwischen den an organisches Material gebundenen Elementen Kohlenstoff und Stickstoff ($R = 0,93$) sowie etwas schwächere aber deutliche mit Phosphor (jeweils $R > 0,7$). Dabei sind im Kontext dieser drei Elemente die Stoffquotienten, die Hinweise auf überproportionale Zusammenhänge geben können, besonders das C/P-Verhältnis schwer interpretierbar: So wird das C/P-Verhältnis mit steigendem C-Gehalt im Mineralboden weiter ($R = 0,43$).

Aus den Ergebnissen dieser Korrelationsanalyse kann auf überproportional sinkende Phosphorgehalte gegenüber Stickstoff im Mineralboden mit ungünstiger werdender Nährstoffsituation geschlossen werden, wie die starke Korrelation ($R = 0,84$) von N/P-Verhältnis mit C/P, aber auch die schwächeren Korrelationen mit Kohlenstoff und Stickstoff (Phosphor) zeigen.

Stickstoff- und in noch stärkerem Maße Phosphorgehalte im Mineralboden sind weitestgehend mit den Gehalten der Neutralkationen korreliert. Dagegen lassen sich aus den jeweils schwachen Korrelationen zwischen den Neutralkationen mit Kohlenstoff nur sehr eingeschränkt Bindungen an Kohlenstoff feststellen.

Niedrigere pH-Werte (H_2O und $CaCl_2$) hängen (mit Korrelationskoeffizienten jeweils um 0,4) leicht mit enger werdenden Stoffquotienten C/N und C/P, die auch miteinander

schwach positiv korreliert, sind zusammen.

4.3.2 Bodenchemische Charakterisierung der Humusformen

Die Humusformen (nach Arbeitskreis Standortkartierung, Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 1996) auf den untersuchten Flächen lassen sich mit dem chemischen Zustand des Oberbodens charakterisieren (Tab. 4.7). Sie unterscheiden sich global hochsignifikant (Kruskal-Wallis H -Test) in allen Variablen. Dies sind die pH-Werte (CaCl_2 und H_2O), die Neutralkationen Kalzium (ohne Ausreißer in Tab.4.3), Magnesium und Kalium, die Elemente Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor sowie die Stoffverhältnisse C/N, C/P, und N/P.

Eine besonders deutliche Abstufung der Humusformen erfolgt bei den meisten Variablen hierbei zwischen F-Mull, Mullartigem Moder, typischem Moder untereinander und zu den drei Humusformen Rohhumusartiger Moder, Rohhumus und F-Rohhumus, die sich in den Messwerten vieler Variablen untereinander kaum unterscheiden. Besonders pH-Werte (CaCl_2 und H_2O), Kalziumgehalte, und Gesamtphosphorgehalte im Oberboden zeigen dies im statistisch gut abgesicherten Vergleich der Mittelwerte. Etwas weniger deutlich ist dies auch noch bei den mittleren Magnesiumgehalten zu erkennen.

Bei den mittleren C/P-Verhältnissen sind diese Unterschiede etwas verschoben. F-Mull hebt sich hier statistisch mit engen C/P-Verhältnissen von Moder, Rohhumusartigem Moder, Rohhumus und F-Rohhumus ab. F-Rohhumus hebt sich mit dem weitesten C/P-Verhältnis statistisch bis auf Rohhumus von den übrigen Humusformen ab. Auffällig ist auch die hohe Streuung der Einzelwerte (vgl. der Standardabweichung) bei den Humusformen Rohhumusartiger Moder, Rohhumus und F-Rohhumus gegenüber F-Mull, Mullartigem Moder und Moder.

Die mittleren C/N-Werte liegen für alle Humusformen innerhalb eines engen Bereiches zwischen Werten von 19 und 24. Hier ist eine statistisch gut abgesicherte Trennung in günstigere mit engen (Mull, Mullartiger Moder, Moder) und ungünstigere mit weiten (Rohhumusartiger Moder, Rohhumus und F-Rohhumus) C/N-Werten erkennbar. Auffällig ist, dass die C/N-Verhältnisse des Mullartigen Moders geringfügig enger (statistisch nicht abgesichert) als die des F-Mulls sind, und unter Rohhumus vergleichsweise die weitesten C/N-Verhältnisse vorherrschen.

Die mittleren Stickstoffgehalte im Mineralboden liegen für alle Humusformen in einem sehr engen Bereich zwischen 2–3 g/kg und hier lassen sich Mull und Moder mit höheren Gehalten statistisch abgesichert von Moder, Rohhumusartigem Moder und Rohhumus abtrennen, wobei F-Rohhumus wieder vergleichsweise hohe N-gehalte im Mineralboden vorweist.

Die mittleren N/P-Verhältnisse zeigen eine deutliche, meist statistisch abgesicherte Verengung im Mineralboden von Mullzustand gegenüber den anderen Humusformen, wobei sich der F-Rohhumus davon mit noch einmal deutlich weiteren mittleren N/P-Werten absetzt. Die Streuung der Werte ist im Gesamtvergleich der N/P-Verhältnisse bei den „ungünstigen“ Humusformen Rohhumusartiger Moder, Rohhumus und besonders bei F-Rohhumus etwas höher. Das vergleichsweise hohe N-P-Verhältnis des F-Rohhumus ist auf vergleichsweise hohe Stickstoffgehalte zurückzuführen (s. o.).

Kohlenstoff- und Kaliumgehalte im Oberboden erlauben kaum eine Differenzierung

4.3 Zusammenhänge zwischen organischen Auflagen und Mineralboden

Tabelle 4.7: Chemische Charakterisierung des Mineralbodens (0–5cm) für die Humusformen. Globaler Test mit Kruskal-Wallis H -Test (ohne L-Mull, da nur $n = 3$). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$, Mann-Whitney- U -Test).

	Humusform (N)						
	L-Mu (3)	F-Mu (48)	muMo (42)	Mo (105)	roMo (94)	RH (22)	F-RH (21)
pH_{H₂O}		(K-W $p < 0,0001$)					
	–	a	b	ce	de	cde	f
Q_1	4,40	3,77	3,64	3,58	3,51	3,51	3,32
\bar{X}	4,97	3,90	3,83	3,68	3,59	3,62	3,51
\bar{X}	4,24	3,91	3,78	3,66	3,57	3,59	3,45
Q_3	4,99	4,26	4,04	3,79	3,68	3,70	3,60
pH_{CaCl₂}		(K-W $p < 0,0001$)					
	–	a	b	c	d	d	d
Q_1	3,70	3,14	3,03	2,95	2,78	2,83	2,77
\bar{X}	4,24	3,31	3,16	3,06	2,88	2,89	2,88
\bar{X}	3,58	3,28	3,15	3,03	2,88	2,88	2,88
Q_3	4,30	3,58	3,40	3,18	3,02	2,93	2,99
C (mg/g)		(K-W $p = 0,0005$)					
	–	abc	ab	bc	d	abcd	abc
\bar{X}	43,4	50,5	51,9	46,6	41,0	49,8	55,5
s	8,0	15,5	20,8	21,1	19,1	31,3	24,1
N (mg/g)		(K-W $p < 0,0001$)					
	–	ae	ae	bde	cd	bcde	abde
\bar{X}	2,25	2,51	2,72	2,25	1,85	2,09	2,44
s	0,52	0,71	1,06	0,99	0,75	1,41	0,96
P (mg/g)		(K-W $p < 0,0001$)					
	–	a	a	bd	cd	bcd	bcd
\bar{X}	0,32	0,29	0,26	0,21	0,18	0,19	0,21
s	0,14	0,10	0,11	0,10	0,08	0,10	0,11
C/N		(K-W $p < 0,0001$)					
	–	abc	ab	ac	df	ef	def
\bar{X}	19,4	20,1	19,2	20,8	22,0	23,9	22,5
s	1,1	2,7	2,7	3,3	4,3	3,6	3,1
C/P		(K-W $p < 0,0001$)					
	–	ab	abce	bcde	cde	bcdef	ef
\bar{X}	145	181	203	228	232	251	283
s	44	57	57	72	84	97	126
N/P		(K-W $p = 0,0015$)					
	–	a	bcd	bcd	bc	abcd	bd
\bar{X}	7,5	9,0	10,7	10,9	10,6	10,4	12,5
s	2,5	2,7	3,0	2,7	3,1	3,8	4,7
Ca (mg/g)		(K-W $p < 0,0001$)					
	–	a	b	c	d	d	d
\bar{X}	0,95	0,64	0,29	0,17	0,13	0,13	0,13
s	0,65	0,74	0,32	0,14	0,08	0,10	0,14
Mg (mg/g)		(K-W $p < 0,0001$)					
	–	a	a	ab	c	c	cb
\bar{X}	1,48	1,11	1,05	1,02	0,79	0,70	0,86
s	0,06	0,34	0,29	0,42	0,38	0,49	0,34
K (mg/g)		(K-W $p = 0,001$)					
	–	a	a	a	b	ab	a
\bar{X}	2,77	2,17	2,30	2,09	1,67	1,86	2,27
s	0,99	0,86	0,82	0,87	0,85	1,47	0,77

Abkürzungen: K-W: Kruskal-Wallis H -Test; \bar{X} : Mittelwert; s : Standardabweichung; \bar{X} : Median; Q_1, Q_3 : Erstes (25 %), bzw. drittes (75 %) Quartil.

L-Mu L-Mull, F-Mu F-Mull, MuMo mullartiger Moder, Mo typischer Moder, roMo rohhumusartiger Moder, RH Rohhumus, F-RH Streunutzungs-Rohhumus.

der Humusformen. Rohhumusartiger Moder weist bei beiden etwas niedrigere Werte auf. Die übrigen Humusformen liegen innerhalb eines engen Wertebereichs.

4.3.3 Zusammenhänge zwischen Umweltvariablen und Auflagemächtigkeit

Tabelle 4.8: Rangkorrelationen nach Spearman der Umweltvariablen Licht, bodenchemischer Messwerte im Mineralboden 0–5 cm und summierter Mächtigkeit der Deckungen der Baumarten Tanne, Kiefer und Fichte in den Baumschichten mit der Mächtigkeit der organischen Auflagen (Oh+Of) (ausreißerbereinigter Datensatz, $n = 300$).

Variablen	R (Spearman)
Oh+Of PACL ¹	-0,004
Oh+Of pH CaCl ₂	-0,436**
Oh+Of pH H ₂ O	-0,383**
Oh+Of Kohlenstoff	-0,211**
Oh+Of Stickstoff	-0,334**
Oh+Of Phosphor	-0,386**
Oh+Of Kalzium	-0,453**
Oh+Of Magnesium	-0,245**
Oh+Of Kalium	-0,112
Oh+Of C/N	0,336**
Oh+Of C/P	0,213**
Oh+Of N/P	0,052
Oh+Of Abies	-0,130*
Oh+Of Pinus	0,124*
Oh+Of Picea	0,122*

¹Lichtanteil gegenüber Freiland (percent above canopy light)

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ Signifikanz

Hier sollen Zusammenhänge zwischen der Mächtigkeit der organischen Auflage und dem chemischen Oberbodenzustand aufgezeigt werden.

Tabelle 4.8 zeigt einfache Korrelationen nach Spearman (ausreißerbefreit) dieser Variablen jeweils mit der Gesamtmächtigkeit der organischen Auflage (Oh+Of). Dabei zeigen besonders die pH-Werte (CaCl₂) und Kalziumgehalte mit ihren Korrelationskoeffizienten einen negativen Zusammenhang zur Auflagemächtigkeit. Weiterhin bestehen negative Zusammenhänge mit pH (H₂O), dem Stickstoffgehalt und ein positiver mit dem C/N-Verhältnis.

Die Zusammenhänge zu den Baumartenanteile in den Baumschichten, Kohlenstoff, Magnesium und dem C/P-Verhältnis sind jeweils zu gering für eine deutliche Aussage. Lichtanteil (PACL), N/P-Verhältnis und Kalium stehen eindeutig in keinen Zusammenhang zu den Auflagenmächtigkeiten.

Weiterhin lässt sich die Mächtigkeit der organischen Auflagen mit den Variablen pH (H₂O, delogarithmiert), Phosphor (\log_{10}), Kalzium (\log_{10}) und dem C/N-Verhältnis im Oberboden (0-5 cm) durch ein multiples lineares Regressionsmodell (vgl. Abschnitt 3.3.3.4) mit folgender Gleichung beschreiben:

$$\sqrt{(Oh + Of)} = -0,618 + 1476,259 \cdot H_{H_2O}^+ - 0,950 \cdot (\log_{10} P) - 0,952 \cdot (\log_{10} Ca) + 0,048 \cdot C/N$$

4.3 Zusammenhänge zwischen organischen Auflagen und Mineralboden

Tabelle 4.9: Lineares Regressionsmodell zur Erklärung der Mächtigkeit der organischen Auflagen – β -Gewichte und statistische Kenngrößen. Zur Methode vgl. 3.3.3.4, S. 37 ff.

Das Modell $n = 260$			
R^2			0,371
R^2 korrigiert			0,361
Durbin-Watson d			1,566
P für Autokorrelation			0,211
Gesamtmodell $F = 37,5$ ($n = 255; 4$) $p \leq$			0,0000
Standardfehler der Schätzung:			0,59

Variable	β	Variablen	
		Standardfehler β	t ($n = 255$)
Konstante	-0,618 *	0,284	-2,18
H ⁺	0,192**	0,056	3,432
P (\log_{10})	-0,222**	0,053	-4,193
Ca (\log_{10})	-0,320**	0,054	-5,894
C/N	0,217**	0,054	3,998

H⁺ in H₂O

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ Signifikanz

Dabei konnten weder durch schrittweisen Einschluss geeigneter Variablen (vgl. Tab. 3.8), noch durch weitere iterative Verfahren, weitere gut interpretatierbare Regressionsgleichungen erstellt werden (vgl. Abschnitt 3.3.3.4).

Alle statistischen Größen des Modells sind signifikant, die Werte sind leicht autokorreliert und es lassen sich damit ca. 36% der Varianz der (hier quadratwurzeltransformierten) Auflagenmächtigkeiten erklären (Tab. 4.9). Das Modell hat Gültigkeit über den gesamten Prognosebereich und die Validierung mit einer unabhängigen Stichprobe liefert vergleichbare Mittelwerte (Abb. C.1(a), S. 135). Die Korrelation der Modell- mit beobachteten Werten der unabhängigen Teststichprobe zeigt mit $R = 0,58$ (Spearman) einen deutlichen Zusammenhang (Abb. C.1(a), S. 135). Dieser multiple Zusammenhang ist somit deutlich stärker, als jede einzelne Korrelation der Variablen (Tab. 4.8). Das als Berechnungsgrundlage verworfene Ausreißerkollektiv zeigt vergleichbare und statistisch nicht unterscheidbare Mittelwerte für Modell- und Beobachtungswerte. In allen drei Datenkollektiven führt das Regressionsmodell zu einer leichten Unterschätzung der beobachteten Werte (Abb. C.1(a), S. 135). Weitere statistische Kenngrößen des Modells finden sich in Tabelle 4.9.

Die Beträge der standardisierten β -Gewichte der Regressoren verdeutlichen, mit welchem Einfluss sie zur Erklärung des Modells beitragen. In diesem Zusammenhang ist wie auch bei den einfachen Korrelationen (Tab. 4.8) der Kalziumgehalt (\log_{10}) im Mineralboden der stärkste Einflussfaktor, gefolgt von den Variablen Phosphorgehalt (\log_{10}), C/N-Verhältnis und pH-Wert (H₂O), mit vergleichbar großen standardisierten β -Gewichten. Diese Variablen lassen auch in den einfachen Korrelationen Zusammenhänge zu der Mächtigkeit der organischen Auflagen erkennen.

Auch im multiplen Zusammenhang tragen Licht (PACL) und die Baumartenanteile

4 Ergebnisse

zu keiner weiteren Erklärung der Streuung der organischen Auflagen bei. Zusammenfassend gilt somit, dass geringe organische Auflagen an günstige Nährstoffverhältnisse im Oberboden gekoppelt sind. Diese sind in diesem Zusammenhang besonders durch hohe pH-Werte, hohe Kalzium-, Phosphor- und Stickstoffgehalte sowie enge C/N-Verhältnisse charakterisiert.

4.3.4 Zusammenfassende Betrachtung

Die verschiedenen Humusformen können bei einer gröberen Unterscheidung in günstige (L-Mull, F-Mull und Mullartiger Moder), mittlere (Moder) und schlechte (Rohhumusartiger Moder, Rohhumus und F-Rohhumus) gut durch pH-Wert (CaCl_2), Kalzium-Phosphor-, Magnesiumgehalte und C/N-Verhältnisse des Oberbodens charakterisiert werden. Der durch historische Streunutzung bedingte F-Rohhumus ist dabei durch besonders weite C/P- und N/P-Verhältnisse im Oberboden zusätzlich abgrenzbar.

Analog hängt die Mächtigkeit der organischen Auflagen besonders stark mit pH-Werten (CaCl_2 , H_2O), den Gehalten von Phosphor, Stickstoff, Kalzium und dem C/N-Verhältnis im Oberboden zusammen und lässt sich anhand von pH (H_2O), Phosphor- sowie Kalziumgehalten und dem C/N-Verhältnis mit einem linearen Regressionsmodell beschreiben.

4.4 Auf Düngung mit unterschiedlicher Stetigkeit reagierende Kraut- und Moosarten

In diesem Abschnitt werden alle Arten Moos- und Krautschicht hinsichtlich der Unterschiede in ihrer Häufigkeit auf gedüngten und ungedüngten Flächen über alle fünf Untersuchungsgebiete betrachtet (vgl. Abschnitt 3.3.4.1). Deckungsunterschiede einzelner Arten werden hierbei nicht berücksichtigt.

4.4.1 Durch Düngung geförderte Arten

Die an gedüngte Flächen gebundenen Arten (Tab. 4.10 und 4.11) lassen sich hinsichtlich ihrer Verteilung über ungedüngte und gedüngte Flächen in vier Einstufungen einteilen. Die für die Einteilung verwendeten Kürzel sind diesen Tabellen und in Abschnitt 3.3.4.1 erklärt.

4.4.1.1 Arten der Gruppe Ds++

Die am stärksten an gedüngte Flächen gebundenen Arten Ds++ (Tab. 4.10) verzeichnen (abgesehen von der bodenchemisch abweichenden und daher schlecht vergleichbaren Düngefläche L1 C, vgl. Abschnitt 3.3.4.1) stets eine Zunahme auf der gedüngten Fläche gegenüber der jeweils zugeordneten ungedüngten Fläche. Bei den hier eingeordneten Arten überwiegen Arten der Krautschicht wie die Farne *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris carthusiana*, *Dryopteris dilatata* und *Pteridium aquilinum*, Süß- und Sauergräser wie *Carex pilulifera*, *Festuca altissima* und *Milium effusum*, die Kräuter *Fragaria vesca*, *Galium harcynicum* und *Oxalis acetosella* und die Sträucher oder Halbsträucher *Corylus avellana* und *Rubus fruticosus* agg. . Die drei Moosarten *Eurhynchium striatum*, *Hylocomium splendens* und *Thuidium tamariscinum* gehören ebenfalls zu dieser Gruppe.

Die Arten *Dryopteris dilatata* und *Hylocomium splendens* können aufgrund ihres durchgängigen Vorkommens auch auf ungedüngten Flächen zum typischen Artinventar gezählt werden, während die übrigen Arten dieser Gruppe einen sehr deutlichen Schwerpunkt auf gedüngten Flächen haben. Dabei zeigen einige Arten, die mit sehr geringer Stetigkeit im Gesamtdatensatz ($n = 335$) vorhanden sind, in dieser Gruppe Ds++ oft eine besonders starke Bindung an gedüngte Flächen, da sie auf ungedüngten Flächen überhaupt nicht vorkommen (*Corylus avellana*, *Fragaria vesca*, *Galium harcynicum*, *Milium effusum* und *Pteridium aquilinum*), was zum Teil sicher auch eine Konsequenz der geringen Stetigkeit insgesamt ist. Kritisch ist die Einstufung der Buchenjungwüchse (*Fagus sylvatica*) in diese Gruppe zu sehen, da auf einigen Flächen Buche vorgebaut wurde und die Ergebnisse dadurch möglicherweise verzerrt sind.

4.4.1.2 Arten der Gruppe Ds+

Die Arten der Artengruppe Ds+ (Tab. 4.10) zeigen statistisch bedingt eine weniger starke Bindung an gedüngte Flächen als die Artengruppe Ds++, denn hier ist das Kriterium etwas lockerer (vgl. Abschnitt 3.3.4.1 S. 40). Eine Verschiebung ihres Schwerpunktes hin zu gedüngten Flächen ist hier besonders bei den im Gesamtdatensatz ($n = 335$) und auf allen Flächen stetig vorkommenden Arten der Krautschicht *Deschampsia flexuosa* und *Sorbus aucuparia* und den Moosen *Lophocolea bidentata*, *Plagiothecium undulatum*,

Tabelle 4.10: Arten (wissenschaftliche Namen in Tab. A.1, S. 130), die in der Gesamtbetrachtung signifikant häufiger (χ^2 -Test) auf gedüngten Flächen vorkommen (Ds++ und Ds+). Zur Einteilung vgl. Abschnitt 3.3.4.1; die kursiv gesetzten Flächen sind aufgrund von Besonderheiten für die Einteilung nicht berücksichtigt worden. Zur Düngung der Flächen vgl. Tab. 3.3, 3.4.

Art	Untersuchungsflächen und Anzahl der Aufnahmen																
	L1					L2		L3		L4		V1					
U	A	C	E	F	FGI	HJK	B	D	U	D	U	D	U	D	D+		
35	30	10	20	15	25	5	5	5	25	25	40	40	10	10	10		
Ausnahmslos Zunahme, häufig signifikant auf gedüngten Flächen (Ds++)																	
5COBavel	1+		4+***		1+	2+		1+		12+***		11+***		2+	3	5+*	6+*
5RUBfrut	5+*		3+*		8+*	10+***		1+***		5+*	3	15+***		5+***	1	-	4+**
5ATHHh										10+***	2	10+*		1+			
5DRYcart	9	12+	-	11+*	15+***	15+***	3+	3+	3	17+***	33	38+	4+*	10+	10+	5	7+*
5DRYdlla										2+		22+***		2+			1+
5PRAvesc	2+	1+		3+*	3+***	1+	1+***	2+***	6	14+***		15+***		4+*	2	2+*	1+
5OXAlharc	2+	1+		3+*	3+***	7+***						16+***		4+*	2	1	4+
5PTEagui	4	9+	1-	12+***	4+	16+***	1+	3+***	2	13+***	1	15+***	1	1	1	2	2+*
5CARpflu										15+***	1	4+*		1			1
5PESalt		1+				2+		1+***	4	5+*	4	9+		1+	7	1+	2+
5MILeffh						3+*		1+***	8	22+***	16	16+	33+***	7	10+	13	8+
6EUFstri						2+		1+***	4	8+***	16	33+***		7	10+	3	3+
6HYLspie	25	29+***	9+	19+*	11+	23+*	5+	5+	20	22+	16	33+***	7	10+	13	8+	10+*
6THUtama		1+				6+***				8+***							4+
Häufig eine signifikante Zunahme, Abnahme niemals signifikant auf gedüngten Flächen (Ds+)																	
5ACEpsen	1+	5+*		1+	1+	1+	1+	1+	1	1+	1	-			1	-	2+*
5BETpend	6	12+*	-	4+	4+	5+	3-	2+	5	2+	5	2-		3	1-	-	-
5FAGsylv	1	-		1+	1+	2+	2+	2+	2	6+*	2	6+*		1	1	1	3+
5FRAhm	13	11-	2-	8+	8+	16+*	2+	4+	2	20+***		1+		1	1	2-	4+
5SORaenc	5	6+	2+	6+	6+	5+	2+	2+		1+	2	1+	8+***	1	4+*	7	
5BLESpic	1	-				3+	-	-		1+		3+		1+	1		
5DRYfhl		2+				1+	3+*			21+***	24	35+***		8	10+	17	6-
5DESflex	31	24-	10+	20+	15+	21-	5+	5+	10	12+***	23	15-		2	1-	1	8-
6DIOche	1	2+		6+***	1+	5+*	-	-	2	1-	13	19+		1	9+***	1	1+
6PILAndu	19	12-	4-	11+	11+	11-	5+	1-	3	12+***	13	13		1	10+*	1	-
6POLform	32	28+	7-	20+	15+	24+	5+	5+	2	22+***	13	30-		6	10+*	19	5-
6RHYlore	19	24+*	10+***	16+	15+***	23+***	5+	4+	17	16+*	38	40+		10	10	8+*	9+***
6SCICpam	15	25+***	5+	12+	14+***	19+*	3+	4+	4	5+*	2	2		10	4+*	5	-
6LETRept										2-	13	10-		1	1	2+	1+
6LOPbde	21	22+	3-	10-	5-	18+	5+	5+	15	10-	18	20+		7	5-	6+*	7+***
6LOPbete		1+			2+	1+	-	-		5+*	3	1-		2	3+	2	2+*
6PLAaspl	1																

+ Zunahme, - Abnahme, * ($p < 0,05$) signifikante oder ** ($p < 0,01$) hochsignifikante Änderung der Häufigkeit (χ^2 -Test) gegenüber der umgedüngten Vergleichsfläche.

4 Ergebnisse

Polytrichum formosum, *Rhytidiadelphus loreus* und *Scleropodium purum* zu beobachten. Die übrigen Arten dieser Gruppe (vgl. Tab. 4.10 und Tab. A.1, S. 130) sind nur in geringer Stetigkeit vorhanden und sind nicht auf allen fünf Untersuchungsflächen vertreten.

4.4.1.3 Arten der Gruppe D+

Die Vertreter der Artengruppe D+ (Tab. 4.11) nehmen auf gedüngten Flächen zu, allerdings nicht signifikant (Fläche L1 D ist nicht für die Gruppenbildung relevant, vgl. Abschnitt 3.3.4.1, S.40). Den in der Gruppe D+ eingeordneten Arten ist gemeinsam, dass sie nur in sehr geringer Stetigkeit exklusiv auf gedüngten Flächen vorkommen. Das Vorkommen dieser Arten auf gedüngten Flächen hat Einzelfallecharakter und aufgrund fehlender statistischer Absicherung auch Zufallscharakter. Jedoch ist die Anzahl der hier eingeordneten Arten deutlich höher als die der Gruppe D- (vgl. Abschnitt 4.4.2.3).

In dieser Gruppe finden sich Gehölze (*Betula pubescens*, *Sambucus racemosa*, *Tilia cordata*) sowie viele vor allem krautige Arten und einige Moose (wissenschaftliche Namen vgl. Tab. A.1, S. 130). Ebenso gibt es hier den Einzelfund einer Bodenflechte (*Peltigera spec.*).

4.4.2 Durch Düngung abnehmende Arten

4.4.2.1 Arten der Gruppe Ds- -

In dieser Gruppe (Tab. 4.12), die eine sehr starke Bindung der Arten an ungedüngte Flächen aufzeigt, finden sich nur Eiche in der Krautschicht (*Quercus*) und das Torfmoos *Sphagnum russowii*. Diese beiden Arten sind nicht auf allen Untersuchungsflächen vertreten.

4.4.2.2 Arten der Gruppe Ds-

In dieser Artengruppe (Tab. 4.12), die weniger stark eine Bindung an ungedüngte Flächen zeigt als Ds- -, sind vor allem Moose vertreten. Daneben finden sich die beiden Zwergsträucher *Vaccinium vitis-idaea* und *Calluna vulgaris* und das Pfeifengras (*Molinia caerulea*) seltener auf gedüngten Flächen. Diese Arten sind nicht im gesamten Flächenspektrum vorhanden, sondern haben ihren Schwerpunkt vor allem auf Untersuchungsfläche L1 (vgl. Tab. 4.12).

Unter den Moosen finden sich drei Torfmoosarten, von denen besonders *Sphagnum girgensohnii* eine relativ hohe Stetigkeit im gesamten Datensatz ($n = 335$) vorweist. Weitere Vertreter dieser Gruppe mit konstantem Vorkommen in allen fünf Untersuchungsflächen bei hoher Stetigkeit sind *Dicranum scoparium*, *Pleurozium schreberi* und das Lebermoos *Bazzania trilobata*. Auch *Hypnum cupressiforme* und *Leucobryum glaucum* zählen dazu. Trotz eines Verbreitungsschwerpunktes auf ungedüngten Flächen, sind alle Arten dieser Gruppe im direkten Vergleich noch auf gedüngten Flächen vorhanden.

4.4.2.3 Arten der Gruppe D-

Im Vergleich mit Vertretern der Artengruppe D+ (Tab. 4.11), die demselben Kategorisierungsprinzip wie hier D- (Tab. 4.12) folgen, nur dass diesmal die Arten seltener statt

4.4 Auf Düngung mit unterschiedlicher Stetigkeit reagierende Kraut- und Moosarten

Tabelle 4.12: Arten (wissenschaftliche Namen in Tab. A.1, S.130), die seltener auf gedüngten Flächen vorkommen (Ds-, Ds- und D-, Erläuterung: Abschnitt 3.3.4.1, S.40) und ihre Häufigkeit auf allen Untersuchungsflächen. Zur Düngung der Flächen vgl. Tab. 3.3, 3.4.

Art	Untersuchungsflächen und Anzahl der Aufnahmen																														
	L1							L2							L3		L4		V1												
	U	A	C	E	FGI	HJK	B	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	
	35	30	10	20	15	25	5	5	25	25	40	40	10	10	20	10	10	10	20	10	10	10	20	10	10	10	20	10	10	10	
	Ausnahmslos Abnahme, häufig signifikant auf gedüngten Flächen (Ds - -)																														
5QUEspec	5	3-	1-	-	-	-	-	-	3	2-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6SPHruss	8	6-	-	-	-	3-	1-	-	3	2-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Häufig eine signifikante Abnahme, Zunahme niemals signifikant auf gedüngten Flächen (Ds-)																														
5CALvulg	19	19+	4-	6-	7-*	2-*	2-	1-	2	5+	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5VACviti	19	21+	10+*	9-	7-	5-*	-	-	2	5+	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5MOLcaer	11	6-	4+	1-*	6+	7-	-	-	20	22+	35	33-	10	9-	19	10+	7-	7-*	20	22+	35	33-	10	9-	19	10+	7-	7-*	20	22+	
6DICscop	33	23-*	10+	19+	13-	20-	4-	4-	7	12+	37	33-	7	4-	20	10+	7	4-	20	22+	35	33-	10	9-	19	10+	7-	7-*	20	22+	
6HYPeupr	2	3+	-	-	1+	-	-	-	7	12+	37	33-	7	4-	20	10+	7	4-	20	22+	35	33-	10	9-	19	10+	7-	7-*	20	22+	
6LEUglau	5	5+	4+	2-	3+	-	-	-	18	8-*	6	2-	1	1	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
6PLEschr	35	27-	10	18-	15	13-*	5	5	25	13-*	17	14-	8	8	13	9+	8	8	13	9+	8	8	13	9+	8	8	13	9+	8	8	
6SPHcapi	7	8+	-	1-	-	-	1	1	2	1+	9	9	3+	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	
6SPHging	24	12-*	3-*	10-	11+	5-*	3-	3-	11	1+	9	9	3+	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	
6SPHquin	2	2+	1+	-	-	-	-	-	11	1+	9	9	3+	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	13	9+	2	2	
6BAZtril	32	18-*	10+	18-	11-	16-*	5+	4-	23	15-*	37	30-*	10	5-*	1	-	1+	1+	13	9+	8	8	13	9+	8	8	13	9+	8	8	
	Nur Abnahme (nicht signifikant) auf gedüngten Flächen (D-)																														
5SALcapr	1	-	-	-	-	-	-	-	6	3-	5	1-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5MELprat																															
6DICmont																															

+ Zunahme, - Abnahme, * ($p < 0,05$) signifikante oder ** ($p < 0,01$) hochsignifikante Änderung der Häufigkeit (χ^2 -Test) gegenüber der ungedüngten Vergleichsfläche.

4 Ergebnisse

häufiger auf gedüngten Flächen vorkommen, fällt die mit drei Vertretern wesentlich geringere Anzahl eingestufter Arten gegenüber D+ (29 Arten) auf. Auch bei der Artengruppe D- gilt analog zur Gruppe D+, dass das Vorkommen dieser Arten Einzelfallcharakter und aufgrund fehlender statistischer Absicherung auch Zufallscharakter hat (vgl. Abschnitt 4.4.1.3).

4.4.3 Auf Düngung mit Stetigkeit indifferent reagierende Arten (I)

Die in Tabelle 4.13 aufgeführten Arten der Gruppe I passen in keine der oben angeführten Gruppen. Deshalb ist das indifferente Verhalten hinsichtlich höherer Stetigkeit auf gedüngten oder ungedüngten Flächen heterogen. Arten, die vereinzelt und insgesamt mit geringer Stetigkeit vorkommen, sind wohl eher zufällig auf gedüngten oder ungedüngten Flächen eingestreut. Bei Arten mit hoher Stetigkeit wie *Vaccinium myrtillus*, aber auch bei *Hypnum jutlandicum*, ist eine langfristige Reaktion der Deckungswerte auf Düngung denkbar, die mit Präsenz-Absenzvergleichen nicht fassbar ist. Dies gilt auch für die in dieser Gruppe eingeordneten Jungwüchse von *Abies alba* und *Picea abies*, die auch mit hoher Stetigkeit im Datensatz vertreten sind.

4.4.4 Vergleich der Artengruppen mit R- und N-Zeigerwerten nach Ellenberg

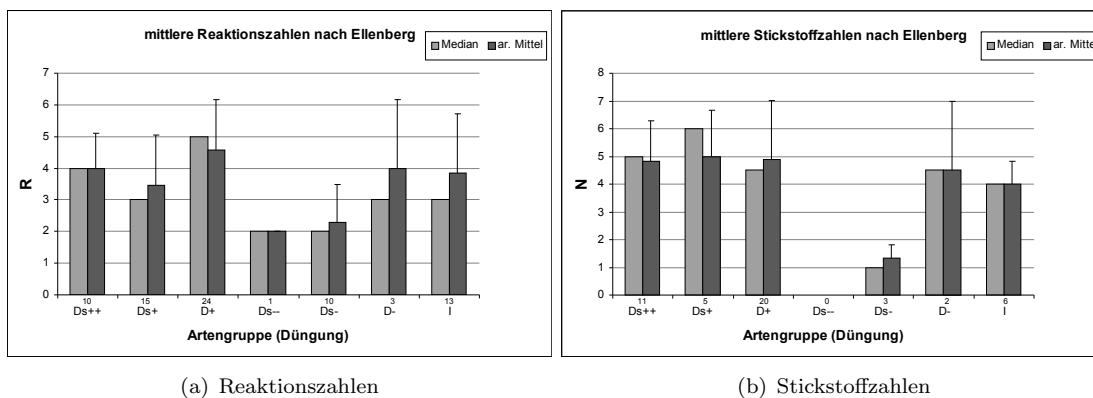


Abbildung 4.1: Mediane und arithmetische Mittel (mit Standardabweichung) für Reaktions- (4.1(a)) und Stickstoffzahlen (4.1(b)) nach Ellenberg et al. (1992) für unterschiedlich auf Düngung reagierende Artengruppen (Erläuterung der Einteilung in Abschnitt 3.3.4.1).

Die Mittelwerte und Mediane der Reaktionszahlen für die einzelnen Artengruppen (Abb. 4.1(a), S. 70; Tab. 4.14, S. 72) reichen vom Wert 2 (zwischen den Starksäure- und Säurezeigern stehend) für die Artengruppen Ds-- (nur *Sphagnum russowii*) und Ds- bis in den Wertebereich 5 (Artengruppe D+) für Mäßigsäurezeiger, die auf stark sauren und auf neutralen Böden selten sind. Die übrigen Artengruppen stehen mit Werten zwischen 3 und 4 dazwischen.

Beim Vergleich der Mittelwerte und Mediane der Zeigerwerte für die Reaktionszahl nach Ellenberg et al. (1992) zwischen den Artengruppen (Abb. 4.1) fallen besonders die Gruppen Ds-- und Ds- auf, die mit dem Wert 2 zwischen den Starksäurezeigern und

4.4 Auf Düngung mit unterschiedlicher Stetigkeit reagierende Kraut- und Moosarten

Tabelle 4.13: Arten (wissenschaftliche Namen in Tab. A.1, S. 130), die gegenüber Düngung ein indifferentes Verhalten zeigen (I, Erläuterung: Abschnitt 3.3.4.1, S. 40) und ihre Häufigkeit auf allen Untersuchungsflächen. Zur Düngung der Flächen vgl. Tab. 3.3, 3.4.

Art	Untersuchungsflächen und Anzahl der Aufnahmen (I)																	
	L1						L2		L3		L4		V1					
	U	A	C	E	FGI	HJK	B	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D
5ABlalba	28	28+	4*	19+	15+	21+	5+	5+	24	25+	38	39+	10	10	20	8-	10	10
5PICabie	30	24-	10+	16-	15+	24+	5+	5+	23	24+	28	28	10	9-	19	9-	9-	10
5PINstro	2	6+	1+	5+*	2+	1-	1+	1+	6	14+*	7	7	4	-	2	-	-	-
5PINsylv	4	5+	-	4+	2+	5+	-	-		1+	4	3+	1+	1+	1	-	-	2
5SORaria		2+		1+		2+				1+	4	10+			4	-	2	
5RUBidae										1+					1	-	-	
5PREpupp										1+					1	-	-	
5VACmyrt	35	30	10	20	15	25	5	5	25	25	40	40	10	10	20	10	10	10
5CARsylv	1	2+	-	1+	-	1+	-	-										
5JUNeffu	1	-	-	1+	-	1+	-	-				2+			1	-	-	1+
6BRAruta	2	5+	-	-	-	1-	-	-	1	3+	3	7+			1	-	-	
6DICdenu	2	3+	1+	-	-	-	-	1+			3	4+			7	6+	1-	
6HERseli	1	-	-	-	-	-	1+	-	3	5+	3	2-			3	4+		
6HYPjutl	31	25-	10+	18+	9-	19-	5+	3-	18	14-	8	8			3	-	-	
6PLAcurv											1	3+			1	-	-	
6PLAlaet	1	3+	-	-	1+	-	-	-			20	18-			3	-	-	
6PTicris	1	1+	-	-	-	-	-	-							2	4+		
6DICpoly										1+								

+ Zunahme, - Abnahme, * ($p < 0,05$) signifikante oder ** ($p < 0,01$) hochsignifikante Änderung der Häufigkeit (χ^2 -Test) gegenüber der ungedüngten Vergleichsfläche.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.14: Bedeutung der Zeigerwerte für Reaktions- und Nährstoffzahlen (Ellenberg et al., 1992).

Reaktionszahl R	
1	<i>Starksäurezeiger</i> , niemals auf schwachsauren bis alkalischen Böden vorkommend
2	zwischen 1 und 3 stehend
3	<i>Säurezeiger</i> , Schwergewicht auf sauren Böden, ausnahmsweise bis in neutralen Bereich
4	zwischen 3 und 5 stehend
5	<i>Mäßigsäurezeiger</i> , auf stark sauren wie auf neutralen bis alkalischen Böden selten
6	zwischen 5 und 7 stehend
7	<i>Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger</i> , niemals auf stark sauren Böden
8	zwischen 7 und 9 stehend, d. h. meist auf Kalk weisend
9	<i>Basen- und Kalkzeiger</i> , stets auf kalkreichen Böden
Stickstoffzahl, Nährstoffzahl N	
1	<i>Stickstoffärmste</i> Standorte anzeigend
2	zwischen 1 und 3 stehend
3	auf <i>stickstoffarmen</i> Standorten häufiger
4	zwischen 3 und 5 stehend
5	<i>mäßig stickstoffreiche</i> Standorte anzeigend, auf armen und reichen seltener
6	zwischen 5 und 7 stehend
7	an <i>stickstoffreichen</i> Standorten häufiger als auf mittelmäßigen und ausnahmsweise auf ärmeren
8	ausgesprochener <i>Stickstoffzeiger</i>
9	an <i>übermäßig stickstoffreichen</i> Standorten konzentriert (Viehlägerpflanze, Verschmutzungszeiger)

Säurezeigern stehen. Die Aussage für die Gruppe Ds- - beschränkt sich dabei nur auf die Art *Sphagnum russowii*, da die ebenso in dieser Gruppe eingeordnete Baumart *Quercus spec.* als Baumart aufgrund des breiten möglichen Spektrums standörtlich schwierig zu beurteilen ist (Ellenberg et al., 1992). *Sphagnum russowii* (Ds-) passt von der Höhe der Werte (R und N) gut zur Gruppe Ds-.

Die Reaktionszahlen (Abb. 4.1(a)) unterscheiden sich innerhalb der drei Gruppen der durch Düngung geförderten Arten etwas. So liegen Median und Mittelwert der Gruppe D+ mit einem Wert um 5 (Mäßigsäurezeiger) hier im höchsten Bereich auch im Gesamtvergleich aller Artengruppen. Die Mittelwerte und Mediane um die Werte 3 und 4 (zwischen Säure- und Mäßigsäurezeigern) für die Gruppen D- lassen dagegen keine wesentlichen Unterschiede zwischen denen der Gruppen Ds++ und Ds+ erkennen. Auch die indifferenten Arten (I) liegen etwa in diesem Bereich.

Etwas anders sind die Unterschiede der Mittelwerte und Mediane der Stickstoffzeigerwerte zwischen den Artengruppen (Abb. 4.1(b)) gelagert. Hier liegt die allerdings auch nur auf drei Werte gegründete Gruppe Ds- im Bereich um 1, also stickstoffärmste Standorte anzeigend. Die übrigen Gruppen, also auch D-, liegen im Bereich zwischen 4 und 5, zeigen als stickstoffarme bis mäßig stickstoffreiche Standorte an. Für die Gruppe Ds- liegen keine Zeigerwerte für Stickstoff vor.

Die Artengruppe D- wird also durch Arten charakterisiert, die hinsichtlich der Stickstoff- und Bodenreaktionszeigerwerte eher mit denen der drei Gruppen der durch Düngung geförderten Arten vergleichbar sind. Dies gilt ebenso für die Artengruppe I. Die Arten der Artengruppen Ds- - und Ds- zeigen im Vergleich zu den sich in den Zeigerwerten untereinander nur wenig unterscheidenden übrigen Artengruppen (Ds++, Ds+, D+, I und D-) saure bis stark saure und stickstoffärmste Standorte an.

4.5 Die Beziehung zwischen Vegetation und Umweltfaktoren

4.5.1 Ergebnisse der Redundanzanalyse (RDA)

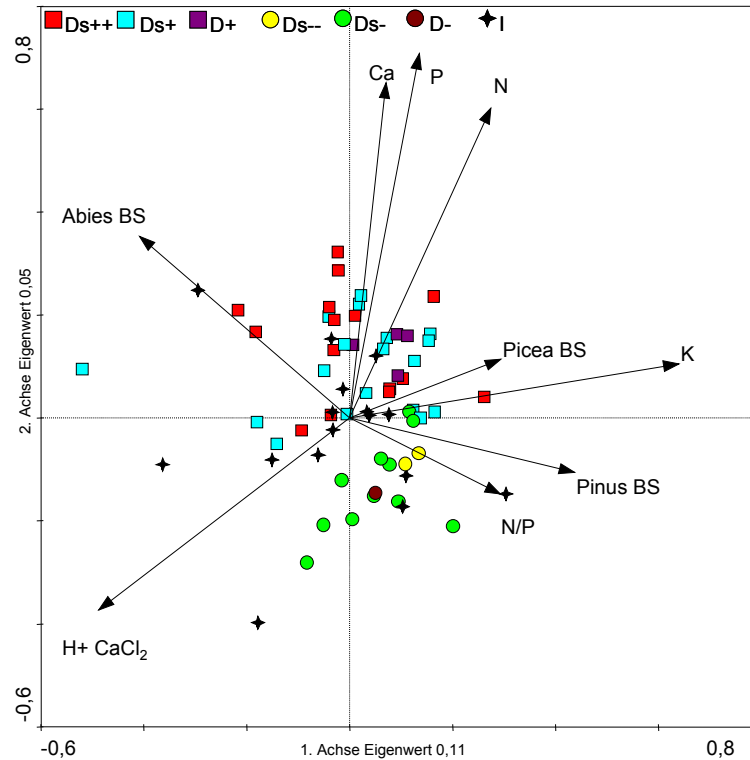


Abbildung 4.2: Ordinationsdiagramm (RDA) mit unterschiedlich auf Düngung reagierenden Artengruppen (vgl. Abschnitt 3.3.4.1). Darstellung als „inter species correlations“.

Als am besten passendes Reaktionsmodell für eine Beschreibung der Arten der Bodenvegetation mit Umweltvariablen konnte eine Redundanzanalyse (RDA) ermittelt werden (Methode in Abschnitt 3.3.4.3). Dieses lineare Modell erklärt 17,4% der Varianz der Deckungen der Arten der Moos- und Krautschicht auf den ersten vier Achsen. 92,7% davon können mit Umweltvariablen erklärt werden (Tab. 4.15). Hochsignifikante Beiträge (Monte Carlo Permutationstests, $p < 0,01$) liefern die aus Tabelle 3.8 (S. 38) ausgewählten Variablen. Dies sind die im Oberboden gemessenen Gehalte von Phosphor, Kalzium

Tabelle 4.15: Statistische Kennwerte der Redundanzanalyse.

Achse	1	2	3	4
Eigenwerte	0,11	0,05	0,011	0,008
Korrelation Arten-Umwelt	0,568	0,505	0,423	0,363
Kumulative Varianz (%)				
der Arten	10,6	15,6	16,7	17,4
der Arten Umwelt-Beziehung	56,3	82,8	88,7	92,7

4 Ergebnisse

und Kalium im Druckaufschlussverfahren (vgl. Abschnitt 3.2.5), der Stickstoffgehalt, das N/P-Verhältnis und die H^+ -Ionen Konzentration ($CaCl_2$) und die Deckungssummen der drei Baumschichten der drei Hauptbaumarten (vgl. Abschnitt 3.1.5) *Abies alba*, *Picea abies* und *Pinus sylvestris* (z. B. Abb. 4.2). Die übrigen Variablen (Tab. 3.8, S. 38), darunter auch PACL (Fisheye), konnten keine wesentlichen Erklärungsbeiträge beisteuern und wurden daher nicht in das Modell integriert.

4.5.2 Interpretation der Ordinationsachsen

Tabelle 4.16: Korrelationen (R, Spearman) der Achsenwerte („sample scores“) der ersten beiden Achsen der RDA mit den eingeschlossenen Umweltvariablen zur Überprüfung und Interpretation der ersten beiden Ordinationsachsen ($N = 335$). * ($p < 0,05$) signifikante, ** ($p < 0,01$) hochsignifikante Korrelation.

	1. Achse	2. Achse
K	0,37**	0,04
N/P	0,14*	-0,07
Pinus BS ¹	0,29**	-0,02
Picea BS ¹	0,16**	0,02
Abies BS ¹	-0,23**	0,18**
H^+ $CaCl_2$	-0,28**	-0,17**
P	0,03	0,39**
Ca	0,02	0,36**
N	0,14*	0,32**

¹ BS bedeutet Deckungssumme der Baumschichten

Die beiden Ordinationsachsen lassen sich unterschiedlich gut interpretieren. Die erste Ordinationsachse mit einem Eigenwert von 0,11 lässt sich durch mehrere Umweltfaktoren interpretieren. Sie wird im Wesentlichen durch zunehmende Kaliumgehalte im Mineralboden und wechselnde Baumartenanteile (Deckungssummen der Baumschicht) bestimmt (z. B. Abb. 4.2, Tab. 4.16). Dabei nimmt die Deckung der Tanne (*Abies* BS) tendenziell mit größer werdenden Werten ab, die der Baumarten Kiefer und Fichte (*Pinus* BS, *Picea* BS) dagegen zu. Weiterhin spielt das N/P-Verhältnis des Oberbodens eine allerdings geringere Rolle. Diese Interpretationen werden durch die Rangkorrelationen nach Spearman zwischen den Achsenwerten der ersten beiden Ordinationsachsen und den Umweltvariablen unterstützt (Tab. 4.16).

Die fünf ungedüngten Flächen unterscheiden sich teilweise stark in den Gehalten von Kalium im Oberboden (vgl. Abschnitt 4.1.4 und Tab. 4.1 4.2). Die gedüngten Flächen zeigen dabei keinen einheitlichen Trend. Deshalb kann der Kaliumgehalt im Oberboden hier vorsichtig interpretiert als ein typisches Merkmal jeder Untersuchungsfläche gelten, das von einer Düngung oder Düngewirkung ziemlich unabhängig ist, aber in dieser Studie stark die Artenzusammensetzung der Moos- und Krautschicht beeinflusst. Dies gilt noch vielmehr für die Baumartenzusammensetzung, die durch die Waldbewirtschaftung schon aus theoretischen Überlegungen von der Düngung komplett unabhängig ist. Die erste Ordinationsachse kann damit als ein aus den oben beschriebenen verschiedenen

4.5 Die Beziehung zwischen Vegetation und Umweltfaktoren

Umweltfaktoren zusammengesetzter „Flächengradient“ gelten, der von den Wirkungen der Düngung unbeeinflusst ist.

Die Variablen Stickstoff-, Phosphor- und Kalziumgehalte des Oberbodens zeigen in die Richtung der zweiten Achse mit einem Eigenwert von 0,05. Diese kann daher als Nährstoff- und Kalziumgradient interpretiert werden, der mit größer werdenden Werten der Achse zunimmt.

Die beiden Umweltvariablen Abies BS (Deckungssumme in der Baumschicht für *Abies alba*) und der pH-Wert haben Anteile an beiden Achsen, auch wenn für die erste Ordinationsachse gelten kann, dass mit größer werdenden Achsenwerten Kiefer- und Fichtenanteile (Deckungssumme) zunehmen. Die Korrelationen (Spearman) in Tabelle 4.16 bestätigen dies, da beide Achsen mit diesen beiden Umweltvariablen korrelieren.

4.5.3 Standortsansprüche der Arten in der Redundanzanalyse im Vergleich mit ihrer Zuordnung als Gruppe

Die sieben Gruppen der unterschiedlich auf Düngung reagierenden Arten (Abschnitt 3.3.4.1 u. 4.4) sind gemeinsam mit den erklärenden Umweltvariablen in einem Ordinationsdiagramm (RDA) in Abbildung 4.2 dargestellt. In Abbildung 4.3 finden sich Detailansichten dieser Ordination für die einzelnen Artengruppen, in denen die einzelnen Artkürzel beschriftet sind (wissenschaftliche Namen in Tab. A.1, S. 130).

Für die Ansicht in den Diagrammen 4.2 und 4.3 gilt, dass die Entfernung des Symbols für jede Art vom Ursprung des Koordinatenkreuzes, die Stärke der Anpassung als Korrelation mit dem Ordinationsdiagramm (ter Braak & Smilauer, 2002, S. 91) verdeutlicht. Um die Übersichtlichkeit der Abbildungen zu erhöhen, wurden die Artsymbole entgegen den Gepflogenheiten für lineare Ordinationsverfahren hier als Punkte und nicht als Vektoren dargestellt.

In der Übersicht (Abb. 4.2) des Ordinationsdiagramms mit Umweltvariablen und Arten ist eine deutliche Trennung mit nur kleinem Überlappungsbereich zwischen den drei Gruppen der häufiger und den drei Gruppen der seltener auf gedüngten Flächen vorkommenden Arten erkennbar (Abschnitt 4.4). Die Trennung dieser Artengruppen verläuft dabei entlang der zweiten Ordinationsachse, die als ein Nährstoff- und Kalziumgradient und damit durchaus als Düngungsstärkegradient interpretiert werden kann (Abschnitt 4.5.2). Die auf Düngung negativ reagierenden Arten finden sich in einem Bereich mit geringen, die auf Düngung positiv reagierenden in einem Bereich mit hohen Nährstoff- und Kalziumgehalten des Oberbodens. Innerhalb dieser beiden Gruppen ist jedoch keine weitere eindeutige Abgrenzung erkennbar (Abb. 4.3(a), (b)), auch nicht entlang der ersten Ordinationsachse, die als Gradient der Unterschiede zwischen den einzelnen Untersuchungsflächen hinsichtlich Baumartenzusammensetzung und Kaliumgehalte im Oberboden gelten kann (Abschnitt 4.5.2).

Die indifferenten Arten (Gruppe I, Abb. 4.3(c)) streuen über den gesamten Bereich des Ordinationsdiagramms zwischen den beiden ersten Achsen. Da bei der Einteilung in diese Gruppe Deckungsunterschiede der Arten zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen nicht berücksichtigt wurden, sind diese zumindest für die stetigen Arten dieser Gruppe (> 50%) *Hypnum jutlandicum* und *Vaccinium myrtillus* denkbar. Dies wird für diese und weitere Arten in den nächsten Abschnitten überprüft.

4 Ergebnisse

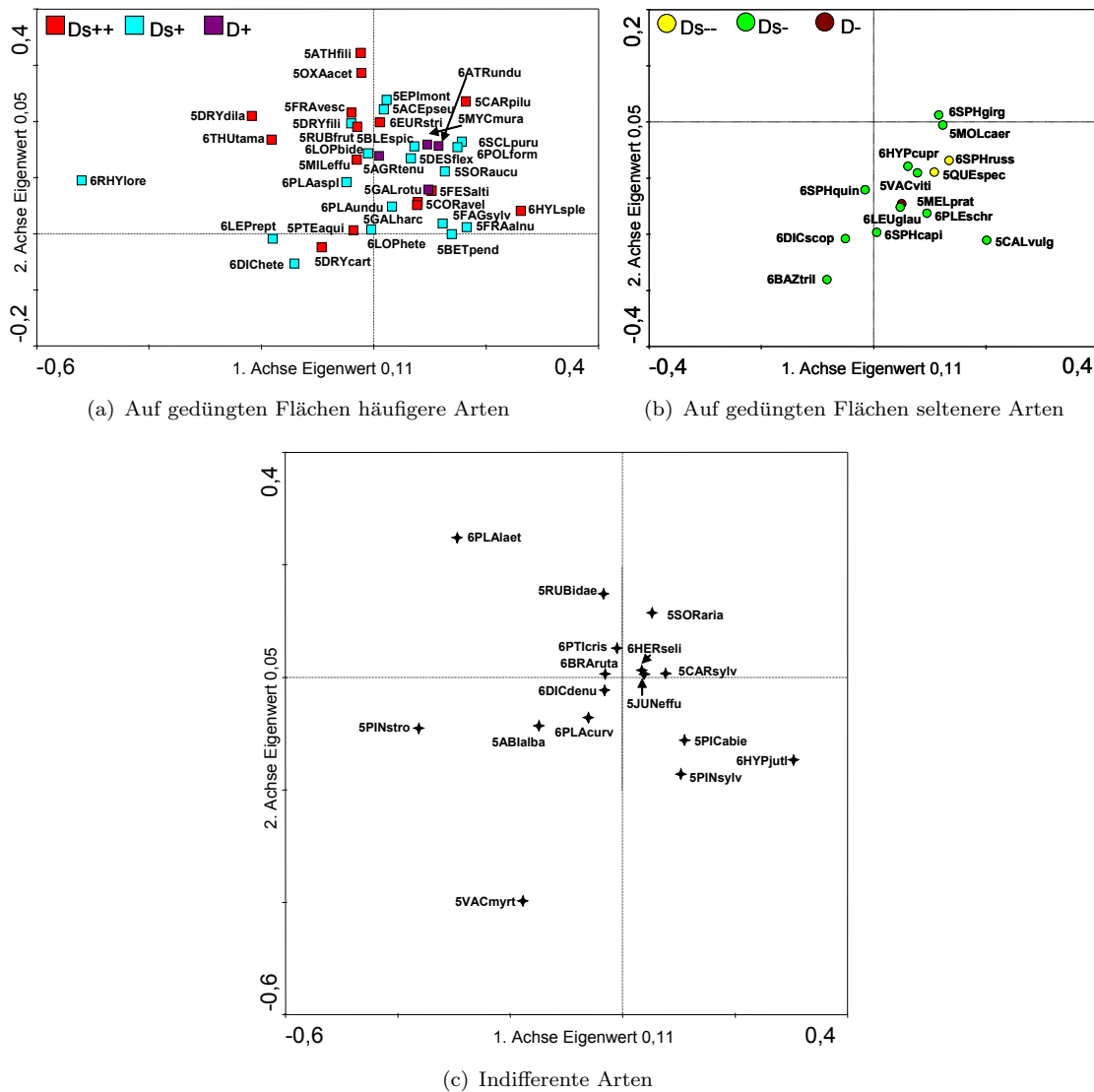


Abbildung 4.3: Auschnitte nach Artengruppen (Düngung) aus dem Ordinationsdiagramm (Abb 4.2). Darstellung als „inter species correlations“.

4.5.4 Die Beziehung zwischen Deckungen dominanter und hochsteter Arten und Umweltvariablen

Eine weitere Überprüfung für einzelne hochstete Arten zeigt eine Korrelationsmatrix (Tab. 4.17) mit Gamma-Koeffizienten nach Kendall und Goodman (Statsoft, 1984-2001, vgl. Abschnitt 3.3.4.4) von den dreizehn Arten der Moos- und Krautschicht mit einer Stetigkeit über 50 % in allen Aufnahmen.

In der gesamten Tabelle 4.17 übersteigt kein Wert für den Gamma-Koeffizienten den Wert 0,36 bzw. unterschreitet den Wert -0,33. Damit sind die Zusammenhänge zwischen einzelnen Umweltvariablen und Deckungen einzelner Arten eher schwach.

Wie auch in der Ordination zeigt der Lichtanteil (PACL) auch bei den einzelnen stetig vorkommenden Arten keinen Einfluss auf die Deckung.

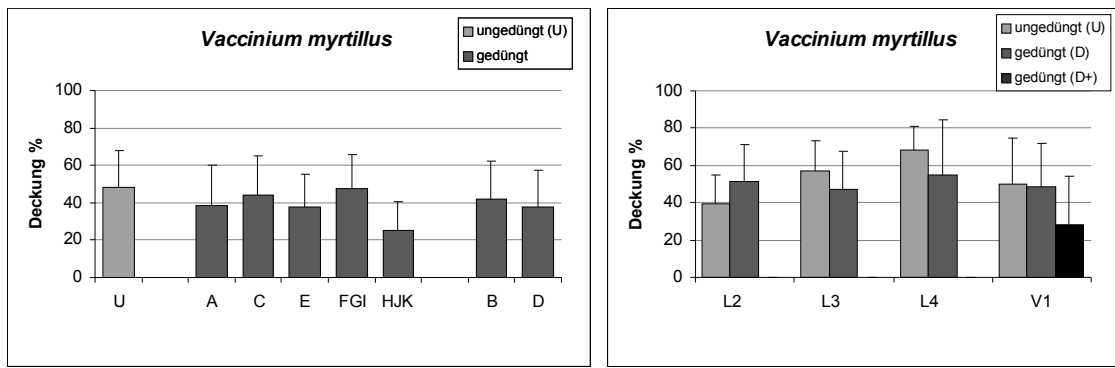
Im Querschnitt der Korrelationsmatrix zeigen die Nährstoff- und Kationengehalte des

Tabelle 4.17: Korrelationsmatrix der Umweltvariablen mit Deckungen höchster Arten < 50% (wissenschaftliche Namen Tab. A.1), jeweils γ nach Goodman-Kruskal für $n = 335$. Signifikanz * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$.

Stetigkeit	Art (Kurzform) der Moos- oder Krautschicht															
	5ABlalba	5PICabie	5DEShex	5DRYdila	5VACmyrt	6DICscop	6HYLsple	6HYPjuti	6PLEschr	6POLform	6RHYlore	6BAZtril	6LOPbide			
Stetigkeit	92,2 %	86,0 %	80,6 %	55,8 %	100,0 %	86,9 %	70,7 %	52,2 %	72,5 %	80,9 %	81,2 %	70,4 %	53,4 %			
Licht	-0,07	0,11*	0,15**	-0,11*	0,01	-0,01	0,20**	0,26**	0,17**	0,07	-0,10**	0,02	0,10*			
pH ¹	0,10*	0,05	0,12*	0,03	-0,13**	-0,14**	0,21**	-0,01	-0,09*	0,10*	-0,09*	-0,23**	0,01			
pH ²	0,09	0,09	0,28**	0,02	-0,15**	-0,15**	0,27**	-0,01	-0,04	0,15**	-0,16**	-0,33**	-0,03			
C	-0,19**	-0,02	0,29**	0,14**	-0,21**	-0,09*	0,11**	0,14**	0,03	0,18**	0,03	-0,17**	0,15**			
N	-0,15**	-0,01	0,32**	0,15**	-0,21**	-0,08	0,13**	0,12**	-0,02	0,23**	<0,00	-0,21**	0,12*			
P	-0,07	<0,00	0,36**	0,36**	-0,22**	-0,16**	0,12**	0,01	-0,10*	0,25**	0,10*	-0,30**	0,21**			
Ca	0,03	-0,08	0,21**	0,22**	-0,22**	-0,14**	0,15**	-0,03	-0,23**	0,14**	0,09*	-0,17**	0,11*			
Mg	0,09	0,20**	0,30**	-0,02	-0,11**	0,02	0,23**	0,07	0,07	0,16**	-0,16**	-0,30**	0,02			
K	-0,11*	0,26**	0,26**	-0,14**	-0,13**	>0,00	0,33**	0,33**	0,20**	0,21**	-0,21**	-0,17**	0,09			
C/N	-0,14**	-0,08	-0,08	-0,01	-0,03	-0,02	-0,04	0,06	0,07	-0,12**	0,09*	0,09*	0,07			
C/P	-0,16**	-0,05	-0,06	-0,26**	-0,01	0,06	>0,00	0,17**	0,13**	-0,05	-0,06	0,13**	-0,06			
N/P	-0,11*	-0,02	-0,02	-0,28**	<0,00	0,08	>0,00	0,15**	0,10*	0,01	-0,13**	0,09*	-0,10*			
Oh+Of	-0,02	0,03	-0,23**	-0,24**	0,17**	0,21**	-0,19**	0,11*	0,18**	-0,19**	-0,02	0,18**	0,01			
Abies BS	-0,06	-0,09	-0,10*	0,21**	-0,06	-0,13**	-0,12**	-0,15**	-0,01	0,08	0,26**	0,01	0,23**			
Pinus BS	-0,25**	-0,04	-0,15**	-0,24**	-0,09*	-0,08	0,12**	0,26**	0,09*	-0,08	-0,22**	0,17**	0,06			
Pice BS a	>0,00	0,01	0,09	-0,24**	-0,06	0,22**	0,07	0,11*	-0,09	-0,01	-0,20**	-0,10*	-0,21**			

pH¹ in H₂O, pH² in CaCl₂.

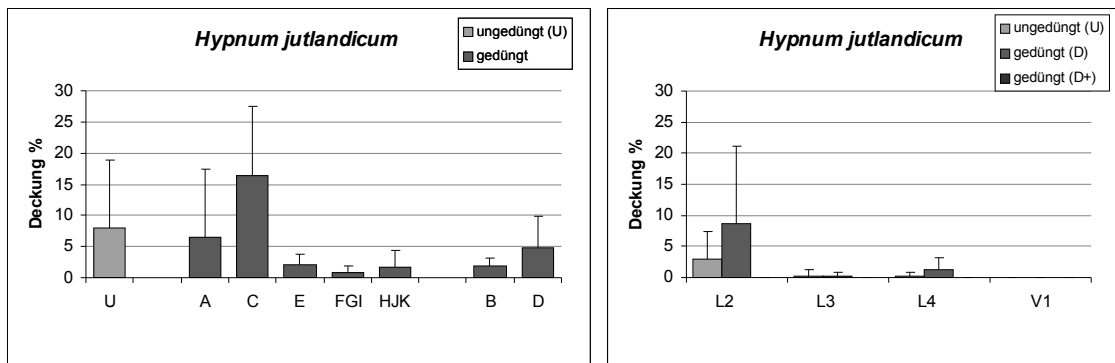
4.5 Die Beziehung zwischen Vegetation und Umweltfaktoren



(a) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Vaccinium myrtillus* auf Untersuchungsfläche L1.

(b) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Vaccinium myrtillus* auf den Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1.

Abbildung 4.5: Mittlere Deckungen von *Vaccinium myrtillus* auf den Untersuchungsflächen.



(a) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Hypnum jutlandicum* auf Untersuchungsfläche L1.

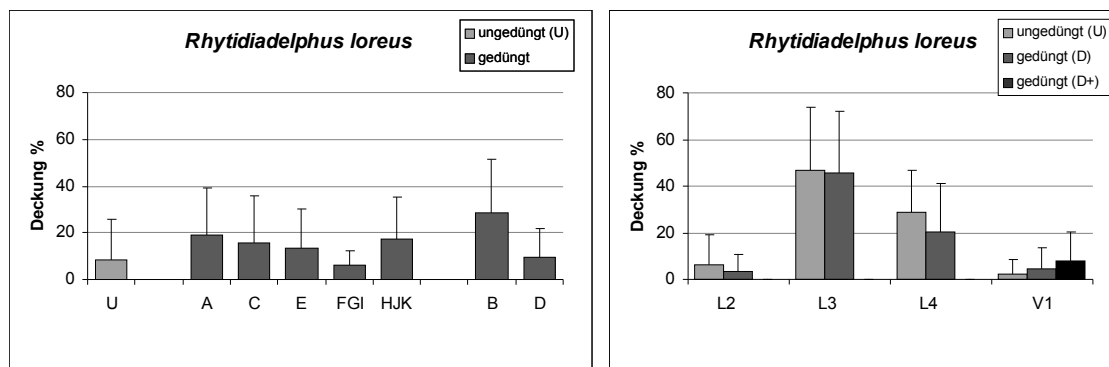
(b) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Hypnum jutlandicum* auf den Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1.

Abbildung 4.6: Mittlere Deckungen von *Hypnum jutlandicum* auf den Untersuchungsflächen.

he „species scores“ entlang beider Achsen), die Arten mit einer Stetigkeit über 50 % sind dabei noch einmal zusätzlich hervorgehoben. Arten hoher Stetigkeit mit wenig Erklärungsbeitrag, wie etwa die Baumartenverjüngung, wurden nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitte 3.3.4.2 und 3.3.4.4).

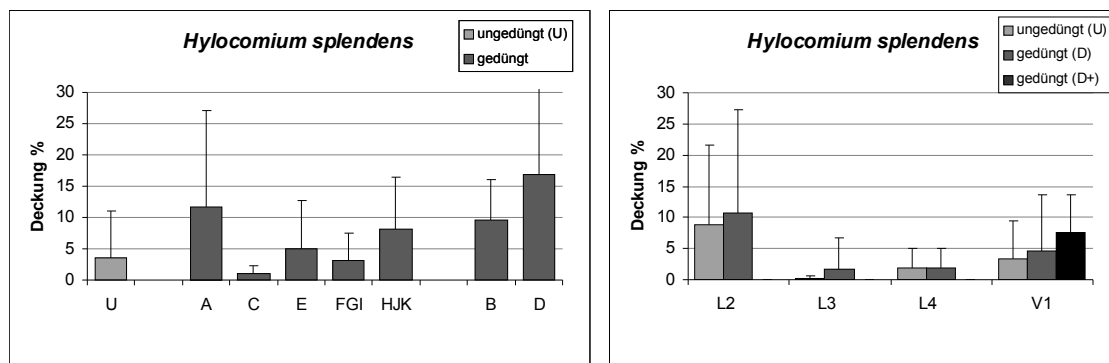
Die Heidelbeere *Vaccinium myrtillus* verhält sich in ihrer Stetigkeit indifferent gegenüber gedüngten oder ungedüngten Flächen (Tab. 4.13), da sie in allen Aufnahmen vertreten ist. Sie dominiert die Krautschicht auf allen Flächen mit mittleren Deckungen zwischen 20- und fast 70 % (Abb. 4.5). Die mittlere Deckung der Heidelbeere ist mit Ausnahme von Untersuchungsfläche L2 auf den meisten Düngeflächen gegenüber der ungedüngten Fläche geringer. Auf statistische Tests wurde verzichtet, dennoch sind die Deckungsunterschiede zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen nur in wenigen Fällen wie zwischen den Flächen L1 U und L1 HJK oder zwischen V1 U und V1 D⁺ sehr hoch (Abb. 4.5). Die Heidelbeere kann als eine Art gelten, deren Deckung im nährstoff-

4 Ergebnisse



(a) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Rhytidiadelphus loreus* auf Untersuchungsfläche L1. (b) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Rhytidiadelphus loreus* auf den Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1.

Abbildung 4.7: Mittlere Deckungen von *Rhytidiadelphus loreus* auf den Untersuchungsflächen.



(a) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Hylocomium splendens* auf Untersuchungsfläche L1. (b) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Hylocomium splendens* auf den Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1.

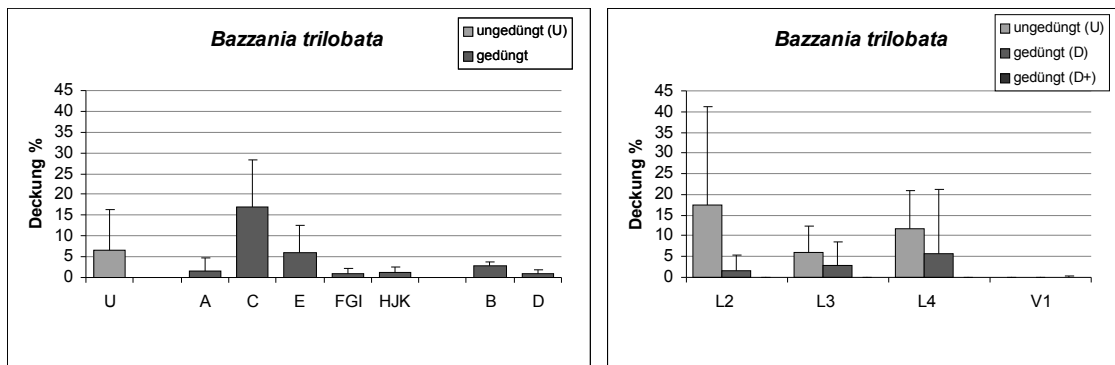
Abbildung 4.8: Mittlere Deckungen von *Hylocomium splendens* auf den Untersuchungsflächen.

reichen Bereich abnimmt (Abb. 4.3(c), 4.4) und die somit tendenziell langfristig durch Düngungen in der Deckung zurückgeht.

Die als indifferent eingestufte Art *Hypnum jutlandicum* hat Ihren Schwerpunkt auf den Untersuchungsflächen L1 und L2 (Abb. 4.6). Auf Untersuchungsfläche L1 ist die mittlere Deckung auf den ungedüngten und schwach gedüngten Varianten höher (Abb. 4.6(a)), vor allem auf der bodenchemisch sehr ungünstigen und durch hohe Anteile an F-Rohhumus geprägten Fläche L1 C (vgl. Abschnitt 4.1.11). Dagegen ist die mittlere Deckung bei der Untersuchungsfläche L2 auf der gedüngten Fläche höher (Abb. 4.6(b)).

Die weiteren drei dieser ausgewählten Arten (*Rhytidiadelphus loreus*, *Hylocomium splendens* und *Bazzania trilobata*, Abb. 4.4) zeigen zum Teil deutliche Schwerpunkte in ihrer mittleren Deckungen auf einzelnen Flächen. Dabei sind in den Abbildungen keine Widersprüche zu der Einteilung aufgrund unterschiedlicher Stetigkeit zu erkennen. *Rhytidiadelphus loreus* (Artengruppe Ds+, Tab. 4.10), die Art mit dem längsten Art-

4.5 Die Beziehung zwischen Vegetation und Umweltfaktoren



(a) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Bazzania trilobata* auf Untersuchungsfläche L1.

(b) Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckungen von *Bazzania trilobata* auf den Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1.

Abbildung 4.9: Mittlere Deckungen von *Bazzania trilobata* auf den Untersuchungsflächen.

vektor (Abb. 4.4), hat einen deutlichen Schwerpunkt hinsichtlich der mittleren Deckung sowohl auf den gedüngten als auch auf den ungedüngten Flächen von L3 und deckt relativ schwach auf den Untersuchungsflächen L2 und V1 (Abb. 4.7). Bei *Hylocomium splendens* (Artengruppe Ds++, Tab. 4.10 und Abb. 4.8) sind auf den gedüngten Flächen stärkere mittlere Deckungen im Vergleich zu den jeweiligen Nullvarianten zu erkennen. Hier hat die Art deutliche Schwerpunkte ihrer mittleren Deckung auf den Untersuchungsflächen L1 und L2 und in etwas geringerem Maße noch auf Untersuchungsfläche V1. *Bazzania trilobata* (Artengruppe Ds-, Tab. 4.10 und Abb. 4.9) zeigt höhere Deckungen auf ungedüngten oder bodenchemisch ungünstigen Flächen (L1 C) im Vergleich zu gedüngten Flächen auf den Untersuchungsflächen L1, L2, L3 und L4 und fehlt fast gänzlich auf Untersuchungsfläche V1.

4.6 Unterschiede in der Vegetation als Folge von Düngungen – Ordination (RDA) der Aufnahmen

4.6.1 Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L1

Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L1 sind in Abbildung 4.10(a) nach Düngevarianten durch Symbole gekennzeichnet. Angaben zu den Düngungen finden sich in Tabelle 3.3, Unterschiede im Oberboden und Eigenschaften der organischen Auflagen für diese Düngevarianten sind in den Abschnitten 4.1 und 4.2 besprochen.

Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L1 streuen über den gesamten Bereich des Ordinationsdiagrammes 4.10(a)). Die ungedüngten Aufnahmen (L1 U) finden sich dabei schwerpunktmäßig im negativen Bereich der zweiten Ordinationsachse, der durch geringe Gehalte an Kalzium, Stickstoff und Phosphor und auch durch die Artengruppen der durch Düngung seltener werdenden Arten beschrieben wird (vgl. Abb. 4.2 und 4.3(b)). Die gedüngten Flächen hingegen streuen in den gesamten Bereich der zweiten Ordinationsachse.

Dabei sind Unterschiede hinsichtlich der Düngeintensität zu erkennen. Schwach gedüngte Flächen wie L1 A und L1 C, aber auch noch einige Aufnahmen der Fläche L1 E streuen weiter und überlappen sich stärker mit dem Bereich der ungedüngten Aufnahmen L1 U als die stärker gedüngten Varianten L1 FGI und HJK (Tab. 3.3). Diese haben einen deutlichen Schwerpunkt in dem oberen Bereich der zweiten Ordinationsachse, der durch auf Düngeflächen zunehmende Artengruppen (Abb. 4.3) und zunehmender Nährstoffgehalte im Mineralboden beschrieben wird.

Hinsichtlich der ersten Ordinationsachse sind kaum Unterschiede hinsichtlich der Düngevarianten der Untersuchungsfläche L1 zu erkennen. Hier verteilen sich sowohl ungedüngte wie auch gedüngte Aufnahmen im gesamten Bereich mit nur mit einem leichten Schwerpunkt im positiven Bereich der ersten Ordinationsachse (Abb. 4.10(a)). Dies bedeutet, dass die Aufnahmen der Fläche L1 den gesamten Bereich der Umweltfaktoren (Kalium, N/P-Verhältnis im Oberboden) und Verteilung der Baumarten Tanne, Fichte und Kiefer in der Baumschicht einnehmen.

4.6.2 Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L2

Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L2 (Abb. 4.10(b)) streuen im Ordinationsraum beider Achsen über einen weit geringeren Bereich als die der Untersuchungsfläche L1. Aufnahmen der gedüngten und ungedüngten Fläche liegen in einem gemeinsamen Schwerpunktbereich. Die ungedüngten Aufnahmen (L2 U) liegen mit ihrem Schwerpunkt in einem etwas tieferen und damit nährstoffärmeren Bereich der zweiten Ordinationsachse, als die gedüngten Aufnahmen (L2 D).

Diese streuen auch etwas weiter nach rechts entlang der ersten Ordinationsachse. Insgesamt liegen die Aufnahmen (L2 U und L2 D) sehr weit im positiven Bereich der ersten Ordinationsachse. Dies ist vor allem auf hohe Anteile der Kiefer in der Baumschicht im Vergleich zu anderen Untersuchungsflächen (Tab. 4.18) und niedrige der Tanne zurückzuführen, da die mittleren Kaliumgehalte im Oberboden im Gesamtvergleich aller Flächen eher im mittleren Bereich angesiedelt sind (Tab. 4.2).

Tabelle 4.18: Deckungssummen der drei Baumschichten von Tanne, Fichte und Kiefer in Prozent (gerundet), gemittelt für jede Düngervariante. Angaben zu den Düngungen in den Tabellen 3.4 und 3.4.

Fläche	L1							L2		L3		L4		V1		
	U	A	C	E	FGI	HJK	B+D	U	D	U	D	U	D	U	D	D ⁺
Anzahl	35	30	10	20	15	25	10	25	25	40	40	10	10	20	10	10
<i>Abies</i> BS %	44	34	26	28	43	56	62	36	22	64	57	45	61	8	50	89
<i>Picea</i> BS %	11	12	21	26	6	13	8	14	22	4	6	11	2	49	15	6
<i>Pinus</i> BS %	32	27	31	22	30	23	19	46	44	24	13	5	2	8	9	2

4.6.3 Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L3

Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L3 (Abb. 4.10(c)) liegen eng beieinander und streuen mit deutlichem Schwerpunkt im negativen Bereich der ersten Ordinationsachse ober- und unterhalb des Nullpunktes der zweiten Ordinationsachse. Im Vergleich mit allen anderen Untersuchungsflächen liegen sie am deutlichsten im negativen Bereich der ersten Ordinationsachse, also dort wo der „Flächengradient“ durch hohe Tannenanteile und niedrige Kaliumgehalte gekennzeichnet ist. Dabei überlappen sich die Bereiche der Aufnahmen der gedüngten (L3D) und ungedüngten (L3U) Flächen stark. Etwa ein Viertel der Aufnahmen der gedüngten Flächen (L3D) reicht weiter in den positiven und damit nährstoffreichen Bereich (Kalzium, Phosphor und Stickstoff im Oberboden) der zweiten Ordinationsachse.

Die Untersuchungsfläche L3 ist besonders durch starke Deckungen des Mooses *Rhytidadelphus loreus* und hohe Anteile der Tanne *Abies alba* (Tab. 4.18) in der Baumschicht gekennzeichnet, was durch die Lage dieser Flächen im Ordinationsraum (Abb. 4.3(a)) im Vergleich mit den Abbildungen 4.4 und 4.7(b) deutlich wird. Weiterhin sind die Kaliumgehalte im Gesamtvergleich aller fünf Untersuchungsflächen niedrig (Tab. 4.1, Tab. 4.2).

4.6.4 Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche L4

Die insgesamt 20 Aufnahmen der Untersuchungsfläche L4 trennen sich entlang der ersten Ordinationsachse in zwei Kollektive (Abb. 4.10(d)). Da die Baumschicht von der Tanne dominiert wird (Tab. 4.18), ist diese Trennung durch hohe Kaliumgehalte des Oberbodens wahrscheinlich. Diese sind im Vergleich mit den übrigen Untersuchungsflächen recht hoch und auf gedüngten Fläche (nicht signifikant) erhöht (Tab. 4.2). Entlang der ersten Achse ist bei einem Überlappungsbereich zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen reichen die gedüngten Flächen etwas weiter in den nährstoffreichen Bereich und die ungedüngten Flächen etwas weiter in den nährstoffarmen Bereich.

4.6.5 Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche V1

Die Aufnahmen der Untersuchungsfläche V1 (Abb. 4.10(e)) lassen Unterschiede zwischen ungedüngten und gedüngten Flächen erkennen. Hier ist eine Trennung vor allem zwischen den Aufnahmen der Flächen V1U (ungedüngt) und V1D⁺ entlang der zweiten Ordinationsachse (vornehmlich Nährstoffe) erkennbar. Die schwächer gedüngten Aufnahmen V1D liegen dazwischen.

4 Ergebnisse

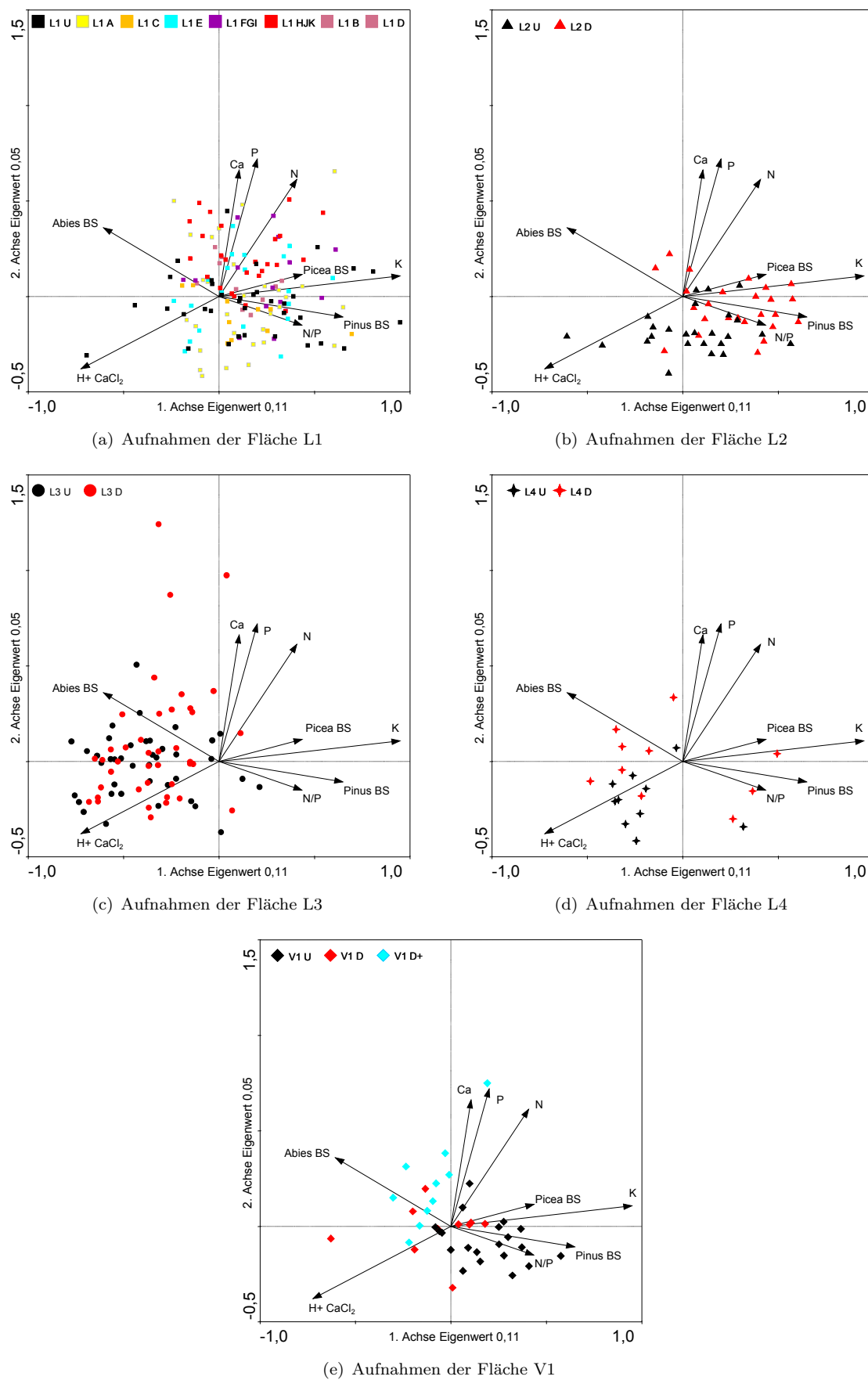


Abbildung 4.10: Die Vegetationsaufnahmen nach Düngungen und Untersuchungsflächen (Tab. 3.4 u. 3.3) im Ordinationsraum der RDA (Tab. 4.15, „inter sample distances“).

Sehr deutlich ist eine Trennung der Aufnahmen von V1 U und V1 D auf der einen Seite und von V1 D⁺ auf der anderen Seite entlang der ersten Ordinationsachse erkennbar. Dafür sind sowohl die stark wechselnden Baumartenanteile vor allem von Tanne und Fichte zwischen den Flächen (Tab. 4.18), und die Unterschiede in Kaliumgehalten des Oberbodens verantwortlich (Tab. 4.2).

4.6.6 Gesamtbetrachtung aller Aufnahmen

In der Gesamtbetrachtung der fünf Flächen unterscheiden sich die gedüngten von ungedüngten Flächen durch eine stärkere Heterogenität der Vegetationsaufnahmen entlang der zweiten Ordinationsachse der RDA, die als „Düngegradient“ zu verstehen ist. Dies ist durchaus auch als Bestätigung zur Ordination der Arten in Abschnitt 4.5.3 zu verstehen.

So haben die Aufnahmen aller fünf ungedüngten Flächen (Abb. 4.10) ihren Schwerpunkt im unteren Bereich der zweiten Ordinationsachse, der niedrige Nährstoffgehalte (Phosphor, Stickstoff und Kalzium) im Oberboden repräsentiert und überwiegend durch Vertreter der Artengruppe der auf Düngeflächen seltener werdenden Arten der Moos- und Krautschicht definiert wird.

Unterschiede zwischen den Aufnahmen der fünf ungedüngten Flächen (Abb. 4.10) sind hauptsächlich entlang der ersten Ordinationsachse zu beobachten (Arten der Baumschicht und Kalium im Mineralboden). Die Aufnahmen der Flächen L1 U und L2 U streuen fast über den gesamten Bereich der ersten Achse (Abb. 4.10(a), (b)). Während die Aufnahmen der Flächen L3 U und L4 U sich schwerpunktmäßig im negativen Bereich der ersten Ordinationsachse, also in einem durch hohe Anteile der Tanne und relativ niedrige Kaliumgehalte im Mineralboden geprägten Bereichen anordnen und die Aufnahmen der Fläche V1 U sich hier genau umgekehrt verhalten.

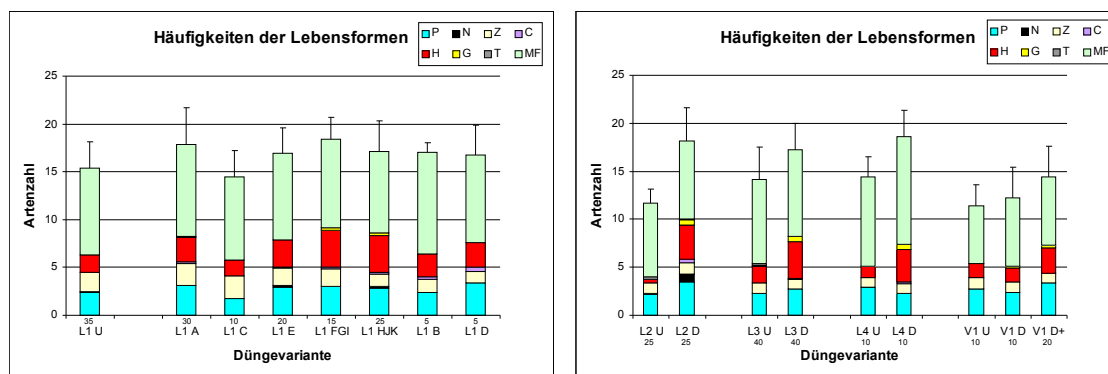
Für die Aufnahmen der gedüngten Flächen L1, L2, L3 und L4 gilt jeweils, dass sie den Bereich im Ordinationsraum der ungedüngten Aufnahmen einnehmen, dann aber ein Teil der Aufnahmen weiter entlang der zweiten Ordinationsachse in den nährstoffreicheren Bereich strahlt. Auf der Untersuchungsfläche V1 (Abb. 4.10(e)) heben sich allerdings die Aufnahmen der ungedüngten Fläche (V1 U) deutlich entlang beider Ordinationsachsen ab.

Somit kann die erste Ordinationsachse als Bestätigung zu den in Abschnitt 4.5.2 getroffenen Feststellungen als ein von Düngung unabhängiger „Flächengradient“ beschrieben werden, da die Baumartenanteile (Deckungssummen) in dieser Untersuchung mit Kaliumgehalten im Oberboden verknüpft sind. Weiterhin haben auch einige dominante Arten auf bestimmten Flächen einen Schwerpunkt, was besonders für das Moos *Rhytidiadelphus loreus* auf Untersuchungsfläche L3 zutrifft (Abb. 4.7).

4.7 Konsequenzen der Düngungen für die Artenzahl der Moos- und Krautschicht

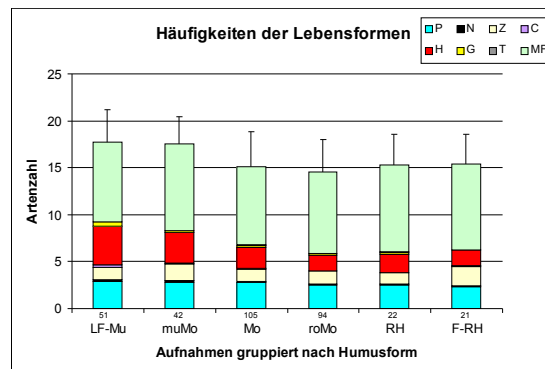
4.7.1 Unterschiede in der Anzahl der Lebensformen durch Düngungen

Die mittlere Artenzahl der Moos- und Krautschicht der einzelnen Düngeflächen, als Summe aller Lebensformen (Abb. 4.11(a) und (b)) für die einzelnen Flächen, liegt in einem Bereich zwischen $n = 10$ bis $n = 20$, davon machen Arten der Krautschicht etwa zwischen $n = 4$ bis $n = 10$ aus. Die Artenzahl der Moose für jede Düngefläche ist kenntlich gemacht als Lebensformtyp „MF“, während sich die Artenzahl der Krautschicht dort aus der Summe der übrigen Lebensformen ergibt oder in der Zuordnung von verschiedenen



(a) Mittelwerte der Artenzahlen getrennt nach Lebensformen (Standardabweichung für die Summe) auf den Parzellen der Untersuchungsfläche L1 (Abkürzungen, s. u.). Statistische Tests dazu in Tab. 4.19.

(b) Mittelwerte der Artenzahlen getrennt nach Lebensformen (Standardabweichung für die Summe) der Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1 (Abkürzungen, s. u.). Statistische Tests dazu in Tab. 4.19.



(c) Mittelwerte der Artenzahlen getrennt nach Lebensformen (Standardabweichung für die Summe) auf jeder Humusform (Abkürzungen, s. u.). Statistische Tests dazu in Tab. 4.19.

Abbildung 4.11: Artenzahlen getrennt nach Lebensformen auf den Untersuchungsflächen und für die Humusformen – Teilabbildungen (4.11(a)-(c)): Mittelwerte und Standardabweichungen der Arten der Moos- und Krautschicht. Abkürzungen: K Arten Krautschicht, M Arten Moosschicht, HF Humusform (LF-Mu L-Mull u. F-Mull, muMo mullartiger Moder, Mo typischer Moder, roMo rohhumusartiger Moder, RH Rohhumus, F-RH Streunutzungs-Rohhumus), MF Moose und Flechten, T Therophyt, G Geophyt, H Hemikryptophyt, C Chamaephyt, Z holziger Chamaephyt, N Nanophanerophyt, P Phanerophyt.

4.7 Konsequenzen der Düngungen für die Artenzahl der Moos- und Krautschicht

Tabelle 4.19: Globale (Kruskal-Wallis) und einzelne (MWU-Test) Signifikanztests für jeweils die Artenzahlen der Moos- und der Krautschicht und beide zusammen für unterschiedlich gedüngte Untersuchungsflächen und für die Humusformen. Einzelvergleiche (MWU-Test) bei multiplen Vergleichen nur bei globaler Signifikanz. Signifikanzniveaus jeweils * ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$). Abkürzungen K Krautschicht, M Mooschicht, K+M Kraut- und Mooschicht zusammen.

(a) Globale Tests (Kruskal-Wallis) (K+M, K, M) für die Untersuchungsflächen L1 und V1 und Humusformen (HF).

	Signifikanzniveaus (Kruskal-Wallis)		
	L1	V1	HF
Artenzahl gesamt	**	*	**
Artenzahl Krautschicht	**		**
Artenzahl Mooschicht			

(b) Signifikanzniveaus (MWU-Test) (K+M, K, M) für die Untersuchungsflächen L2, L3 und L4.

	Signifikanzniveaus (Mann-Whitney-U-Test zweiseitig)		
	Untersuchungsflächen		
	L2	L3	L4
Artenzahl gesamt	**	**	**
Artenzahl Krautschicht	**	**	**
Artenzahl Mooschicht			*

(c) Signifikanzniveaus (MWU-Test) (K+M) für die Untersuchungsfläche V1.

Fläche V1	Signifikanzniveaus Artenzahl K + M (Mann-Whitney-U-Test zweiseitig)		
	V1 U	V1 D	V1 D+
V1 U	-		*
V1 D		-	
V1 D+	*		-

(d) Signifikanzniveaus (MWU-Test) (K+M) für die Untersuchungsfläche L1.

Parzelle L1	Signifikanzniveaus Artenzahl K+M (Mann-Whitney-U-Test zweiseitig)					
	U	A	C	E	FGI	HJK
U	-	**			**	*
A	**	-	*			
C		*	-	*	**	*
E			*	-	*	
FGI	**		**	*	-	
HJK	*		*			-

(e) Signifikanzniveaus (MWU-Test) (K) für die Untersuchungsfläche L1.

Parzelle L1	Signifikanzniveaus Artenzahl K (Mann-Whitney-U-Test zweiseitig)					
	U	A	C	E	FGI	HJK
U	-	**		*	**	**
A	**	-	*			
C		*	-	*	**	**
E	*		*	-		
FGI	**		**		-	
HJK	**		**			-

(f) Signifikanzniveaus (MWU-Test) (K+M) für die Humusformen.

Humusform	Signifikanzniveaus Artenzahl K + M (Mann-Whitney-U-Test zweiseitig)					
	LF-Mu	MuMo	Mo	roMo	RH	F-RH
LF-Mu	-		**	**	*	*
MuMo		-	**	**	*	*
Mo	**	**	-			
roMo	**	**		-		
RH	*	*			-	
F-RH	*	*				-

(g) Signifikanzniveaus (MWU-Test) (K) für die Humusformen.

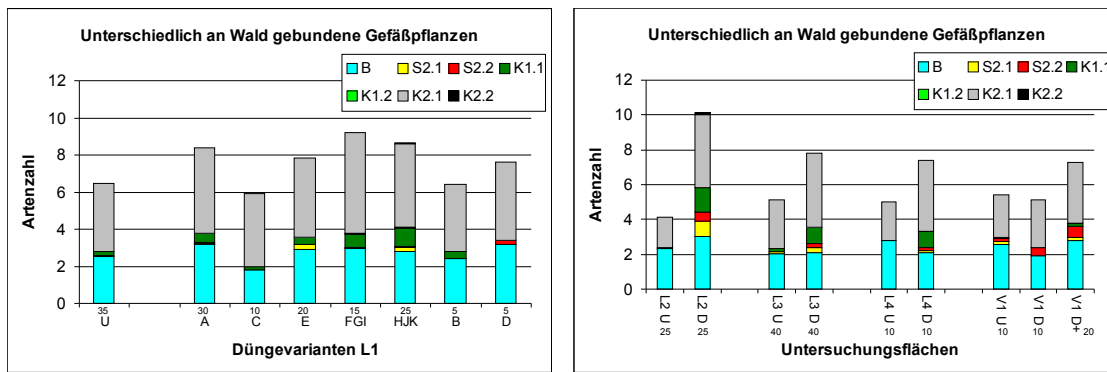
Humusform	Signifikanzniveaus Artenzahl K (Mann-Whitney-U-Test zweiseitig)					
	LF-Mu	MuMo	Mo	roMo	RH	F-RH
LF-Mu	-		**	**	**	**
MuMo		-	**	**	**	**
Mo	**	**	-	**		
roMo	**	**	**	-		
RH	**	**			-	
F-RH	**	**				-

stark an Wald gebundener Arten zu den einzelnen Flächen deutlich wird (Abb. 4.12).

Gegenüber ungedüngten Flächen ist dabei die Artenzahl der Moos- und Krautschicht auf Düngeflächen erhöht. Diese meist signifikante Erhöhung ist im Wesentlichen auf die Arten der Krautschicht zurückzuführen, während sich die Artenzahl der Mooschicht durch Düngung kaum ändert (Tab. 4.19(a), (d)). Eine Erhöhung der Artenzahl der Krautschicht entlang gesteigerter Düngemengen (Tab. 3.3, S. 30) ist dabei im Vergleich der Düngevarianten von Fläche L1 nicht zu erkennen (Abb. 4.11(a), Tab. 4.19(b) und (c)).

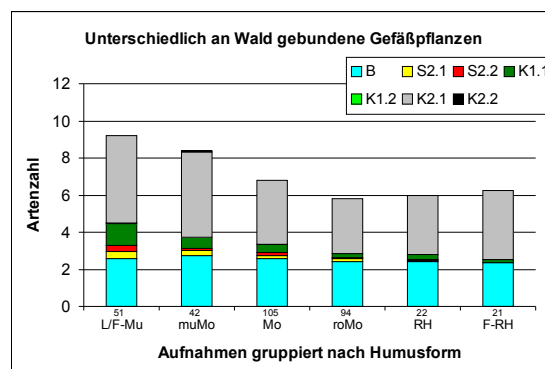
Am deutlichsten erkennbar nimmt auf gedüngten Flächen im Vergleich mit ungedüngten innerhalb der Krautschicht die Artenanzahl für die Lebensform der Hemikryptophyten (H) zu (Abb. 4.11(a), (b)). Auf einzelnen Düngeflächen ist auch eine geringe Zunahme von Arten der Lebensformen Geophyten (G), Chamaephyten (C) und Straucharten (N)

4 Ergebnisse



(a) Anzahl Gefäßpflanzen mit unterschiedlicher Bindung an Wald auf den Untersuchungsflächen L1 getrennt nach Düngewarianten

(b) Anzahl Gefäßpflanzen mit unterschiedlicher Bindung an Wald auf den Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1 getrennt nach Düngewarianten



(c) Anzahl Gefäßpflanzen mit unterschiedlicher Bindung an Wald getrennt nach Humusformen

Abkürzungen Waldartenliste:

B Arten der Baumschicht, S Arten der Strauchschicht, K Arten der Krautschicht.

1 Weitgehend an Wald gebunden

1.1 Vorwiegend im geschlossenen Wald 1.2 Vorwiegend an Waldrändern und auf Waldverlichtungen

2 Im Wald und im Offenland

2.1 Im Wald wie im Offenland 2.2 Auch im Wald, aber Schwerpunkt im Offenland

Abbildung 4.12: Gefäßpflanzen mit unterschiedlicher Bindung an Wald im Hügel- und Bergland (nach Schmidt et al., 2003) auf den Untersuchungsflächen und für Humusformen (hier sind L- und F-Mull zusammengefasst). Angaben zu den Düngungen in den Tabellen 3.4 und 3.3, Angaben zu den Gefäßpflanzen in Tabelle A.1.

zu verzeichnen. Eine gänzlich untergeordnete Rolle spielen die Therophyten (T). Die Anzahl der Baumarten (P) als Verjüngung in der Krautschicht schwankt nur gering und zeigt keine Tendenz zur Veränderung auf gedüngten Flächen. Bei den verholzten Chamaephyten oder Zwergsträuchern sind fast keine Unterschiede in der Artenzahl zu erkennen.

4.7.2 Unterschiede in der Artenzahl der Krautschicht durch Düngung hinsichtlich Bindung an Waldstandorte

Die deutliche Erhöhung der Artenzahl der Krautschicht auf gedüngten Flächen (Tab. 4.11, 4.19) verteilt sich unterschiedlich auf Artengruppen von krautigen Arten, die unterschied-

4.7 Konsequenzen der Düngungen für die Artenzahl der Moos- und Krautschicht

lich stark an Wald gebunden sind (nach Schmidt et al., 2003, Abb. 4.12). Diese gutachtlich erstellte Einteilung gilt für das Hügel- und Bergland in Deutschland (Tab. A.1, S. 130).

Der Artenreichtum der Baumarten (Abb. 4.12), in der Krautschicht zeigt wie schon festgestellt (Abb. 4.11) keine einheitliche Veränderung auf gedüngten Flächen (s. o.).

Die auf gedüngten Flächen häufiger werdenden Straucharten (N, Abb. 4.11) sind dabei mit nach Fläche wechselnden Schwerpunkten stets an sowohl Wald- als auch an Offenland gebunden (S.2.1, S.2.2, in Abb. 4.12).

Zusammen mit der Baumartenverjüngung (B) bilden die sowohl an Wald als auch an Offenland gebundenen Arten der Gruppe K.2.1. den größten Anteil an der Artenzahl aller Flächen (Abb. 4.12). Diese Gruppe nimmt auf allen gedüngten Flächen gegenüber den ungedüngten Flächen zu. Die Arten mit einem Schwerpunkt im Offenland (K.2.2) spielen hier fast keine Rolle.

Eine deutliche Erhöhung in der Artenzahl auf gedüngten Flächen gegenüber ungedüngten Flächen ist auch bei den „weitgehend an Wald gebundenen Arten (K1)“ und hier dabei fast ausschließlich der Untergruppe K.1.2, den „vorwiegend an Waldrändern und auf Waldverlichtungen“ auftretenden Krautarten, festzustellen (Abb. 4.12).

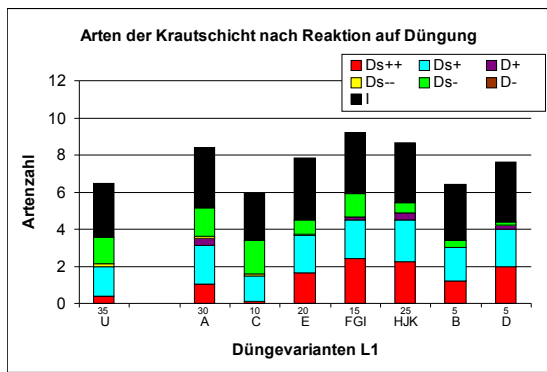
4.7.3 Unterschiede in der Artenzahl der Moos- und Krautschicht hinsichtlich Düngereaktion

Der höhere Artenreichtum in der Krautschicht auf gedüngten Flächen kann im Wesentlichen auf Arten, die positiv auf Düngung (Tab. 4.10, S. 66 und Tab. 4.11, S. 67) reagieren, zurückgeführt werden (Abb. 4.13(a), (b)). Hinsichtlich einer feineren Aufgliederung in Untergruppen (Ds++,Ds+ und D+) ist der mittlere Artenzuwachs der Krautschicht auf gedüngten Flächen je nach Fläche verschieden. Nennenswerte Anteile von auf Düngflächen seltener werdenden Arten der Krautschicht (Ds--, Ds- und D-, Tab. 4.12, S. 69) sind sowohl auf gedüngten, wie auch auf ungedüngten Flächen im Wesentlichen auf die Untersuchungsfläche L1 beschränkt. Die mittlere Artenzahl der hinsichtlich Düngung indifferenten Arten (Tab. 4.13, S. 71) bleibt ziemlich konstant auf allen Flächen.

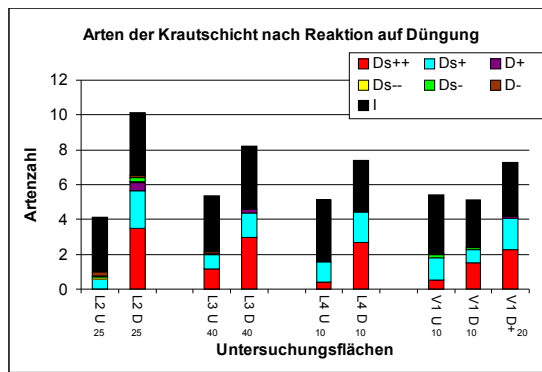
Die sich in ihrer mittleren Artenzahl hinsichtlich Düngung kaum unterscheidenden Arten der Moosschicht (Tab. 4.19(a) u. (d), S. 87) zeigen deutlichere Veränderungen bei der Einteilung nach Düngereaktion (Abb. 4.13(c), (d)). So nehmen im direkten Vergleich auf gedüngten Flächen häufigere Arten (Tab. 4.10, S. 66 und Tab. 4.11, S. 67) der Gruppen Ds++, Ds+ und D+ zu und auf gedüngten Flächen seltener Arten der Gruppen Ds--, Ds- und D- (Tab. 4.13, S. 71) ab. Diese Verschiebung liegt im Bereich von im Mittel einer halben bis etwa zwei Arten.

Damit ist die Artenzunahme auf gedüngten Flächen im Wesentlichen durch eine Zunahme von Arten der Krautschicht bedingt, in der Moosschicht gibt es eher Artenverschiebungen. Zu den auf Düngung negativ reagierenden Arten zählen eher Moos- als Gefäßpflanzenarten (Tab. 4.13, S. 71), diese werden auf gedüngten Flächen tendenziell durch andere Moosarten ersetzt.

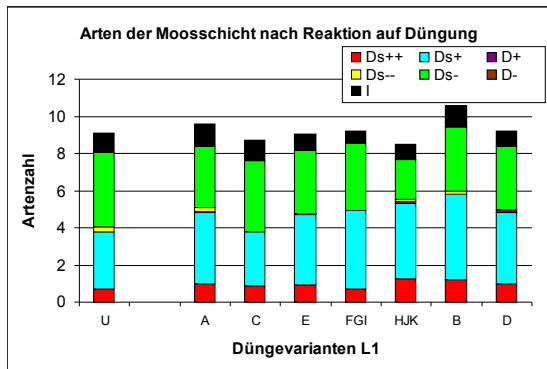
4 Ergebnisse



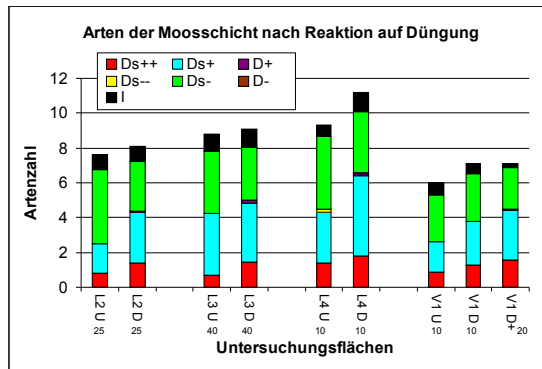
(a) Artenreichtum der Krautschicht nach Düngereaktion für Untersuchungsfläche L1



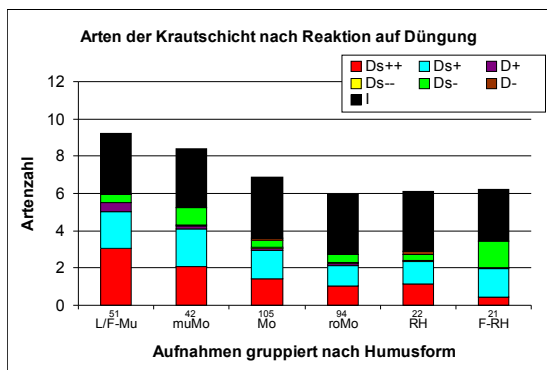
(b) Artenreichtum der Krautschicht nach Düngereaktion für die Untersuchungsfläche L2, L3, L4 und V1



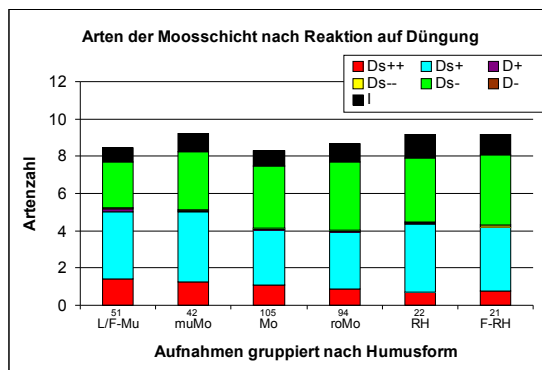
(c) Artenreichtum der Moosschicht nach Düngereaktion für Untersuchungsfläche L1



(d) Artenreichtum der Moosschicht nach Düngereaktion für die Untersuchungsfläche L2, L3, L4 und V1



(e) Artenreichtum der Krautschicht nach Düngereaktion für durch unterschiedliche Humusformen geprägte Aufnahmen



(f) Artenreichtum der Moosschicht nach Düngereaktion für durch unterschiedliche Humusformen geprägte Aufnahmen

Abbildung 4.13: Mittlere Artenzahlen für Moos- und Krautschicht nach ihrer Reaktion auf Düngung für Düngflächen und auf durch verschiedene Humusformen geprägte Aufnahmen. Angaben zu den Düngungen in den Tabellen 3.1 und 3.3, Angaben zu der Reaktion auf Düngung in Abschnitt 4.4.

4.7.4 Unterschiede der Artenzahlen der Moos- und Krautschicht zwischen Aufnahmen mit unterschiedlicher Humusform

In dieser Untersuchung unterscheiden sich Düngflächen von ungedüngten Flächen auch durch eine Zunahme „günstiger“ und eine Abnahme „ungünstiger“ Humusformen (Ab-

4.7 Konsequenzen der Düngungen für die Artenzahl der Moos- und Krautschicht

schnitt 4.2, S. 56, Tab. 4.4 u. 4.5). Die Ausprägung einer Humusform kann als ein Zusammenspiel verschiedener Umweltfaktoren gelten (Arbeitskreis Standortkartierung, Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 1996), die in dieser Untersuchung gut die bodenchemischen und vor allem Nährstoffverhältnisse des Oberbodens ausdrücken (Abschnitt 4.3.2, S. 60). Aus diesen Gründen wird die Artenzahl der Moos- und Krautschicht hier auch nach den die Aufnahmeflächen charakterisierenden Ausprägungen der Humusform für verschiedene Lebensformen und die Bindung an Waldstandorte vorgestellt (Abb. 4.11(c), 4.12(c)).

Der Artenreichtum der Mooschicht (MF) ist wie zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen auch zwischen den Ausprägungen der Humusformen unverändert (Tab. 4.11(c), 4.19(a)). Die Unterschiede im Artenreichtum zwischen den Humusformen sind daher nur auf Arten der Krautschicht zurückzuführen (Tab. 4.19(a), (f), (g)). Die Aufteilung nach positiver oder negativer Reaktion auf Düngung (Abb. 4.13(f)) zeigt keine großen Unterschiede zwischen den einzelnen nach Humusformen gruppierten Aufnahmen. In den Mull und Mullartigen Moder repräsentierenden Aufnahmen ist der Anteil um etwa eine mittlere Art hin zu mehr auf auf Düngung positiv reagierende und zu weniger negativ auf Düngungen reagierender Moosarten verschoben.

Der deutlichste und statistisch abgesicherte Unterschied im Artenreichtum der nach Humusformen gruppierten Aufnahmen (Tab. 4.19(f), (g)) liegt dabei zwischen den Humusformen L-/F-Mull und Mullartiger Moder mit höherer Artenzahl und Moder, Rohhumusartigem Moder, Rohhumus und F-Rohhumus (Abb. 4.11(c), 4.12(c)). Hinsichtlich der Anzahl ausgeschiedener Lebensformen unterscheiden sich diese zwei Gruppen untereinander jedoch kaum. Die Zunahme des Anteils der auf Düngung positiv reagierenden Arten ist dabei allerdings beträchtlich (Abb. 4.13(e), S. 90). Die Zunahme der Artenzahl bei L-/F-Mull und Mullartigem Moder gegenüber den übrigen Humusformen ist wie auch auf gedüngten Flächen hauptsächlich auf eine Zunahme der Hemikryptophyten (H) zurückzuführen. L-/F-Mull hat im Gesamtvergleich einen erhöhten Anteil an Geophyten (G), und bei F-Rohhumus ist ein etwas erhöhter Anteil an Zwergsträuchern (Z) feststellbar, der sonst für alle Humusformen bei ähnlich hohen Werten liegt (Abb. 4.11(c)).

Hinsichtlich der Bindung an Wald oder Offenland liegen die Unterschiede zwischen dem Artenreichtum der nach Humusformen gruppierten Aufnahmen im Wesentlichen bei den Straucharten (S2.1, S2.2 in Abb. 4.12(c)) und den Krautarten (K1.2, K2.1 in Abb. 4.12(c)). Die Anteile dieser Gruppen nehmen bei den Aufnahmen der günstigeren Humusformen L-F-Mull, Mullartiger Moder und in etwas geringerem Maße bei Moder gegenüber den übrigen Aufnahmen zu.

4.7.5 Rangkorrelationen (Spearman) zwischen Umweltvariablen und Artenzahl

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse der gemessenen Umweltvariablen auf die Artenzahl in jeder Vegetationsaufnahme getrennt und zusammen für die Moos- und Krautschicht näher beleuchtet. Tabelle 4.20 gibt dabei einen Überblick über einfache Zusammenhänge durch Rangkorrelationen nach Spearman zwischen der Artenzahl getrennt nach Moos- und Krautschicht und für beide Schichten zusammen mit Umweltvariablen.

Zwischen den Umweltvariablen und der Artenzahl der Mooschicht ist kein Betrag für einen Korrelationskoeffizienten hoch genug, als dass auf einen Zusammenhang ge-

Tabelle 4.20: Rangkorrelationen nach Spearman (R) der Artenzahlen der Moos- und Krautschicht mit Umweltvariablen (ausreißerbereinigter Datensatz, $n = 300$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ Signifikanz).

Variable	S Moos- und Krautschicht	S Krautschicht	S Mooschicht
Oh + Of (cm)	-0,34**	-0,43**	-0,03
PACL	0,31**	0,30**	0,15*
pH H ₂ O	0,18**	0,30**	-0,07
pH CaCl ₂	0,21**	0,37**	-0,11**
C	0,27**	0,26**	0,16**
N	0,29**	0,31**	0,12*
P	0,33**	0,35**	0,12*
Ca	0,32**	0,37**	0,04
Mg	0,10*	0,19**	-0,08
K	0,16**	0,20**	0,02
C/N	-0,07	-0,15*	0,09
C/P	-0,06	-0,11	0,06
N/P	-0,03	-0,04	0,01
Abies BS ¹	0,06	0,00	0,10
Pinus BS ¹	0,06	-0,00	0,07
Picea BS ¹	-0,13*	-0,09	-0,11*

¹ BS: Baumschicht

geschlossen werden kann. Zwischen der Artenzahl der Krautschicht und der Artenzahl der Moos- und Krautschicht zusammen bestehen interpretierbare Zusammenhänge. Es gibt keinen Zusammenhang zwischen der Artenzahl der Moos- und Krautschicht und einer Umweltvariable, der wesentlich größer ist, als der Zusammenhang zwischen der Artenzahl der Krautschicht allein mit den jeweiligen Umweltvariablen. Demnach bestehen im Wesentlichen Zusammenhänge zwischen der Anzahl der Arten der Krautschicht und Umweltvariablen.

Mit der Artenzahl der Krautschicht bestehen positive Korrelationen mit dem Lichtanteil (PACL), der Bodenreaktion im Oberboden 0–5 cm (pH) und Nährstoffen (Phosphor und Stickstoff) sowie dem Kalziumgehalt im Oberboden. Am stärksten ist der negative Zusammenhang zwischen der Artenzahl der Krautschicht und der Mächtigkeit der organischen Auflagen.

Insgesamt kann aus diesen Ergebnissen auf einen positiven Einfluss von Licht und Nährstoffen auf die Artenzahl der Krautschicht geschlossen werden.

4.7.6 Erklärung der Artenzahl durch lineare multiple Regressionsmodelle

Durch drei verschiedene lineare multiple Regressionsmodelle kann die Artenzahl der Moos- und Krautschicht beschrieben werden. Im Einklang mit den Ergebnissen aus dem obigen Abschnitt konnte kein Modell allein für die Artenzahl der Mooschicht durch Umweltvariablen erstellt werden. Die beiden Modelle, die nur die Artenzahl der Krautschicht beschreiben, haben eine etwas höhere Varianzaufklärung als das Modell für die Artenzahlen der Moos- und Krautschicht (s. u.).

Sämtliche Regressionsmodelle sind dabei global und in den einzelnen unabhängigen

4.7 Konsequenzen der Düngungen für die Artenzahl der Moos- und Krautschicht

Variablen signifikant getestet, die drei Modelle sind dabei jeweils etwas autokorreliert (Tab. 4.21, S. 95, Tab. 4.22, S. 95, Tab. 4.23, S. 96). Die Validierung mit einer unabhängigen Stichprobe ergibt für jedes der drei Modelle vergleichbare Mittelwerte zwischen beobachteten und Modellwerten. Auch die Korrelationskoeffizienten (R nach Spearman) zeigen jeweils deutliche Zusammenhänge zwischen beobachteten und Modellwerten der Validierungsstichprobe (Abb. C.2, S. 136, Abb. C.3, S. 137).

4.7.6.1 Artenzahl der Moos- und Krautschicht

Die Artenzahl (S) der Moos- und Krautschicht kann am besten durch Lichtanteile (PACL) sowie Phosphor- und Kalziumgehalte (Druckaufschluss) des Oberbodens mit folgender Regressionsgleichung beschrieben werden:

$$S = 12,374 + 3,995 \cdot (\log_{10} P) + 3,327 \cdot (\log_{10} Ca) + 8,217 \cdot (\log_{10} PACL)$$

Die Artenzahl der Moos- und Krautschicht steigt dabei mit höheren Lichtanteilen und höheren Phosphor- und Kalziumgehalten. Mit dem Modell lassen sich etwa 21 % der Varianz erklären. Von den standardisierten Werten der β -Werte für die Variablen hat dabei Licht (PACL) einen leicht höheren Einfluss als Phosphor- und Kalziumgehalte im Oberboden (Tab.4.21).

4.7.6.2 Artenzahl der Krautschicht

Die Artenzahl (KS) der Arten in der Krautschicht lässt sich mit zwei Regressionsmodellen ähnlich gut beschreiben (Tab. 4.22, 4.23). Im Vergleich zu dem obigen Modell ist die Varianzaufklärung hier etwas höher ($R^2 = 0,275$ und $R^2 = 0,279$). Die beiden Modelle beschreiben die Artenzahl der Krautschicht jeweils mit Lichtanteilen (PACL), der H^+ -Ionen-Konzentration und Kalziumgehalten des Oberbodens, unterscheiden sich dann aber jeweils durch die Variable Phosphor- und Stickstoffgehalt. Die Beschreibung erfolgt durch die beiden Regressionsgleichungen:

$$KS = 6,350 - 764,555 \cdot H_{CaCl_2}^+ + 2,789 \cdot (\log_{10} P) + 2,883 \cdot (\log_{10} Ca) + 5,315 \cdot (\log_{10} PACL)$$
$$KS = 4,097 - 932,189 \cdot H_{CaCl_2}^+ + 2,620 \cdot (\log_{10} N) + 3,020 \cdot (\log_{10} Ca) + 5,098 \cdot (\log_{10} PACL)$$

Beiden Modellen gemeinsam ist, dass die höchsten standardisierten β -Gewichte auf die Variablen Kalzium gefolgt vom Lichtanteil entfallen, die damit am stärksten zur Steigung der Regressionsgeraden beitragen. Dann folgen je nach Modell die standardisierten β -Gewichte für Phosphor- und Stickstoffgehalte des Oberbodens, während die Bodenreaktion ($H^+ CaCl_2$) in beiden Modellen eine leicht geringere Rolle spielt.

Beide Modelle implizieren höhere Artenzahlen durch höhere Kalzium-, Phosphor- und Stickstoffgehalte und pH-Werte im Oberboden und erhöhten Lichtgenuss (PACL).

4.7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Beeinflussung der Artenzahl durch Düngungen

Aus den Ergebnissen der Vergleiche der Artenzahlen der Moos- und Krautschicht für unterschiedlich gedüngte Flächen und der durch unterschiedliche Ausprägungen von Humusformen charakterisierten Aufnahmen sowie aus Rangkorrelationen der Umweltvariablen mit den Artenzahlen der Moos- und Krautschicht und den drei Regressionsmodelle können für diese Untersuchung folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Erhöhung der Artenzahlen auf gedüngten Flächen ist überwiegend auf Arten der Krautschicht zurückzuführen.
 - Der überwiegende Anteil dieser Arten gehört zu den durch Düngung geförderten Arten (vgl. Abschnitt 4.4 und Abb. 4.13).
 - Diese gehören überwiegend zu den Lebensformen der Nanophanerophyten und Hemikryptophyten (vgl. Abb. 4.11).
 - Es nehmen vor allem den Gruppen „stärker an Wald gebundene Arten“ und „an Wald und Offenland gebundene Arten“ zugeordnete Krautarten zu (vgl. Abb. 4.12).
- In der Mooschicht bleibt die Artenzahl eher konstant, dafür werden auf gedüngten Flächen manche auf Düngung empfindlich reagierende Arten tendenziell durch andere auf Düngung positiv reagierende Arten ersetzt.
- Die durch unterschiedliche Humusformen charakterisierten Aufnahme­flächen zeigen Unterschiede in der Artenzahl der Krautarten.
 - Die „günstigeren“ Humusformen Mull und Mullartiger Moder sind mit höheren Artenzahlen verbunden als die „ungünstigeren“ Humusformen.
 - Hier lässt sich bei gleicher Artenzahl in der Mooschicht auch tendenziell eine Zunahme durch Düngung geförderter und eine Abnahme durch Düngung seltener werdender Moosarten feststellen.
 - Auf Aufnahmen mit günstigeren Humusformen nehmen vor allem wieder Hemikryptophyten und Straucharten zu. Dazu zählen viele durch Düngung geförderte Arten. Diese sind entweder stärker an Wald oder an Wald und Offenland gebunden.
- Der Artenreichtum der Arten der Krautschicht steigt mit Lichtgenuss, Bodenreaktion (pH), Kalziumgehalten und Nährstoffen (P und N).

4.7 Konsequenzen der Düngungen für die Artenzahl der Moos- und Krautschicht

Tabelle 4.21: Lineares Regressionsmodell zur Erklärung der Artenzahl von Moos- und Krautschicht – β -Gewichte und statistische Kenngrößen. Zur Methode vgl. 3.3.3.4, S. 37 ff.

Das Modell $n = 260$			
R^2			0,221
R^2 korrigiert			0,211
Durbin-Watson d			1,391
P für Autokorrelation			0,304
Gesamtmodell $F = 24,145$ ($n = 256; 3$) $p \leq$			0,0000
Standardfehler der Schätzung:			3,188

Variable	Variablen		
	β	Standardfehler β	t ($n = 256$)
Konstante	12,374**	1,981	6,246
P (\log_{10})	0,193**	0,059	3,267
Ca (\log_{10})	0,230**	0,059	3,920
PACL (\log_{10})	0,292**	0,055	5,262

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ Signifikanz

Tabelle 4.22: Lineares Regressionsmodell (Phosphor) zur Erklärung der Artenzahl der Krautschicht – β -Gewichte und statistische Kenngrößen. Zur Methode vgl. 3.3.3.4, S. 37 ff.

Das Modell $n = 260$			
R^2			0,286
R^2 korrigiert			0,275
Durbin-Watson d			1,516
P für Autokorrelation			0,241
Gesamtmodell $F = 25,598$ ($n = 255; 4$) $p \leq$			0,0000
Standardfehler der Schätzung:			2,295

Variable	Variablen		
	β	Standardfehler β	t ($n = 256$)
Konstante	6,350**	1,446	4,392
H ⁺	-0,134 *	0,061	-2,211
P (\log_{10})	0,179**	0,059	3,013
Ca (\log_{10})	0,265**	0,058	4,566
PACL (\log_{10})	0,251**	0,054	4,651

H⁺ in CaCl₂

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ Signifikanz

Tabelle 4.23: Lineares Regressionsmodell (Stickstoff) zur Erklärung der Artenzahl der Krautschicht – β -Gewichte und statistische Kenngrößen. Zur Methode vgl. 3.3.3.4, S. 37 ff.

Das Modell $n = 260$			
R^2			0,290
R^2 korrigiert			0,279
Durbin-Watson d			1,530
P für Autokorrelation			0,234
Gesamtmodell $F = 26,025$ ($n = 255; 4$) $p \leq$			0,0000
Standardfehler der Schätzung:			2,290

Variable	Variablen		
	β	Standardfehler β	t ($n = 256$)
Konstante	4,097**	1,400	2,927
H ⁺	-0,163**	0,058	-2,811
N (\log_{10})	0,177**	0,055	3,215
Ca (\log_{10})	0,278**	0,057	4,872
PACL (\log_{10})	0,241**	0,054	4,460

H⁺ in CaCl₂

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ Signifikanz

5 Diskussion

Im folgenden Kapitel sollen zunächst die angewandten Methoden kritisch betrachtet werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung mit denen ähnlicher Studien verglichen. Ein weiterer wichtiger Diskussionspunkt ist die Vergleichbarkeit der langfristigen Wirkungen von Walddüngungen mit denen von Kompensationskalkungen, die heute durchgeführt werden. Abschließend werden Schlussfolgerungen gezogen und Praxisempfehlungen gegeben.

5.1 Kritische Betrachtung der angewandten Methoden

In dieser Untersuchung wurden sowohl bei der Datenaufnahme im Gelände und im Labor als auch in der Datenauswertung eine Vielzahl von Methoden angewandt. Die Wahl der Methoden und die Genauigkeit und Dichte der Analysen hat Folgen für die Aussagekraft und Gültigkeit der Ergebnisse. Im folgenden Abschnitt werden daher die methodischen Grenzen dieser Untersuchung aufgezeigt. Eine kritische Betrachtung der gewählten statistischen Verfahren erfolgte bereits in Kapitel 3 „Material und Methoden“.

5.1.1 Flächenauswahl

Die hier ausgewählten Bestände sind angesichts des beschränkten Angebots als bestmöglicher Kompromiss zu betrachten. Besonders gänzlich ungedüngte und ungekalkte Flächen sind im Untersuchungsgebiet nur sehr begrenzt vorhanden (vgl. Kapitel 2).

Unterschiede in der Bestandesstruktur und der Baumartenzusammensetzung zwischen gedüngten und ungedüngten Vergleichsflächen sind besonders bei Untersuchungsfläche V1 nicht vermeidbar gewesen (vgl. Kapitel 3). Durch die Berücksichtigung der Deckungssumme der drei häufigsten Baumarten Tanne, Fichte und Kiefer sowie die Schätzung des Lichtanteils (PACL) als Umweltvariablen lassen sich diese Unterschiede jedoch als mögliche Störgrößen fassen. Die Verteilung über fünf Untersuchungsgebiete relativiert zudem die Überbewertung einzelner Flächencharakteristika. Dies gilt auch für die aktuell nicht mehr quantifizierbare historische Streunutzung.

Auf den Standorten vor allem im Oberen Buntsandstein besteht die Gefahr einer eingeschränkten Vergleichbarkeit von Düngevarianten durch den kleinräumigen Wechsel verschiedener Standortsausprägungen (MLR Baden-Württemberg, 2002b; Aldinger et al., 1998; Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 1991). Besonders auf Untersuchungsfläche L1 sind manche Düngevarianten nur durch eine geringe Fallzahl repräsentiert. Unterschiede sind besonders im Wasserhaushalt und eventuell bei bodenchemischen Eigenschaften zu erwarten und überlagern möglicherweise die Wirkung der Düngung auf Vegetation und Oberbodenzustand. Der Vergleich wichtiger bodenchemischer Kennwerte und gemittelter Feuchtezahlen nach Ellenberg et al. (1992) zwischen den als „mehr oder weniger vernässenden“ und „nichtvernässenden“ zusammengefassten Standortseinheiten ungedüngter Flächen zeigt jedoch kaum signifikante Unterschiede in bedeutenden Grö-

ßenordnungen (Tab. B.1, S. 134). Damit dürfte eine Verzerrung der Ergebnisse, die auf kleinräumigen Standortsunterschieden beruht, nicht sehr groß sein und die Aussagekraft dieser Untersuchung nicht in Frage stellen.

5.1.2 Analyse der Bodenproben

Während die Analyse der pH-Werte und des Stickstoffgehaltes im Oberboden für dort wurzelnde Pflanzen die aktuell physiologischen Bedingungen beschreibt, so geben die im Druckaufschlussverfahren am ICP gemessenen Elemente Aufschluss über deren langfristige Verfügbarkeit.

Damit unterscheidet die Messung nicht zwischen pflanzenverfügbarem und festgelegtem Phosphor im Boden. Dennoch sind Rückschlüsse auf den Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor möglich. Da diese oder sehr ähnliche Methoden der Phosphormessung auch in anderen Untersuchungen benutzt wurden, besteht der Vorteil einer guten Vergleichbarkeit (z. B. von Wilpert, 2003; Jandl et al., 2002, 2000). Die Gesamtgehalte der Kationen Kalzium, Magnesium und Kalium geben Hinweise auf ihre langfristige Verfügbarkeit aus dem Mineralboden. Die Gesamtgehalte setzen sich aus den Fraktionen der austauschbaren und der in organischem Material sowie in Mineralien festgelegten Kationen zusammen. In der Untersuchung von Jandl et al. (2002, 2000) werden Werte sowohl für austauschbare als auch für Gesamtgehalte der Kationen im Mineralboden angegeben. Eine Erhöhung der Kationengesamtgehalte bedeutet dort immer auch eine Erhöhung an den Austauschern.

Neben den zentralen Nährelementen Phosphor und Stickstoff spielt in dieser Untersuchung auch der Kalziumgehalt eine wichtige Rolle bei der Beschreibung der Vegetationsveränderungen, z. B. in der Redundanzanalyse und in den Regressionsgleichungen zur Erklärung des Artenreichtums. Weiterhin kann Kalzium zur Differenzierung der Humusformen und zur Beschreibung der Mächtigkeit der organischen Auflagen herangezogen werden. Auch wenn hier keine Werte für das austauschbare Kalzium angegeben werden können, ist es sehr wahrscheinlich, dass dieses mit der Menge des säurelöslichen Kalziums stärker korreliert (z. B. Jandl et al., 2002, 2000).

Nicht chemisch analysiert wurden die zum Teil mächtigen organischen Auflagen der Untersuchungsflächen. Deshalb kann in dieser Untersuchung keine Aussage über ihre Bedeutung für die Nährstoffversorgung der Vegetation getroffen werden. Die Auflagen können eine wichtige Quelle für die Nährstoffversorgung der Pflanzen sein. Besonders die Phosphor- und Stickstoffversorgung aus Mineralisation der organischen Auflagen kann bedeutend sein. Im Zusammenhang mit anthropogener Versauerung des Mineralbodens gilt dies auch verstärkt für die Magnesiumversorgung flachwurzelter Bäume durch den „kleinen Nährstoffkreislauf“ (z. B. von Wilpert, 2003). Auf natürlich bodensauren Standorten bezieht die meist aus mykorrhizierten *Ericaceen* bestehende Vegetation ihren Nährstoffbedarf aus den mächtigen organischen Auflagen (Giesler et al., 1998). Auch wenn in der vorliegenden Untersuchung aus finanziellen Gründen keine Analysen gemacht werden konnten, ist es möglich aus dem chemischen Zustand des Oberbodens, der Humusform und den Mächtigkeiten der Auflagen Rückschlüsse über die Beschaffenheit des Auflagehumus zu ziehen.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Die Veränderung des Oberbodenzustandes durch Düngung

In dieser Untersuchung kann 45 bis 37 Jahre nach Düngungen mit Kalk, Phosphat und zum Teil mit Stickstoff und Kalium eine Veränderung des Oberbodens beobachtet werden. Deutlich erhöht sind vor allem Kalzium- und Phosphorgehalte (Druckaufschluss). Weitere, wenn auch weniger deutliche Erhöhungen sind bei den pH-Werten, Stickstoff- und Magnesiumgehalten (HCl-HNO₃-Druckaufschluss) zu beobachten. Die C/N- und C/P-Verhältnisse verengen sich durch Düngung, während der Kohlenstoffgehalt nur tendenziell erhöht ist. Kaliumgehalte (HCl-HNO₃-Druckaufschluss) zeigen zwar eine Tendenz zur Erhöhung, doch schon zwischen den fünf ungedüngten Standorten schwanken die Messwerte stark.

In einem weiteren Zusammenhang sind auch die Veränderungen der organischen Auflagen wichtig, da diese bei Umsetzungsprozessen in den Mineralboden eingearbeitet werden und diesen dadurch verändern. Die Mächtigkeiten der organischen Auflagen sind auf gedüngten Flächen geringer, günstige Humusformen kommen häufiger vor.

Lang- und kurzfristige Veränderungen der chemischen Bodeneigenschaften durch Kalkung, zum Teil mit Zusatz weiterer Dünger, werden durch viele weitere Untersuchungen und praktische Erfahrungen bestätigt (vgl. Kapitel 2). Das Bodenleben und Umsetzungsprozesse im Oberboden werden gefördert. Vor allem Regenwürmer bauen durch ihre Wühltätigkeit organische Auflagen in den Mineralboden ein (Hölscher et al., 1999; Immer et al., 1993; Robinson et al., 1992). Ein weiterer Effekt ist eine nährstoffreichere und damit leichter abbaubare Nadel- oder Laubstreu gekalkter oder gedüngter Waldbestände. Im Buntsandstein des Nordschwarzwalds waren allerdings nur die Kalziumspiegel der Nadelstreu durch Düngung langfristig erhöht (von Wilpert, 2003).

Wie lange alle diese Effekte nach einmaliger Kalkung fortwirken, hängt offenbar auch mit der Dosierung der Düngung und weiterhin mit der Höhe bodenversauernder Immissionen zusammen. So stellen Immer et al. (1993) fest, dass die Veränderungen 35 Jahre nach einer Kalkung im Mineralboden nur sehr schwach nachweisbar sind, dagegen enthalten die organischen Auflagen gedüngter Flächen deutlich mehr Kalzium. Durch kalkbetonte lang zurückliegende Düngungen ist durchgängig bei allen einschlägigen Untersuchungen eine Erhöhung der pH-Werte im Oberboden bodensaurer Standorte feststellbar. Diese Erhöhung ist bei vergleichsweise geringen Kalkgaben von unter 3 t/ha langfristig weniger deutlich ausgeprägt als bei hohen (von Wilpert, 2003; Jandl et al., 2002; Hölscher et al., 1999; Immer et al., 1993; Kenk et al., 1984; Ulrich & Keuffel, 1970). Mit einer kalkbetonten Düngung ist auch langfristig eine Erhöhung von austauschbarem Kalzium, teilweise auch von Magnesium, verbunden. Diese Erhöhung an austauschbarem Kalzium und Magnesium kann aber wiederum durch sauer wirkende Immissionsbelastung überprägt und daher nach Jahrzehnten nicht mehr erkennbar sein (vgl. besonders von Wilpert, 2003; Immer et al., 1993; Hildebrand, 1986; Kenk et al., 1984). Dies könnte auch für die hier untersuchten Böden in Gebieten mit einer mäßigen Immissionsbelastung gelten (vgl. Abschnitt 3.1.3, S. 26).

Erhöhte Magnesiumwerte an den Austauschern des Mineralbodens weisen auf Magnesiumanteile in den gedüngten Kalken hin (von Wilpert, 2003; Kenk et al., 1984). Diese sind möglicherweise zusammen mit Magnesiumanteilen aus mineralisierten Auflagen für

die durch Düngung erhöhten säurelöslichen Magnesiumgehalte dieser Untersuchung verantwortlich. Es wurde keine Fläche gezielt mit Magnesium gedüngt (Tab. 3.3 u. 3.4).

Ein Zusammenhang zwischen austauschbaren und säurelöslichen (HCl-HNO_3), basisch wirksamen Kationen im Oberboden kann mangels Messungen für die eigene Untersuchung nur vermutet werden (vgl. Abschnitt 5.1.2, S. 98), da durch die angewendeten Methoden unterschiedliche Fraktionen im Mineralboden erfasst werden. In dieser Untersuchung können Vegetationsveränderungen u. a. mit säurelöslichem Kalzium beschrieben werden. Dieses wird daher in einem gewissen Maß mit pflanzenverfügbarem Kalzium korrelieren. In der Untersuchung von Jandl et al. (2002, 2000) liegen sowohl für säurelösliche, als auch für austauschbare Kationen Messwerte im Oberboden vor. Diese sind jeweils durch eine kombinierte Düngung mit Kalk, Phosphat, Stickstoff und Magnesium erhöht. Ein Zusammenhang zwischen einem höheren Gehalt säurelöslicher Neutralkationen und einer höheren Belegung am Austauscher liegt damit auch für diese Untersuchung nahe.

Die Gesamtgehalte von Phosphor im Oberboden lassen in der vorliegenden Untersuchung mit steigender Menge gedüngten Phosphats eine gewisse Steigerung erkennen. Dabei kann ein Teil dieser Erhöhung auch auf Anteile von in den Mineralboden eingearbeitetem Auflagehumus zurückzuführen sein (von Wilpert, 2003). Die im Vergleich zur eigenen Untersuchung mit einer relativ geringen Menge von 1 t/ha Thomasphosphat zusätzlich zum Kalk gedüngten Felder der Untersuchung von von Wilpert (2003) weisen auf ähnlichen Standorten nur im Oberboden und nicht im Unterboden signifikant höhere Phosphorgehalte auf. Eine weitere Bestätigung für die Erhöhung von säurelöslichem Phosphor im Oberboden und in den organischen Auflagen durch eine Düngung mit Kalk, Phosphat (0,5 t/ha Thomasphosphat), Stickstoff, Kalium und Magnesium geben die Ergebnisse der Untersuchung von Jandl et al. (2002, 2000).

In der vorliegenden Untersuchung zeigt Kohlenstoff nur eine geringe Tendenz zur Erhöhung durch Düngung. In der spezifischen Literatur wirken sich Walddüngungen langfristig uneinheitlich auf Kohlenstoffgehalte im Mineralboden aus. So sinken die Kohlenstoffgehalte im Mineralboden durch langfristige Düngewirkung auf den mit einer Basensättigung von 21,5 % relativ gut basenversorgten Böden der Untersuchung von Jandl et al. (2002, 2000) leicht ab. Dagegen stellt z. B. von Wilpert (2003) eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes im Mineralboden nach Kalkung fest (Basensättigung 12–15 %). Diese Unterschiede können durch eine höhere Mineralisationsrate bedingt sein. Dabei wird kurz- bis langfristig nach einer Kalkung oder Düngung organisches Material vor allem durch Regenwürmer in den Mineralboden eingearbeitet. Gleichzeitig wird aber auch die Abbaurate gesteigert, die diesen Effekt wieder aufheben kann. Auch die bereits angesprochene biologisch aktive Phase, die nach Düngung zunehmend nachlässt (Immer et al., 1993), kann sich auf die Umsetzung des Kohlenstoffs im Mineralboden auswirken.

Die in dieser Untersuchung festgestellte tendenzielle Erhöhung von Stickstoff im Mineralboden nach Düngung dürfte in allererster Linie auf die das Bodenleben fördernde Wirkung des Kalkes zurückgeführt werden. Es konnte hier keine besondere Erhöhung der Stickstoffgehalte im Oberboden auf stickstoffgedüngten Flächen festgestellt werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von von Wilpert (2003), der aus den Ergebnissen von Nadelanalysen folgert, dass Stickstoff innerhalb von zehn Jahren nach Stickstoffdüngung und Kalkung den Stoffkreislauf verlässt. In diesem Zusammenhang lassen sich auch die in dieser Untersuchung durch Düngung verengten C/N Verhältnisse im Oberboden

als Folge einer durch Kalkung bedingten höheren Umsetzungsrate verstehen. Für die Erhöhung der C/P-Verhältnisse ist neben stärkerer biologischer Aktivität durch Kalkung auch deutlich die Phosphatdüngung mitverantwortlich, teilweise wird das C/P-Verhältnis stark durch historischen Streuentzug (F-Rohhumus) überprägt.

Weitere Schlussfolgerungen werden abschließend im Zusammenhang mit den düngungebedingten Veränderungen der organischen Auflagen erörtert.

5.2.2 Die Veränderung der organischen Auflagen durch Düngung

Die in dieser Untersuchung festgestellte Zunahme „günstiger“ Humusformen verbunden mit einer Abnahme der Auflagenmächtigkeit als langfristige Folgen einer Düngung wird durch die Ergebnisse anderer Untersuchungen bestätigt (z. B. Immer et al., 1993; Hölscher et al., 1999). Ursache dafür ist in erster Linie die durch günstigere Bodenverhältnisse bedingte Förderung des Bodenlebens. Neben der direkten bodenchemischen Veränderung durch die eingebrachten Düngemittel sind daran in der Folge höhere Kationen- und Nährstoffspiegel in der Laub- und Nadelstreu beteiligt. Besonders Kalzium könnte hier, wie z. B. auf Untersuchungsflächen im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes durch von Wilpert (2003) nachgewiesen, langfristig im Streukreislauf verbleiben. Die organischen Auflagen werden also durch Kalkung und Düngung chemisch verändert (Jandl et al., 2002; Immer et al., 1993) und sind damit leichter mineralisierbar. Der langfristige Abbau mächtigerer organischer Auflagen ist im Zusammenhang mit langfristigen Änderungen der Artenzusammensetzung der streu- und mineralbodenbewohnenden Zersetzer zu sehen.

Eine weitere wichtige Größe, die bei Veränderungen der organischen Auflagen allgemein und besonders in Wechselwirkung mit kalkbetonten Düngungen diskutiert wird, sind Stickstoffimmissionen (Kraft et al., 2003; Arbeitskreis Standortkartierung, Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 1996). Allerdings ist dieser Faktor in der vorliegenden Untersuchung vermutlich von untergeordneter Bedeutung, da das C/N-Verhältnis im Oberboden eine signifikante Rolle für die Beschreibung der Mächtigkeit der organischen Auflagen spielt (Kapitel 4.3.3, S. 62) und Unterschiede zwischen „günstigen“ und „ungünstigen“ Humusformen im C/N-Verhältnis des Oberbodens erkennbar sind. Eine vollständige Nivellierung der C/N-Verhältnisse durch Stickstoffimmissionen, wie dies in manchen Wäldern Deutschlands beobachtet wird (Arbeitskreis Standortkartierung, Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 1996), ist hier also nicht zu beobachten. Diese Vermutung wird durch weitere Untersuchungen in der nahen Umgebung bestätigt. Kraft et al. (2003) fanden im Nordschwarzwald im direkten Zeitvergleich zwischen den aktuellen Ausprägungen von Humusformen und der Mächtigkeit organischer Auflagen und denen der 1950er Jahre keine bedeutenden Unterschiede. Zudem sind die Konzentrationen von Stickstoffverbindungen in der Luft im östlichen Schwarzwald vergleichsweise niedrig (Kapitel 3.1.3; Hug et al., 2005), sodass dort nur geringe Auswirkungen von Stickstoffeinträgen zu erwarten sind.

Mit der Zeit lässt die Wirkung einer Düngung nach (z. B. von Wilpert, 2003; Immer et al., 1993). Die Faktoren, die in dieser Untersuchung zum Abbau der Auflagen geführt haben, waren in den Jahren unmittelbar nach den Düngungen vermutlich stärker wirksam. Der heutige bodenchemische Zustand lässt einen Zusammenhang zwischen für das

Bodenleben günstigeren bodenchemischen Bedingungen im Oberboden und in den organischen Auflagen erkennen. Dies ist in den Untersuchungen von Jandl et al. (2002) und Immer et al. (1993) jeweils der Fall und dort durch chemische Analysen des Oberbodens und der Auflagen bestätigt. Inwieweit der Abbau der organischen Auflagen dieser Untersuchung heute noch stattfindet oder ob die heutigen Beobachtungen auf eine frühere biologisch aktive Phase nach der Düngung zurückzuführen sind (Immer et al., 1993), ist unklar. Schließlich sind die bodenchemischen Verhältnisse auf den Flächen zwar erkennbar durch Düngung erhöht, die Messwerte der gedüngten Flächen liegen aber im Vergleich mit anderen bodensauren Standorten trotzdem noch in einem sehr niedrigen Bereich.

5.2.3 Langfristige Vegetationsveränderungen durch Walddüngungen

In dieser Untersuchung konnten 37 bis 45 Jahre nach Düngungen Veränderungen in der Bodenvegetation festgestellt werden.

Die Stetigkeit vieler Arten unterscheidet sich zwischen gedüngten und ungedüngten Flächen. Nach Stetigkeitsveränderung hinsichtlich Düngung ausgeschiedene Artengruppen unterscheiden sich beim Vergleich der Mittelwerte und Mediane der Zeigerwerte für Stickstoff- und Reaktionszahlen nach Ellenberg et al. (1992). In einer direkten Ordination (RDA) lassen sich diese Gruppen entlang eines Nährstoffgradienten anordnen. Auf gedüngten Flächen stetigere Arten sind meist hinsichtlich Nährstoffversorgung anspruchsvollere Moos- und Krautarten. Auf den gedüngten Flächen zurückgehende Arten sind meist Säure- oder Starksäurezeiger nach Ellenberg et al. (1992), die die nährstoffärmeren und bodensaureren Bereiche sowohl gedüngter als auch ungedüngter Flächen dieser Untersuchung besiedeln.

Andere Studien kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Das Auftreten der Farne *Dryopteris dilatata* und *Athyrium filix-femina*, vereinzelt auch von *Dryopteris filix-mas*, ist in dieser Untersuchung an günstige Nährstoffverhältnisse im Oberboden gekoppelt, die durch Düngung zunehmen. In den Untersuchungen von Jandl et al. (2002, 2000); Becker et al. (1992) und Schornick (1990) wurde gleichermaßen beobachtet wie Farnarten zusammen mit anderen hinsichtlich der Nährstoffversorgung anspruchsvolleren Krautarten auf gedüngten Waldflächen die auf ungedüngten Flächen durch Zwergsträucher dominierte Vegetation mosaikartig unterbrechen. Becker et al. (1992) beobachteten dabei in den Vogesen ein herdenartiges Auftreten von *Festuca altissima*, was in dieser Untersuchung auch bei Fläche L3D (vgl. Abb. 3.1) festgestellt wurde.

Weitere anspruchsvollere Arten der Krautschicht, die in der vorliegenden Untersuchung und anderen Untersuchungen durch Düngung zunehmen sind *Milium effusum*, *Oxalis acetosella* und die Brombeere (*Rubus fruticosus* agg.). Diese Arten stellt Schornick (1990) zu den eine „stärkere Nährstoffverbesserung anzeigenden“ Arten stärker gedüngter Flächen. Auch Becker et al. (1992) bestätigen die langfristige Zunahme von *Rubus fruticosus* agg. und *Oxalis acetosella* durch kalkbetonte Düngungen.

Von den häufiger vorkommenden Moosarten sind in dieser Untersuchung *Eurhynchium striatum*, *Thuidium tamariscinum*, *Hylocomium splendens* und *Rhytidiadelphus loreus* häufiger auf gedüngten Flächen zu finden. Diese Ergebnisse werden bei *Thuidium tamariscinum* durch die Arbeit von Schornick (1990) bestätigt, während die anderen Arten

dort teilweise zum allgemein verbreiteten Artenspektrum zählen. Dies ist wahrscheinlich auf das im Vergleich zu der vorliegenden Untersuchung breitere Standortsspektrum mit günstigeren Standorten in der Untersuchung von Schornick (1990) zurückzuführen.

Kritisch zu beurteilen ist die in dieser Untersuchung vorgenommene Einordnung von *Rhytidiadelphus loreus* als eine auf Düngung positiv reagierende Art trotz der signifikant höheren Stetigkeit auf gedüngten Flächen (Artengruppe Ds+ in Tab. 4.10). Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass das gehäufte Auftreten dieser Art und deren Deckung stark zwischen den einzelnen Flächen schwankt (Abb. 4.7); diese Moosart tritt z. B. besonders auf Untersuchungsfläche L3 sowohl auf gedüngten als auch auf ungedüngten Flächen mit hoher Deckung auf. Weiterhin zeigt diese Art eine starke Abnahme der Deckung entlang der ersten Ordinationsachse der RDA, die als von verschiedenen Umweltfaktoren zusammengesetzter und von den Wirkungen der Düngung weitgehend unbeeinflusster „Flächengradient“ interpretiert wurde (vgl. Abschnitt 4.5.2). So nimmt die Deckung von *Rhytidiadelphus loreus* vor allem mit steigenden Tannenanteilen (*Abies alba*) in der Baumschicht zu. Aufgrund dieses Verhaltens ist die Zuordnung dieser Art als Indikator für langfristige zurückliegende Walddüngungen in dieser Untersuchung nicht eindeutig.

Durch Düngung nimmt die Zahl krautiger Arten zu. Viele in dieser Untersuchung nur ganz vereinzelt vorkommende anspruchsvollere Krautarten tragen in ihrer Gesamtheit zu der höheren Artenzahl gedüngter Flächen bei. Diese sind in dieser Untersuchung meist in der Gruppe D+ (vgl. Tab. 4.11, S. 67) zu finden. Dies ist nicht nur eine langfristige Folge von Düngung (vgl. auch Jandl et al., 2002, 2000; Becker et al., 1992; Schornick, 1990). Ein höherer Artenreichtum vor allem von anspruchsvollen Krautarten wird bereits kurz- bis mittelfristig nach Düngungen und Kompensationskalkungen beobachtet (z. B. Kraft et al., 2003; Schmidt, 2002; Zoldan, 1997; Seidling, 1994; Weihs & Langhorst, 1991). Ein höheres Nährstoffangebot im Boden ist mit diesem Effekt verknüpft, der wie weiterhin durch diese Untersuchung nachgewiesen wurde, durch ein höheres Angebot an Licht verstärkt wird.

Dagegen konnte Licht in dieser Untersuchung nicht als Ursache für Deckungsänderungen einzelner Arten verantwortlich gemacht werden (vgl. Abschnitt 4.5, Tab. 4.17). Dies ist möglicherweise dem engen Lichtbereich, bei nur geringer Streuung der Werte (etwa zwischen 10–20 % PACL im überwiegenden Teil der Messungen) zuzuschreiben.

Die mosaikartig erfolgende Zunahme von vor allem krautigen Arten auf gedüngten Flächen geht in dieser Untersuchung zulasten der Deckung der auf fast allen Flächen dominierenden Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*, vgl. Abb. 4.5, S. 79). Diesen Effekt beobachteten auch (Jandl et al., 2002, 2000; Becker et al., 1992; Schornick, 1990). Weitere Zwergsträucher, die in dieser Untersuchung durch Düngung an Stetigkeit verlieren, sind die beiden Arten *Vaccinium vitis-idaea* und *Calluna vulgaris*.

Neben den Zwergsträuchern gehen vor allem Moosarten in der vorliegenden Untersuchung durch Düngung zurück. Dazu zählt vor allem das Lebermoos *Bazzania trilobata*, das auch in den Untersuchungen von Schornick (1990) langfristig durch Düngung beeinträchtigt wird. Kurzfristig nach Kalkung stirbt *Bazzania trilobata* ab (Ahrens, 1995; Schornick, 1990) und wird auch mittelfristig nach Kompensationskalkungen seltener (Kraft et al., 2003; Ahrens, 1995; Schornick, 1990).

Weitere allgemein im Untersuchungsgebiet verbreitete Moose, die in dieser Untersu-

chung durch langfristige Düngung seltener werden (vgl. Tab. 4.12, S. 69), sind *Dicranum scoparium*, *Pleurozium schreberi*, *Leucobryum glaucum*, *Hypnum cupressiforme* und alle in dieser Untersuchung festgestellten Torfmoosarten (*Sphagnum girgensohnii*, *Sphagnum russowii*, *Sphagnum cappilifolium* und *Sphagnum quinquefarium*). Schornick (1990) stellt eine Beeinträchtigung von *Sphagnum nemoreum* (*Sphagnum cappilifolium*) fest. Die Untersuchungen von Ahrens (1995) bestätigen die kurz- bis mittelfristige (3–12 Jahre) Beeinträchtigung von *Sphagnum girgensohnii* und weiterer Torfmoose und auch von felsbesiedelndem *Hypnum cupressiforme* nach Kalkungen im Nordschwarzwald bei Bad Herrenalb.

Damit kann die in der vorliegenden Untersuchung durch Stetigkeitsvergleiche vorgenommene Einteilung der Arten der Moos- und Krautschicht in unterschiedlich auf Düngung reagierende Artengruppen (vgl. Abschnitt 3.3.4.1, S. 40) für die meisten Arten durch andere Untersuchungen im näheren Untersuchungsgebiet bestätigt werden.

5.3 Beantwortung der Fragestellung

Ziel dieser Untersuchung war es, langfristige Veränderungen im Oberboden, in den organischen Auflagen und der Bodenvegetation anhand eines Vergleichs gedüngter und ungedüngter Wälder festzustellen. Die Ergebnisse entsprechen dabei weitgehend den Erwartungen, die sich aufgrund der Ergebnisse ähnlicher vorangegangener Untersuchungen ergeben. Durch diese Untersuchung wird bestätigt, dass sich auch noch nach über vier Jahrzehnten der Effekt von Walddüngungen auf die Waldbodenvegetation und auf Bodeneigenschaften nachweisen lässt. Dieser Effekt ist durch eine Zunahme von anspruchsvolleren Arten auf gedüngten gegenüber ungedüngten Flächen erkennbar. Manche Arten gehen durch Düngung zurück, was sich in den Ergebnissen anderer Untersuchungen bestätigt findet. Weiterhin verändern sich die organischen Auflagen, indem der Anteil „günstiger“ Humusformen durch Düngung zunimmt und die Auflagenmächtigkeiten zurückgehen. Die Bedingungen, die nach Düngung herrschten und zum Abbau der Auflagen führten, sind möglicherweise heute bereits abgeklungen (vgl. Immer et al., 1993). Die Düngewirkung lässt sich in dieser Untersuchung im Oberboden durch etwas günstigere bodenchemische Verhältnisse nachweisen.

Bisher wenig untersucht wurde die Rolle des Lichtes in Zusammenhang mit den sich durch Düngung langfristig geänderten Bodeneigenschaften. Das eher mittelfristig erhöhte Nährstoffangebot nach einer Walddüngung fördert Arten der Schlagflora, ganz ähnlich wie eine Kahlschlagsituation mit hohem Lichtangebot (z. B. Schornick, 1990, S. 154). Licht (PACL) spielt im Zusammenhang mit einer Erhöhung der Artenzahl auf gedüngten Flächen eine wichtige Rolle, ist jedoch in dieser Untersuchung nicht maßgeblich für Deckungsänderungen. Jedenfalls konnte in einer Redundanzanalyse (RDA) kein signifikanter Einfluss von Licht nachgewiesen werden.

Neue Hinweise zur vielerorts festgestellten Veränderung des Humuszustandes liefert diese Untersuchung durch die statistische Herleitung der Beziehungen zwischen Humusform bzw. Auflagemächtigkeit und chemischem Oberbodenzustand. Dabei ist der Einfluss von Stickstoffimmissionen in dieser Untersuchung nicht sehr hoch, da sich die C/N-Verhältnisse als Erklärungsvariable für Humusformen und Auflagenmächtigkeit eignen, also nicht nivelliert sind.

5.4 Vergleichbarkeit alter Walddüngungen mit aktuellen Kompensationskalkungen

Die düngewidrigen Veränderungen der Vegetation konnten in dieser Untersuchung mit Umweltfaktoren in Verbindung gebracht werden. Dies ist bei vergleichbaren Untersuchungen nicht in diesem Umfang geschehen. Die Änderungen in der Bodenvegetation lassen sich gut mit den Veränderungen des Oberbodenzustandes, vor allem mit Stickstoff, säurelöslichem Phosphor und Kalzium und dem pH-Wert beschreiben. Schwierig einzuordnen ist die hohe Bedeutung der Kalium-Gesamtgehalte. Leider konnte aufgrund unzureichend zur Verfügung stehender finanzieller Mittel die Bedeutung austauschbarer Kationen hier nicht überprüft werden. Weiterhin ist die Baumartenzusammensetzung in dieser Untersuchung eine wichtige Größe zur Erklärung des Verhaltens der Bodenvegetation.

Teilweise offen bleibt, inwieweit sich die Vegetationsveränderungen durch Walddüngungen von denen durch Kompensationskalkungen unterscheiden. Im Nordschwarzwald unterscheiden sich Düngungen und Kompensationskalkungen kaum hinsichtlich der gedüngten Kalkmenge. Der Unterschied beruht meist auf Phosphatdüngung. Es ist aus bisher vorliegenden Untersuchungen nicht hinreichend geklärt, ob Phosphat im Zusammenhang mit Kalkungen und eventuell standortsabhängig eine signifikante Rolle für Vegetationsveränderungen spielt. Dies könnte z. B. durch einen Vergleich von gekalkten Flächen jeweils mit und ohne Phosphatbeigabe mit einer hinreichenden Zahl an Vegetationsaufnahmen geschehen. Dies wird im folgenden Abschnitt anhand bisher vorliegender Erkenntnisse diskutiert.

5.4 Vergleichbarkeit alter Walddüngungen mit aktuellen Kompensationskalkungen

Im Zusammenhang mit den vorangegangenen Diskussionen soll an dieser Stelle die Vergleichbarkeit alter Walddüngungen mit aktuellen Kompensationskalkungen und daraus abgeleitet die Bedeutung von Wiederholungskalkungen für die Vegetation bodensaurer Standorte besprochen werden.

Inwieweit die hier untersuchten und in Kapitel 2 vorgestellten Versuchs- und Praxisdüngungen mit heutigen Kompensationskalkungen mit dolomitischem Kalk zu vergleichen sind, kann mit den Ergebnissen dieser Untersuchung nicht abschließend geklärt werden. Abgesehen von einer Parzelle (L1 C, vgl. Tab. 3.3, S. 30), die zudem stark durch die Folgen historischer Streunutzung geprägt ist, sind alle Düngeflächen dieser Untersuchung mit Phosphatzusatz gekalkt worden (vgl. Tab. 3.3 und 3.4). Es ist aber möglich, Rückschlüsse durch eine Bilanzierung der gedüngten Elemente im Vergleich mit anderen Untersuchungen zu ziehen. Dabei kommt neben der Kalk- vor allem der Phosphatdüngung eine besondere Bedeutung zu.

Vor allem Kompensationskalkungen der frühen 1980er Jahre erhielten im Nordschwarzwald neben dolomitischem Kalk oft einen Phosphatzusatz von 3–4 % (vgl. Kapitel 2) und werden auch heute noch für Standorte mit ungünstiger Phosphatversorgung empfohlen (von Wilpert & Schäffer, 2000). Diese Menge kann bis zu 0,8 t/ha Thomasphosphat entsprechen und ist damit durchaus mit den Dosierungen der Walddüngungen vergleichbar, die selten mehr als 1 t/ha Thomasphosphat oder damit vergleichbar 0,5 t/ha Rohphosphat ausmachten. Die oben erwähnten Vegetationsveränderungen der Untersuchung von Jandl et al. (2002, 2000) beruhen wohl auch vornehmlich auf der Wirkung einer Kalkung;

Phosphat wurde dort in Form von 0,5 t/ha Thomasphosphat gedüngt.

Die Untersuchungen von Ahrens (1995) und Schornick (1990) im Nordschwarzwald differenzieren zwischen Düngungen bzw. Kompensationskalkungen mit oder ohne Phosphatzusatz, leiten daraus aber keine Unterschiede für Vegetationsveränderungen ab, wohl auch mangels Vergleichbarkeit. Die Veränderungen der Vegetation und der organischen Auflagen, die die Untersuchung von Kraft et al. (2003) beschreibt, lassen auf eine Kalkwirkung schließen, differenzieren jedoch nicht zwischen Kalkungen mit oder ohne Phosphat, die in den dort untersuchten Forstbezirken Bad Wildbad, Enzklösterle und Bad Herrenhalb stattfanden (vgl. Ahrens, 1995, und Kapitel 2). Die Untersuchungen von Becker et al. (1992) 20 Jahre nach einer Düngung mit Kalk, Phosphat und Stickstoff in einem mehrfaktoriellen Design legen jedoch nahe, dass die Wirkungen auf die Vegetation und die organischen Auflagen ganz wesentlich auf die Kalkung zurückzuführen sind.

Trotzdem bleibt die Frage ungeklärt, inwieweit diese Veränderungen nicht standortsspezifisch sind, also von der natürlichen Phosphatausstattung oder -freisetzung des Standortes abhängen. In der eigenen Untersuchung kann die Erhöhung der Artenzahl der Krautarten auf höhere Versorgung des Mineralbodens mit Kalzium, Phosphor und Stickstoff zurückgeführt werden. Möglicherweise wirkt sich die Phosphatwirkung auf eine Veränderung der Vegetation auch erst unterhalb einer bestimmten Schwelle z. B. in besonders stark phosphorlimitierten Systemen aus (Giesler et al., 1998).

5.5 Die Bedeutung von Wiederholungskalkungen

Die kontinuierlichen Säureeinträge durch Immissionen sollen äquivalent durch Kalkungen kompensiert werden (z. B. von Wilpert & Schäffer, 2000), dafür sind in verschiedenen Bundesländern Wiederholungen von Kalkungen im Turnus von etwa 10 bis 15 Jahren vorgesehen. Die Empfehlungen für die Kalkungsbedürftigkeit verschiedener Standorte Baden-Württembergs nach von Wilpert & Schäffer (2000) sind in Abschnitt 2.2.6 erörtert.

Als ein allgemeiner Kalkungseffekt kann die Nettozunahme von Arten angesehen werden (z. B. Schmidt, 2002). Eine gleichzeitige Abnahme betrifft dabei generell kurz- und langfristig vor allem als Säure- oder sogar Starksäurezeiger eingestufte Arten, die stark an bodensaure Verhältnisse gebunden sind. Wie diese Untersuchung und darüber hinaus die Untersuchungen von Ahrens (1995) und Schornick (1990) zeigen, können kalkungsempfindliche Arten artabhängig nach einer Weile die gedüngten Flächen wiederbesiedeln. Ahrens (1995) konnte hier einen Zusammenhang zwischen der Art der Ausbringung und dem Grad der akuten Beschädigung und späteren Wiederbesiedlung kalkungsempfindlicher Moose nachweisen. Eine vollständige Wiederbesiedlung empfindlicher Arten war aber hier auch zehn Jahre nach einer Kalkung nicht zu beobachten.

Schmidt (2002) weist darauf hin, dass Wiederholungskalkungen auf Beobachtungsflächen in Niedersachsen den ersten, signifikanten Effekt einer Zunahme reicherer Bodenvegetation nicht nachweisbar verstärken. Dies mag jedoch nicht für alle Standorte gleichermaßen gelten. Besonders auf natürlicherweise stark bodensauren Standorten, zu deren natürlicher Artenausstattung kalkungsempfindliche Moose und Zwergsträucher gehören, sind in ihren Populationen bedroht. Eine Wiederholungskalkung würde den Rest der überlebenden Moose und Pflanzen weiter dezimieren oder sie ganz verschwinden lassen.

Diese Überlegung kann durch die Ergebnisse der Arbeiten von Kraft et al. (2003) und Schornick (1990) erhärtet werden, da dort die Vegetationsveränderungen durch Kompensationskalkungen oder Walddüngungen auf den ärmeren Standorten stärker ausfielen. Die Wiederherstellbarkeit derartiger Flächen nach Düngung oder Kalkung, sofern sie vergleichbar sind, ist also bereits nach einer Kalkung zumindestens gefährdet, bei stärkeren Kalkmengen sogar für Jahrzehnte, wie die Ergebnisse dieser Arbeit nahelegen.

Diese Erkenntnis kann in der Praxis zu verschärften Zielkonflikten führen. Gerade die Waldstandorte, die das Habitat empfindlich reagierender Moos- und Krautarten sind, sind eventuell als dringend meliorationsbedürftig eingestuft (vgl. von Wilpert & Schäffer, 2000, und Abschnitt 2.2.6), sofern sie nicht besonders geschützte Biotope sind.

5.6 Empfehlungen für die Praxis

Wie bisher gezeigt werden konnte, so sind die hier untersuchten Walddüngungen in ihren Auswirkungen gut mit aktuellen Kompensationskalkungen vergleichbar. Daher sind durch Kompensationskalkungen auf bodensauren Standorten ähnliche langfristige Folgen für die Vegetation und den Humuszustand zu erwarten, zumal Wiederholungskalkungen in regelmäßigen Abständen von vielen Bundesländern geplant sind. Im Zusammenhang mit Waldkalkungen sollten daher die folgenden Aspekte stärker als bisher beachtet werden:

Für einige Populationen von Moos- und Gefäßpflanzenarten stark bodensaurer Standorte besteht eine Gefahr des starken Rückgangs auf großer Fläche, sollte in Intervallen gekalkt werden. Dies gilt in noch stärkerem Maß für felsbesiedelnde Moosarten (Ahrens, 1995). Viele der Arten, die kurz- oder langfristig durch Kalkung beeinträchtigt werden, sind in der roten Liste Deutschlands (Korneck et al., 1996; Ludwig et al., 1996) als örtlich gefährdet eingestuft z. B. Torfmoose aber auch *Leucobryum glaucum* (vgl. Tab. A.1, S. 130). *Vaccinium vitis-idaea*, eine Art die in dieser Untersuchung durch Düngung zurückgeht, ist in Baden-Württemberg gefährdet (Stufe3).

Waldbestände mit hohen Anteilen derartiger kalkungsempfindlicher Arten sollten daher möglichst nur unter sorgfältiger Abwägung der Notwendigkeit gekalkt werden. Ist eine Kalkung notwendig, z. B. für Gewässerschutz, sollten langsamer wirkende Gesteinsmehle oder granulierten Kalke ausgebracht werden, die weniger direkte Schädigungen an empfindlichen Moosen verursachen (vgl. Ahrens, 1995).

Ein gewisser Anteil der Waldfläche sollte dauerhaft ungekalkt bleiben. Diese Referenzgebiete könnten etwa als Rückzugsgebiete kalkungsempfindlicher Arten oder als Forschungsflächen eine Bedeutung haben. Dies erfordert eine Planung, die derartige Gebiete gutachtlich festlegt.

In manchen waldökologischen Untersuchungen wird Kalkung als wichtige Störgröße, die Ergebnisse verzerren könnte, erkannt (z. B. Gruselle & Bauhus, 2005; Gärtner, 2004; Reihling, 1940). Es ist zu befürchten, dass dies in manchen Untersuchungen mangels Unkenntnis oder da Unterlagen zu Kalkungen und Düngungen schwer zugänglich sind nicht beachtet wird. Daten zu Kalkungen und wenn möglich auch älteren Düngungen sollten daher möglichst in Form von GIS-Daten auf Antrag für wissenschaftliche Untersuchungen verfügbar sein.

Zusammenfassung

Die Erfassung langfristiger Veränderungen der Waldbodenvegetation, der bodenchemischen Verhältnisse des mineralischen Oberbodens und der organischen Auflagen durch Walddüngungen im Zusammenspiel mit Licht und die Wechselwirkungen dieser Faktoren ist das Ziel dieser Untersuchung.

Dazu wurden in einem Paarvergleich fünf Bestandesdüngungen, die zwischen 1957 und 1966 als Versuchs- oder Praxisdüngungen auf basenarmen Standorten im Oberen und Mittleren Buntsandstein des Nordschwarzwalds und im Baarschwarzwald angelegt wurden, jeweils mit ungedüngten und bezüglich Waldbeständen und Standorten vergleichbaren Flächen verglichen. Gedüngt wurden zwischen 2,5 t/ha und 6 t/ha kohlenaurer Kalk mit Phosphatzusatz, in einigen Fällen zusätzlich Stickstoff- oder Kaliumdünger. Die Waldbestände bestehen aus Althölzern von Tanne, Fichte und Kiefer.

Mit insgesamt 335 zufällig auf den Flächen verteilten Vegetationsaufnahmen wurden die Deckungen der Arten der Moos- und Krautschicht sowie der Baumschicht erfasst. Für jede Vegetationsaufnahme wurde die Humusform und die Mächtigkeit der organischen Auflagen ermittelt. Im mineralischen Oberboden (0–5 cm) wurden die pH-Werte in H₂O und 0,01 mol CaCl₂ gemessen und C- und N-Gehalte bestimmt. Im Druckaufschlussverfahren (5 ml HNO₃_{konz.}, 15 ml HCl_{konz.}) wurden Gesamtgehalte von P und weiterer Elemente wie der Kationen Ca, Mg und K spektralanalytisch (ICP) bestimmt. Weiterhin wurde für jede Vegetationsaufnahme durch Fisheye-Photographien Licht als Anteil der Freilandstrahlung (PACL) der Vegetationsperiode geschätzt.

Im Oberboden wurde auf gedüngten Flächen im Vergleich zu den Nullflächen eine Erhöhung aller bodenchemischen Werte durch Mittelwertsvergleiche festgestellt. Besonders deutlich ist die Erhöhung von Ca und P, die pH-Werte unterscheiden sich trotz nur geringer Erhöhung durch Düngung auf den meisten Flächen signifikant (Kruskal-Wallis-Test, MWU-Test). Das C/N-Verhältnis ist bei geringen Unterschieden auf gedüngten Flächen verengt, deutlich wird die Verengung des C/P-Verhältnisses durch P-Düngung.

Die organischen Auflagen sind auf gedüngten Flächen deutlich geringer mächtig, die Anteile ungünstiger Humusformen wie Rohhumusartiger Moder und Rohhumus nehmen zugunsten höherer Anteile von vor allem F-Mull und Mullartigem Moder ab. Eine Besonderheit stellen Streunutzungshumusformen in einem Bestand dar. Auf gedüngten Flächen wechseln sich kleinräumig nährstoffärmere mit nährstoffreicheren Bereichen ab, ungedüngte Flächen sind einheitlicher. Dies wird auch durch die gute Charakterisierbarkeit der Humusformen vor allem durch pH-Werte sowie die P- und Ca-Gehalte und C/P-Verhältnisse des Oberbodens deutlich. Dabei sind die ungünstigen Humusformen Rohhumusartiger Moder, Rohhumus und F-Rohhumus untereinander kaum zu unterscheiden. F-Rohhumus (Streunutzung) fällt durch besonders weite C/P- und N/P-Verhältnisse auf. Weiterhin lässt sich die Mächtigkeit der organischen Auflagen durch lineare Korrelations- und eine multiple lineare Regressionsanalyse mit bodenchemischen Veränderungen des Oberbodens, vor allem mit einer Erhöhung der pH-Werte, P- und Ca-Gehalte und engeren C/N-Verhältnissen aber auch N-Gehalten beschreiben. Baumartenzusammensetzung

und Lichtanteile (PACL) zeigen hier keinen Einfluss.

Die Nährstoffverhältnisse des Oberbodens spiegeln sich in der Artenzusammensetzung der Moos- und Krautschicht wieder. In einer direkten Ordination (Redundanzanalyse) lassen sich die auf Düngeflächen häufiger oder seltener werdenden Arten entlang einer als Nährstoffgradient interpretierbaren Achse beschreiben. Dieser Gradient wird vor allem durch P-, N- und Ca-Gehalte und etwas weniger deutlich durch steigende pH-Werte des Oberbodens charakterisiert.

Damit unterscheidet sich die Vegetation gedüngter Flächen von ungedüngten Flächen folgendermaßen: Während ungedüngte Flächen durch ein weitgehend homogenes von *Vaccinium myrtillus* dominiertes Vegetationsmuster geprägt sind, ist dies auf gedüngten Flächen häufiger durch ein Mosaik reicherer Kraut- und Farnarten unterbrochen. Auf gedüngten Flächen kommen zum Artinventar der Moos- und Krautschicht ungedüngter Flächen weitere Arten der Moos- und Krautschicht hinzu.

Damit sind gedüngte Flächen durch viele insgesamt nur in geringer Stetigkeit oder gar einzeln hinzukommende an Nährstoffen anspruchsvollere Krautarten artenreicher. Der Artenreichtum der Krautschicht lässt sich regressionsanalytisch gleichermaßen auf höhere Nährstoffe und Licht zurückführen und erlaubt damit auch Rückschlüsse auf die Düngeintensität. Weiterhin geht je nach Fläche die meist dominierende Heidelbeere *Vaccinium myrtillus* in der Deckung auf gedüngten Flächen zurück. Arten der Krautschicht, deren Stetigkeit durch Düngung signifikant zunimmt, sind vor allem die Farne *Athyrium filix-femina* und *Dryopteris dilatata* und weitere bezüglich Nährstoffansprüchen anspruchsvollere Arten wie z. B. *Oxalis acetosella* und auf einigen Flächen auch *Festuca altissima* und *Rubus fruticosus* agg.. Die Stetigkeit der Zwergsträucher *Calluna vulgaris* und *Vaccinium vitis-idaea* nimmt ab, wobei letztere Art eine starke Bindung an Streunutzung (F-Rohhumus) zeigt.

Die mittlere Artenzahl der Mooschicht in den Aufnahmen verändert sich nicht durch Düngung, jedoch vergrößert sich der Artenreichtum insgesamt. Signifikante Abnahme der Stetigkeit auf gedüngten Flächen verzeichnen vor allem als Säurezeiger oder sogar Starksäurezeiger eingestufte Moose, vor allem verschiedene *Sphagnum*-Arten, *Bazzania trilobata* und *Leucobryum glaucum*. Anspruchsvollere Moosarten, vor allem *Eurhynchium striatum* und *Thuidium tamariscinum* kommen hinzu.

Diese Ergebnisse decken sich mit denen vieler anderer Untersuchungen zu Vegetationsänderungen durch langfristige Düngung. Weiterhin ist aktuell vielerorts eine Veränderung der Bodenvegetation vor allem bodensaurer Wälder zu beobachten. Dies wird in anderen Untersuchungen auf einen Ursachenkomplex aus Stickstoffimmissionen, Erholung der Standorte von starkem Nährstoffentzug durch historische Nutzungen, vor allem Streunutzung aber auch Kompensationskalkungen zurückgeführt. Weitere Veränderungen sind durch Waldumbau in Richtung buchenreicherer Mischwälder vor allem durch die Moose und Zwergsträucher verdämmende Laubstreu zu erwarten.

Die Vergleichbarkeit der aktuellen Kompensationskalkungen mit Walddüngungen, die stets Phosphatgaben erhielten, ist nur bedingt gegeben. Manche Autoren führen jedoch die Wirkung alter Düngungen auf die Vegetation primär auf Kalk zurück. Zudem werden aktuell auch Kalkungen mit Phosphatbeimengungen vor allem für Standorte mit engen C/P-Verhältnissen in den Auflagen empfohlen. Die zusätzliche Wirkung von Phosphat auf die Vegetation ist möglicherweise standortsabhängig und kann im Rahmen dieser

5 Diskussion

Untersuchung nicht geklärt werden.

Schlussfolgerungen auch im Zusammenhang mit anderen Untersuchungen betreffen vor allem die Praxis großflächiger Bestandeskalkungen gegen immissionsbedingte Bodenversauerung hinsichtlich langfristiger Folgen. Eine Düngung oder wie durch weitere Untersuchungen belegt auch eine Kompensationskalkung, führt besonders auf natürlich basenarmen Standorten zur Beeinträchtigung von standortstypischen Magerkeits- und Säurezeigern. Anspruchsvolle, jedoch häufige und auch standortsuntypische Arten kommen hinzu, zum Teil kommt es zur Verbreitung von Nitrophyten. Bei Umsetzung von zum Teil durch die Forstverwaltungen verschiedener Bundesländer geforderter Wiederholungen der Kalkung im Turnus von zehn bis fünfzehn Jahren, würden durch einmalige Kalkung seltener werdende Arten in ihrem Bestand auf großer Fläche gefährdet.

Bei der Abwägung zwischen notwendigem Bodenschutz und den Folgen für die Vegetation und Standorte sollten zumindest kleinere Flächen aller Standorte ungekalkt bleiben. Neben Naturschutzaspekten für den Schutz von Arten bodensaurer Standorte auch als Referenzflächen für die Forschung. Ungeklärt ist dabei die Rolle der Phosphatbeimengung. Da viele Untersuchungen zur Wirkung auf die Vegetation nicht zwischen Kompensationskalkungen mit und ohne Phosphatzusatz differenzieren, wären weitere Untersuchungen, die die Rolle von Phosphat und unterschiedlicher Kalkrezepturen klären, wünschenswert.

Summary

The aim of this study was to investigate long-term changes to the forest ground vegetation, the chemical properties of the mineral topsoil, and the organic soil layers as a result of forest fertilisation in connection with light, and the interaction of these factors.

To this end, the impact of five stand fertilisations carried out between 1957 and 1966 for both research and for practical purposes with differing amounts of lime, mostly with additional phosphate, and in a few cases with nitrogen, were studied. The investigated stands were mostly coniferous, dominated by *Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*.

The coverages of the herb and moss layers were recorded on 335 randomly selected 40 m² relevés, distributed over the five sites. The characteristic humus form and the depth of the organic layer were determined for each vegetation relevé. The pH values in the mineral topsoil were measured in H₂O and 0.01 mol CaCl₂, and the C and N contents determined. The total P content and that of other elements such as the cations Ca, Mg and K were analysed in HCl-HNO₃ digests with ICP. Furthermore, for each relevé the light during the vegetation period was estimated as percent above canopy light (PACL) using fisheye photography.

An increase of all soil chemical values, with the exception of carbon, was registered in the mineral topsoil on fertilised sites in comparison with the unfertilised sites. The increase in Ca and P values was particularly striking. The pH values differed significantly on most sites, despite an only slight increase due to fertilisation. The C/N ratio narrowed on fertilised areas, but with only small differences evident. The narrowing of the C/P ratio as a result of P fertilisation is marked.

The organic layers were significantly shallower on the fertilised areas, and the proportions of unfavourable humus types decreased in favour of higher proportions of mull humus types. The litter raking influenced humus forms in one stand were a peculiarity. A fine scale alternation of nutrient rich and nutrient poor microsites was observed on the fertilised soils. The unfertilised areas were more homogenous. This also became evident on the basis of the ready characterisation of the humus types, especially with respect to the pH values, the P and Ca contents, and the C/P ratios of the mineral topsoil. Conversely, it was almost impossible to distinguish the unfavourable humus types from one another. F-raw humus (litter raking) was noteworthy for its particularly wide C/P and N/P ratios. It was also possible to describe the depth of the organic layers using linear correlation and multiple linear regression analyses with soil chemical changes in the mineral topsoil, particularly with a rise of the pH values, P and Ca contents and C/N ratios, but also with N content. The tree species composition and the light value (PACL) had hardly any impact in this respect.

The nutrient properties of the topsoil mirrored the species compositions of the moss and herb layers. The either positive or negative reaction of species to fertilisation could be described in a direct ordination (redundancy analysis) along an axis that could be interpreted as a nutrient gradient. This gradient was primarily characterised by P, N and Ca, and to a slightly lesser extent by rising pH values of the mineral topsoil.

5 Diskussion

The vegetation of the fertilised areas differed from that of the unfertilised areas. Whereas the unfertilised areas were characterised by a rather homogenous vegetation pattern dominated by *Vaccinium myrtillus*, on fertilised areas this was frequently interrupted by a mosaic of more nutrient demanding herb and fern species. As a consequence, the fertilised areas were richer in terms of the number of herb species.

Through multiple linear regressions it could be demonstrated that the species richness of the herb layer was due equally to higher nutrient levels and more light, thus permitting the drawing of conclusions in relation to the intensity of fertilisation. Furthermore, the largely dominant blueberry (*Vaccinium myrtillus*) decreased in its coverage on most fertilised sites, with the extent of this decline differing from site to site. Herb layer species which rose significantly in frequency due to fertilisation were above all the ferns *Athyrium filix-femina* and *Dryopteris dilatata*, and other nutrient demanding species such as *Oxalis acetosella*, and on some areas also *Festuca altissima* and the bramble (*Rubus fruticos* agg.). The frequency of the dwarf shrubs *Calluna vulgaris* and *Vaccinium vitis-idaea* decreased, however, the latter revealing a strong association with litter raking.

The average number of species in the moss layer of each relevé did not change as a result of fertilisation. However, the species richness overall increased. A significant decrease in frequency on fertilised sites was evident especially amongst those mosses known as indicators of acid site conditions, particularly different *Sphagnum*-species, *Bazzania trilobata* and *Leucobryum glaucum*. More demanding moss species, especially *Eurhynchium striatum* and *Thuidium tamariscinum*, were more abundant on fertilised sites.

These findings match those of many other studies of vegetation changes resulting from long-term fertilisation. Furthermore, a change in the ground vegetation is evident in many places at the moment, especially in forests on acid soils. In other studies this is traced back to a complex of causes comprising N immissions, the recovery of habitats from heavy nutrient withdrawal following historical land use, particularly litter raking, but also compensation liming. Further changes are also to be expected due to forest conversion in favour of mixed forests rich in beech, mostly through the suppressive effect of leaf litter on mosses and dwarf shrubs.

The comparability of current compensation liming practices with past forest fertilisations, which always contained phosphate, is only partly possible. Some authors trace the effects on the vegetation of old fertilisations primarily back to lime. At the moment liming with additional phosphate is recommended, particularly for sites with a narrow C/P ratio. The added effect on the vegetation of phosphate is possibly dependent to a large extent on the local site conditions and as such could not be dealt with within the boundaries of this study.

The conclusions of this study, placed in the context of the findings of other studies, concern especially the long-term consequences of the practice of large-scale liming of forest stands in order to ameliorate soil acidity caused by immissions. Fertilisation, and as proved by other studies compensation liming, lead to a decline of the species characteristic of nutrient poor and acid sites, particularly on naturally base-poor habitats. Nutrient demanding and expansive, but site untypical species are promoted, and in places there is even a spread of nitrophytes.

Some German forest administrations recommend liming take place in ten to fifteen year cycles. Such frequent liming would change the forest ground vegetation across large

areas and make the recovery of sensitive species very difficult or even impossible.

In view of the conflict between the necessity to protect the soil and the consequences of liming for both vegetation and sites, it is suggested that at least small parts of all sites should remain unlimed.

The effect of phosphate addition remains critical and as yet unresolved. As many studies looking at the effects on the vegetation of liming do not differentiate between compensation liming with or without added phosphate, further studies are necessary in order to resolve the role of phosphate and different lime mixtures.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Waldsterben in den Medien	9
2.2	Das Untersuchungsgebiet	11
2.3	Alte Düngeversuche im Nordschwarzwald	13
2.4	Alte Versuchs- und Praxisdüngungen	19
2.5	Kalkmischungen für Kompensationskalkungen in der Praxis	23
3.1	Die Untersuchungsflächen	26
3.2	Flow-chart-Analyse mit CANOCO	42
4.1	Mediane und arithmetische Mittel (mit Standardabweichung) der Reaktions- und Stickstoffzahlen nach Ellenberg et al. (1992) für unterschiedlich auf Düngung reagierende Artengruppen	70
4.2	Ordinationsdiagramm (RDA) mit Artengruppen (Düngung)	73
4.3	Ausschnitte nach Artengruppen (Düngung) aus dem Ordinationsdiagramm	76
4.4	Ordinationsdiagramm (RDA) mit dominanten Arten mit hohem Erklärungsbeitrag und Umweltfaktoren	78
4.5	Mittlere Deckungen von <i>Vaccinium myrtillus</i> auf den Untersuchungsflächen	79
4.6	Mittlere Deckungen von <i>Hypnum jutlandicum</i> auf den Untersuchungsflächen	79
4.7	Mittlere Deckungen von <i>Rhytidiadelphus loreus</i> auf den Untersuchungsflächen	80
4.8	Mittlere Deckungen von <i>Hylocomium splendens</i> auf den Untersuchungsflächen	80
4.9	Mittlere Deckungen von <i>Bazzania trilobata</i> auf den Untersuchungsflächen	81
4.10	Die Vegetationsaufnahmen im Ordinationsraum der RDA	84
4.11	Artenzahlen getrennt nach Lebensformen auf den Untersuchungsflächen und für die Humusformen	86
4.12	Gefäßpflanzen mit unterschiedlicher Bindung an Wald auf den Untersuchungsflächen und für Humusformen	88
4.13	Mittlere Artenzahlen für Moos- und Krautschicht nach ihrer Reaktion auf Düngung für Düngeflächen und Humusformen	90
C.1	Validierung des Regressionsmodells „Organische Auflagen“	135
C.2	Überprüfung des Regressionsmodells - Artenzahl Moos- und Krautschicht	136
C.3	Überprüfung der Regressionsmodelle „N“ und „P“- Artenzahl Krautschicht	137

Tabellenverzeichnis

2.1	Die Einführung der modernen Düngemittel	7
2.2	Übersicht der Düngeversuche (DV) im Nordschwarzwald	14
2.3	Übersicht über die verwendeten Düngemittel der Versuchsdüngungen (DV) im Nordschwarzwald	15
2.4	Flächen- und Düngebilanz der Praxisdüngungen von 1950–1970	20
2.5	Übersicht über die Kalkungen im Forstbezirk Pfalzgrafenweiler	22
3.1	Klima und Geologie der Untersuchungsflächen und Anzahl der Probeflächen	27
3.2	Standortseinheiten auf den Untersuchungsflächen L1, L2, L3 und L4 . . .	28
3.3	Düngermengen der Untersuchungsfläche L1	30
3.4	Düngermengen der Untersuchungsflächen L2, L3, L4 und V1	32
3.5	Skala zur Deckungsschätzung der Vegetation nach Londo	33
3.6	Übersicht über die aufgenommenen und gemessenen Bodenvariablen . . .	35
3.7	Extremwerte in den bodenchemischen Daten	36
3.8	Umweltfaktoren als Variablen für Regressions- und Ordinationsverfahren .	38
3.9	Voraussetzungen und Überprüfung multipler linearer Regressionsmodelle .	39
4.1	Bodenchemische Charakterisierung (Mineralboden) der Düngevarianten von Untersuchungsfläche Liebenzell 1	47
4.2	Mittelwerte Boden	48
4.3	Darstellung der Kalziumgehalte im Mineralboden ohne Ausreißer	50
4.4	Auflagemächtigkeit und Häufigkeit der Humusformen auf Fläche Lieben- zell 1	57
4.5	Auflagemächtigkeit und Häufigkeit der Humusformen für die Untersu- chungsflächen Liebenzell 2, 3, 4 und Villingen 1	58
4.6	Korrelationsmatrix der Variablen im Mineralboden	59
4.7	Bodenchemische Charakterisierung (Mineralboden) der Humusformen . .	61
4.8	Rangkorrelationen nach Spearman von Umweltvariablen mit der Mächtigkeit der organischen Auflagen	62
4.9	Lineares Regressionsmodell zur Erklärung der Mächtigkeit der organi- schen Auflagen	63
4.10	Auf Düngung signifikant positiv reagierende Arten	66
4.11	Auf Düngung positiv reagierende Arten	67
4.12	Auf Düngung negativ reagierende Arten	69
4.13	Arten, die gegenüber Düngung ein indifferentes Verhalten zeigen	71
4.14	Bedeutung der Zeigerwerte für Reaktions- und Nährstoffzahlen (Ellenberg et al., 1992)	72
4.15	Statistische Kennwerte der Redundanzanalyse	73
4.16	Korrelation der Achsenwerte (RDA) mit Umweltvariablen	74
4.17	Korrelationsmatrix der Umweltvariablen mit Deckungen hochsteter Arten	77

Tabellenverzeichnis

4.18	Deckungssummen (Mittel) der drei Baumschichten von Tanne, Fichte und Kiefer nach Düngevarianten	83
4.19	Signifikanztest für Artenzahlen der Moos- und Krautschicht auf den Untersuchungsflächen und für die Humusformen	87
4.20	Rangkorrelationen nach Spearman der Artenzahlen (S) der Moos- und Krautschicht mit Umweltvariablen	92
4.21	Lineares Regressionsmodell zur Erklärung der Artenzahl von Moos- und Krautschicht	95
4.22	Lineares Regressionsmodell (Phosphor) zur Erklärung der Artenzahl der Krautschicht	95
4.23	Lineares Regressionsmodell (Stickstoff) zur Erklärung der Artenzahl der Krautschicht	96
A.1	Artenliste und Lebensform	130
B.1	Vergleich der Nässestufen der Standortseinheiten	134

Abkürzungsverzeichnis

- Kurzformen der Untersuchungsflächen und Düngevarianten:
 - L1, L2, L3, L4 sind Untersuchungsflächen bei Bad Liebenzell.
 - V1 ist eine Untersuchungsfläche bei Villingen.
 - U als Zusatzkennung zu den Kürzeln für ungedüngte Flächen (z. B. L1 U).
 - D als Zusatzkennung zu den Kürzeln für gedüngte Flächen (z. B. L2 D).
 - D⁺ nur als V1 D⁺ für eine vermutete Nachdüngung (NPK).
 - A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K als Zusatzkennung für die Düngevarianten der Untersuchungsfläche L1 (z. B. L1 A).
- Durch Düngung geförderte Arten:
 - Ds⁺⁺: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche ausschließlich häufiger werden, dabei auf vielen Flächen signifikant häufiger.
 - Ds⁺: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche signifikant häufiger werden, jedoch in Einzelfällen leicht aber niemals signifikant abnehmen.
 - D⁺: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche durchweg häufiger, aber nicht signifikant häufiger vorkommen.
- Durch Düngung abnehmende Arten:
 - Ds⁻: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche ausschließlich seltener werden, dabei auf vielen Flächen signifikant seltener.
 - Ds⁻: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche signifikant abnehmen, jedoch in Einzelfällen leicht aber niemals signifikant zunehmen.
 - Ds⁻: Arten, die auf gedüngten Flächen im Vergleich zur ungedüngten Referenzfläche durchweg seltener, aber nicht zwingend signifikant seltener vorkommen.
- I: Bezüglich Düngung indifferente Arten:
 - Diese passen in keine der oben genannten Kategorien, können aber durchaus einen Schwerpunkt auf gedüngten oder ungedüngten Flächen haben.
- Sonstige Abkürzungen:
 - GIS: Geographisches Informationssystem.
 - K-W: Kruskal-Wallis *H*-Test (innerhalb von Tabellen).
 - MWU-Test: Mann-Whitney-*U*-Test.

Verzeichnis unveröffentlicher Quellen

- Düngekarten Forstbezirk Enzklösterle, eingesehen 2003.
- Düngekarten Forstbezirk Bad Liebenzell, eingesehen 2003.
- Düngekarten Forstbezirk Pfalzgrafenweiler, eingesehen 2003.
- Düngekarten Forstbezirk Villingen Staat, eingesehen 2003.
- Düngekarten Forstbezirk Bad Wildbad, eingesehen 2003.
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Daten (Gewässernetz als GIS) aus dem Räumlichen Informations- und Planungssystem (RIPS), 03.08.2006.
- Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de) Az.: 2851.9-1/11: Digitales Geländemodell (DGM) als Kartengrundlage (GIS-Daten), ohne Jahr.
- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum (MLR), Baden-Württemberg, 2002a: FoGIS -Forstliches GIS, Bestandeseinteilung mit Forsteinrichtungsdaten für die ehemaligen Forstbezirke Bad Liebenzell, Pfalzgrafenweiler und Villingen Staat. Bearbeitungsstand April 2003 (auch im Literaturverzeichnis).
- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum (MLR), Baden-Württemberg, 2002b: Daten der Forstlichen Standortserkundung Baden-Württemberg als GIS-Daten, Bearbeitungsstand 2003 (auch im Literaturverzeichnis).
- Minnesota Department of Natural Resources, 2002: DNR random sampling tools: <http://files.dnr.state.mn.us/aboutdnr/bureaus/mis/gis/tools/arcview/extensions/sampling/dnrsample.zip> (auch im Literaturverzeichnis).

Literaturverzeichnis

- Abrahamsen, G., Horntvedt, R. & Tveite, B., 1977: *Impacts of acid precipitation on coniferous forest ecosystems*. Water, Air, and Soil Pollution 8: 57–73.
- Ahrens, M., *Einfluß der Waldkalkung auf die Moosflora und die Moosvegetation des Nordschwarzwalds*. In: (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bezirksstelle für Naturschutz und Landschaftspflege, Karlsruhe, 1995), *Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege Baden-Württemberg*, Bd. 70, 455–496.
- Albert, R., 1905: *Welche Erfahrungen liegen bis jetzt über den Einfluß künstlicher Düngung und Bodenbearbeitung im forstlichen Großbetriebe vor? In welcher Weise und nach welcher Richtung hin sind Versuche hierüber fernerhin anzustellen?* Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 37: 139–152.
- Albert, R., 1936: *Ein nachhaltig wirksamer Forstdüngungsversuch*. Forstarchiv 12: 158–162.
- Aldinger, E., Hübner, W., Michiels, H.-G., Mühlhäußer, G., Schreiner, M. & Wiebel, M., 1998: *Überarbeitung der Standortkundlichen regionalen Gliederung im Südwestdeutschen Standortkundlichen Verfahren*. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortkunde und Forstpflanzenzüchtung 39: 5–67.
- Arbeitskreis Standortkartierung, Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (Hg.), *Forstliche Standortsaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen* (IHW Verlag, Eching bei München, 1996), 5. Aufl., 352 S.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R., *Multivariate Analysemethoden*. Springer Lehrbuch (Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2000), neunte, überarbeitete und erweiterte Aufl., 661 S.
- Becker, M., Bonneau, M. & Le Tacon, F., 1992: *Long-term vegetation changes in an Abies alba forest: Natural development compared with response to fertilization*. Journal of Vegetation Science 3: 467–474.
- Bernhard, 1921: *Die Entartung des Bodens und ihre Einwirkung auf die Bewirtschaftung der Staatsforsten in Sachsen*. Tharandter forstliches Jahrbuch 72: 64–87.
- Blume, H.-P., 2002: *Some aspects of the history of German soil science*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 165: 377–381.
- Bortz, J., *Statistik für Sozialwissenschaftler* (Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1999), 5. Aufl., 836 S.
- ter Braak, C. J. F. & Smilauer, P., *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for canonical community ordination (version 4.5)* (Microcomputer Power, Ithaca, NY, USA, 2002), 500 S.
- Brunner, A., 1998: *A light model for spatially explicit forest stand models*. Forest Ecology and Management 107: 19–46.

LITERATURVERZEICHNIS

- Buberl, H. G., von Wilpert, K., Trefz-Malcher, G. & Hildebrand, E. E., *Der chemische Zustand von Waldböden in Baden-Württemberg, Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg*, Bd. 182 (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Freiburg i. Br., 1994), 99 S.
- Bürger, R., 1991: *Immissionen und Kronenverlichtung als Ursachen für Veränderungen der Waldbodenvegetation im Schwarzwald*. *Tuexenia* 11: 407–424.
- Bund, B., *Der Wandel der Kulturlandschaft Nordschwarzwald seit der 2. Hälfte des 19. Jhds - Eine historische Raum-Zeit-Analyse mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS), Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg*, Bd. 204 (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Freiburg i. Br., 1998), 180 S.
- Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung (Hg.), *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 178 Sigmaringen* (Selbstverlag, Bad Godesberg, 1959), 61 S.
- Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung (Hg.), *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 170 Stuttgart* (Selbstverlag, Bad Godesberg, 1967a), 76 S.
- Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung (Hg.), *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 177 Offenburg* (Selbstverlag, Bad Godesberg, 1967b), 49 S.
- Der Spiegel, 1981: *Titelblatt Ausgabe 47*.
- Diekmann, M. & Dupré, C., 1997: *Acidification and eutrophication of deciduous forests in northwestern Germany demonstrated by indicator species analysis*. *Journal of Vegetation Science* 8: 855–864.
- Dierßen, K. (Hg.), *Bestimmungsschlüssel der Torfmoose in Norddeutschland, Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Geobotanik Schleswig-Holstein und Hamburg*, Bd. 50 (Arbeitsgemeinschaft Geobotanik Schleswig-Holstein und Hamburg e. V., Kiel, 1996), 86 S.
- van Dobben, H. F., ter Braak, C. J. F. & Dirkse, G. M., 1999: *Undergrowth as a biomonitor for deposition of nitrogen and acidity in pine forest*. *Forest Ecology and Management* 114: 83–95.
- Dohrenbusch, A., Kumke, J. & Mackenthun, G., 2000: *Die Eignung von Baumarten für die Aufforstung nährstoffverarmter Standorte*. *Forstarchiv* 71: 112–119.
- Dulière, J. F., Bruyn, R. d., Malaisse, F. & de Bruyn, R., 2000: *Changes in the moss layer after liming in a Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) stand of eastern Belgium*. *Forest Ecology and Management* 136: 97–105.
- Dulière, J. F., Carnol, M., Dalem, S., Remacle, J. & Malaisse, F., 1999: *Impact of dolomite lime on the ground vegetation and on potential net N transformations in Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) and sessile oak (Quercus petraea (Matt.) Lieb.) stands in the Belgian Ardenne*. *Annals of Forest Science* 56: 361–370.
- Dzwonko, Z. & Gawronski, S., 2002: *Effect of litter removal on species richness and acidification of a mixed oak-pine woodland*. *Biological Conservation* 106: 389–398.
- Eberhard, J., 1914: *Die Grundlagen naturgemäßer Bestandesbegründung*. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 36: 75–87.

- Ebermayer, E., *Die gesamte Lehre der Waldstreu mit Rücksicht auf die chemische Statik des Waldbaues* (Springer, Berlin, 1876), 861 S.
- Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W. & Paulißen, D., *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, Scripta Geobotanica*, Bd. 18 (Erich Golze, Göttingen, 1992), 2. verbesserte und erweiterte Aufl., 258 S.
- Environmental Science Research Institute, 1992-1999: *Arc View 3.2*.
- Englisch, M., *Standortsveränderungen in sekundären Nadelwäldern. Einige Fallbeispiele zur Veränderung von Standortseigenschaften und der Gefährdung von Beständen*. In: Müller, F. (Hg.), *Mariabrunner Waldbautage 1999. Umbau sekundärer Nadelwälder*. (Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien, 2000), *FBVA Berichte*, Bd. 111, 57–137.
- Erdmann, 1921: *Künstliche Düngung im Walde*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 53: 155–157.
- Evers, F. H., 1991: *Forest fertilization - present state and history with special reference to South German conditions*. Fertilizer Research 27: 71–86.
- Falkengren-Grerup, U., 1990: *Distribution of field layer species in Swedish deciduous forests in 1929-54 and 1979-88 as related to soil pH*. Vegetatio 86: 143–150.
- Falkengren-Grerup, U. & Diekmann, M., 2003: *Use of a gradient of N-deposition to calculate effect-related soil and vegetation measures in deciduous forests*. Forest Ecology and Management 180: 113–124.
- Fiedler, F. (Hg.), *Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd*, Bd. Karten (vdf Hochschulverlag, Zürich, Offenbach, 1995), 76 S.
- Finck, A., *Dünger und Düngung. Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen* (VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1992), 2. Aufl., 488 S.
- Fischer, H., Bens, O. & Hüttl, R. F., 2002: *Veränderung von Humusform, -vorrat und -verteilung im Zuge von Waldumbau-Maßnahmen im Nordostdeutschen Tiefland*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 121: 322–334.
- Frahm, J.-P. & Frey, W. (Hg.), *Moosflora, UTB*, Bd. 1250 (Eugen Ulmer, Stuttgart, 1992), 528 S.
- Fyles, J. W., Côté, B., Courchesne, F., Hendershot, W. H. & Savoie, S., 1994: *Effects of base cation fertilization on soil and foliage nutrient concentrations, and litter-fall and throughfall nutrient fluxes in a sugar maple forest*. Canadian Journal of Forest Research 24: 542–549.
- Gärtner, S., *Auswirkungen des Waldumbaus auf die Vegetation im Südschwarzwald, Schriftenreihe Freiburger forstliche Forschung*, Bd. 26 (Albert - Ludwigs - Universität Freiburg, Freiburg, Breisgau, 2004), 233 S.
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.), *Erläuterungen zu Blatt 7218 Calw von Karl Regelman (Nachdruck der Erstausgabe von 1919), Geologische Karte 1:25000 von Baden-Württemberg*, Bd. 7218 Calw (Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart, 1991), 268 S.
- Geyer, O. F. & Gwinner, M. P., *Geologie von Baden-Württemberg* (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart, 1985), 4. Aufl., 482 S.

LITERATURVERZEICHNIS

- Giesler, R., Högberg, M. & Högberg, P., 1998: *Soil chemistry and plants in fennoscandian boreal forest as exemplified by a local gradient*. Ecology 79: 119–137.
- Glatzel, G., 1991: *The impact of historic land use and modern forestry on nutrient relations of Central European forest ecosystems*. Fertilizer Research 27: 1–8.
- Glavac, V., *Vegetationsökologie: Grundfragen, Aufgaben, Methoden* (Gustav Fischer, Jena, Stuttgart, Lübeck, Ulm, 1996), 358 S.
- Gruselle, M. C. & Bauhus, J., *Litter decomposition in mixed spruce-beech stands – a conceptual approach*. In: Bauhus, J. & Csapek, G. (Hg.), *Beiträge zur Tagung 2004 der Sektion Waldbau DVFFA, 06.–08. September 2004 in Freiburg/Staufen*. (Freiburg, 2005), *Berichte Freiburger Forstliche Forschung*, Bd. 60, 49–58.
- Gussone, H. A., *Faustzahlen für Düngung im Walde* (BLV Bayerischer Landwirtschaftsverlag, München Basel Wien, 1964), 98 S.
- Gussone, H. A., 1983: *Die Praxis der Kalkung im Walde der Bundesrepublik Deutschland*. Der Forst- und Holzwirt 38: 63–71.
- Harrer, 1918: *Bekämpfung von Rauchschäden*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 40: 359–360.
- Haun, B., 1958: *Kalkdüngungsversuch zu Buchelsaat auf mittlerem Buntsandstein*. Allgemeine Forstzeitschrift 13: 424–425.
- Hausser, K., *Ergebnisse von Düngungsversuchen zu schlechtwüchsigen Nadelholzkulturen auf Buntsandstein des württembergischen Schwarzwalds*. In: *Auswertung von Düngungs- und Meliorationsversuchen in der Forstwirtschaft* (Ruhr-Stickstoff AG, Bochum, 1958), 129–168.
- Hausser, K., 1961: *Ergebnisse von Düngungs-Versuchen zu 50- bis 70jährigen Fichtenbeständen auf oberem Buntsandstein des Württ. Schwarzwalds*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 132: 269–291.
- Hausser, K., 1973a: *Düngungs- und Meliorationsversuche zu Kiefern auf mittlerem und oberem Buntsandstein des Württembergischen Schwarzwalds. Teil I: Düngungsversuche*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 144: 169–186.
- Hausser, K., 1973b: *Düngungs- und Meliorationsversuche zu Kiefern auf mittlerem und oberem Buntsandstein des Württembergischen Schwarzwalds. Teil II: Meliorationsversuche*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 144: 205–218.
- Hausser, K. & Schairer, E., 1953: *Ergebnisse von Forstdüngungs- und Meliorationsversuchen in Süd-Württemberg*. Mitteilungen der Württembergischen Forstlichen Versuchsanstalt 10: 1–109.
- Heisner, U., von Wilpert, K. & Hildebrand, E. E., 2003: *Vergleich aktueller Messungen zum Aziditätsstatus südwestdeutscher Waldböden mit historischen Messungen von 1927*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 174: 41–44.
- Helbig, M., 1910: *Einwirkung von Kalk auf Tannentrockentorf*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 32: 271–274.
- Henze, 1904: *Die Entwicklung der Forstdüngungsfrage. Die Forstdüngungsversuche der Landwirtschaftskammer für die Provinz Sachsen*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 54: 149–221.

- Hesselman, H., 1925: *Studier över barrskogens humustäcker, dess egenskaper och beroende av skogsvården*. Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt 22: 169–508.
- Hildebrand, E. E., 1986: *Zustand und Entwicklung der Austauschereigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 105: 60–76.
- Hölscher, D., Asche, N. & Beese, F., 1999: *Langfristige Effekte einer Waldkalkung auf bodenchemische Parameter, mikrobielle Biomasse und Regenwurmbesatz*. Forstarchiv 70: 127–132.
- Hofmann, F., 1905: *Bodenbearbeitung und künstliche Düngung in Forchtenkrüppelbeständen des württemberg. Schwarzwaldes*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 81: 297–307.
- Hofmann, F., 1914: *Weitere Mitteilungen über die Wirkung von Düngungen in Forchtenkrüppelbeständen des württ. Schwarzwaldes*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 90: 228–231.
- Hüttl, R. F. & Zoetl, H. W., 1993: *Liming as a mitigation tool in Germany's declining forests - reviewing results from former and recent trials*. Forest Ecology and Management 61: 325–338.
- Hug, D., 2000: *Bodennutzung im Mittleren Schwarzwald und deren Veränderung von 1780 bis heute*. Schriften der Baar 43: 91–122.
- Hug, R., Hepp, R. & von Wilpert, K., *18 Jahre Depositionsmessnetz der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Berichte Freiburger Forstliche Forschung*, Bd. 59 (Eigenverlag FVA, Freiburg i. Br., 2005), 95 S.
- Huss, J. & Stephani, A., 1978: *Lassen sich angekommene Buchennaturverjüngungen durch frühzeitige Aufrichtung, durch Düngung oder Unkrautbekämpfung rascher aus der Gefahrenzone bringen?* Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 149: 133–145.
- Immer, A., Schmidt, W., Meiwes, K. J. & Beese, F., 1993: *Langzeitwirkungen von Kalkung und Düngung auf den chemischen Zustand im Oberboden, die Humusformen und die Bodenvegetation in einem Fichtenforst*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 112: 334–346.
- Jandl, R., Starlinger, F., Englisch, M., Herzberger, E. & Johann, E., 2002: *Long-term effects of a forest amelioration experiment*. Canadian Journal of Forest Research 32: 120–128.
- Jandl, R., Starlinger, F. & Herzberger, E., *Die Wirkung von Düngung und waldbaulichen Meliorationsmaßnahmen auf Bodenchemie und Vegetation im Versuch Dobrowa*. In: Müller, F. (Hg.), *Mariabrunner Waldbautage 1999. Umbau sekundärer Nadelwälder*. (Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien, 2000), *FBVA Berichte*, Bd. 111, 181–197.
- Kenk, G., Unfried, P., Evers, F. H. & Hildebrand, E. E., 1984: *Düngung zur Minderung der neuartigen Waldschäden - Auswertungen eines alten Düngungsversuchs zu Fichte im Buntsandstein-Odenwald*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 103: 307–320.
- Khanna, P., 2005: *Persönliche Mitteilung*.
- Koderle, J. K., *Grundsätze der künstlichen Düngung im Forstkulturwesen. Ein Beitrag zur Holzerziehungskunde* (o. Verlagsangabe, Wien, 1865), 102 S.

LITERATURVERZEICHNIS

- Korneck, D., Schnittler, M. & Vollmer, I., *Rote Liste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands*. In: Bundesamt für Naturschutz (Hg.), *Rote Liste gefährdeter Pflanzen Deutschlands* (Bundesamt für Naturschutz, Bonn, 1996), *Schriftenreihe für Vegetationskunde*, Bd. 28, 21–187.
- 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.
- Krug, M., 1996: *Differenzierung und Verteilung von Humusformen auf Oberem Buntsandstein in Abhängigkeit von Standort, Bestand und Brombeervorkommen*. Diplomarbeit, Forstwissenschaftliche Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- Leiningen-Westerburg, W., 1920: *Rauchschäden und einschlägige bodenkundliche Fragen*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 42: 81–93.
- Leps, J. & Smilauer, P., *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO* (University of Cambridge, Cambridge, 2003), 269 S.
- Ludwig, G., Düll, R., Philippi, G., Ahrens, M., Caspari, S., Koperski, M., Lütt, S., Schulz, F. & Schwab, G., *Rote Liste der Moose Deutschlands*. In: Bundesamt für Naturschutz (Hg.), *Rote Liste gefährdeter Pflanzen Deutschlands* (Bundesamt für Naturschutz, Bonn, 1996), *Schriftenreihe für Vegetationskunde*, Bd. 28, 189–306.
- Månsson, K. F. & Falkengren-Grerup, U., 2003: *The effect of nitrogen deposition on nitrification, carbon and nitrogen mineralisation and litter C:N ratios in oak (Quercus robur L.) forests*. Forest Ecology and Management 179: 455–467.
- Mengel, K., 1986: *Umsatz im Boden und Ertragswirkung rohphosphathaltiger Düngemittel*. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 149: 674–690.
- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum (MLR), Baden-Württemberg, 2002a: *FoGIS - forstliches GIS*.
- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum (MLR), Baden-Württemberg, 2002b: *Forstliche Standortskarten digital*.
- Minnesota Department of Natural Resources, 2002: *DNR random sampling tools*.
- Möller, A., 1920: *Kiefern-Dauerwaldwirtschaft*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 52: 4–41.
- Mrotzek, R. & Schmidt, W., 1998: *Zur Ausbreitung der Großen Brennnessel (Urtica dioica L.) in Buchenwäldern und den möglichen Ursachen*. Forst und Holz 53: 237–240.
- Økland, R. H., 1995: *Changes in the occurrence and abundance of plant species in a Norwegian boreal coniferous forest, 1988-1993*. Nordic Journal of Botany 15: 415–438.
- Økland, T., Bakkestuen, V., Økland, R. H. & Eilertsen, O., 2004: *Changes in forest understorey vegetation in Norway related to long-term soil acidification and climatic change*. Journal of Vegetation Science 15: 437–448.
- Otto, H.-J., 1996: *Hundert Jahre Heideaufforstung im ehemaligen Forstgut Lopau/ Lüneburger Heide*. Forst und Holz 51: 787–791.
- Pacher, J., 1980: *Die Rohstoffbedeutung des Waldes in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 151: 49–53.

- Persson, T., Rudebeck, A. & Wirén, A., 1995: *Pools and fluxes of carbon and nitrogen in 40-year-old forest liming experiments in southern Sweden*. Water, Air, and Soil Pollution 85: 901–906.
- Piest, K. H., 1983: *Kalken nach Bodenbearbeitung zur Förderung der Buchen- Naturverjüngung*. Der Forst- und Holzwirt 38: 559–560.
- Ramm, S., 1902: *Ergebnis eines Versuchs mit Anwendung künstlicher Dünger zu einer Weißtannenfreisaat*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 78: 50–52.
- Ramm, S., *Die waldbauliche Zukunft des württembergischen Schwarzwalds, Unsere Forstwirtschaft im 20. Jahrhundert*, Bd. 6 (Verlag der Laupp'schen Buchhandlung, Tübingen, 1911), 109 S.
- Reihling, K., 1940: *Ein Versuch mit Besenginster (Sarothamnus scoparius) auf degradiertem mittlerem Hauptbuntsandsteinboden (sm)*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 116: 197–234.
- Robinson, C. H., Pearce, T. G., Ineson, P., Dickson, D. A. & Nys, C., 1992: *Earthworm communities of limed coniferous soils: field observations and implications for forest management*. Forest Ecology and Management 55: 117–134.
- Röntgen, E., *Die Würzbacher Missen im Wandel der Zeiten*. In: *Missen im Landkreis Calw (2)* (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bezirksstelle für Naturschutz und Landschaftspflege, Karlsruhe, 1993), *Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Württemberg*, Bd. 73, 41–54.
- Rost-Siebert, K. & Jahn, G., 1988: *Veränderungen der Waldbodenvegetation während der letzten Jahrzehnte – Eignung zur Bioindikation von Immissionswirkungen*. Forst und Holz 43: 75–81.
- Sachs, L., *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden* (Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997), völlig neu bearbeitete 8. Aufl., 881 S.
- Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.-H. & Schwertmann, U., *Lehrbuch der Bodenkunde* (Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1992), 13., durchgesehene Aufl., 491 S.
- Schier, W., 1893: *Die Kohlenrauchschäden im Chemnitzer Stadtwalde*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 15: 7–24.
- Schmidt, M., Ewald, J., Fischer, A., von Oheimb, G., Kriebitsch, W.-U., Ellenberg, H. & Schmidt, W., 2003: *Liste der Waldgefäßpflanzen Deutschlands*. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg 212: 32.
- Schmidt, W., 2002: *Einfluss der Bodenschutzkalkungen auf die Waldvegetation*. Forstarchiv 73: 43–54.
- Schornick, O. K., *Änderung der Bodenvegetation in Waldbeständen als Folge einer künstlichen Düngung, KfK-PEF-Berichte*, Bd. 63 (Kernforschungszentrum, Karlsruhe, 1990), 175 S.
- Schroeder, J., 1873: *Untersuchungen über die schädliche Einwirkung des Hütten- und Steinkohlenrauches auf das Wachstum der Pflanzen, insbesondere der Fichte und Tanne*. Tharandter forstliches Jahrbuch 23: 217–267.

LITERATURVERZEICHNIS

- Schroeder, J., 1875: *Beiträge zur Kenntniß des Mineralstoffgehaltes der Streumaterialien*. Tharandter forstliches Jahrbuch 25: 29–41.
- Schroeder, J., 1877a: *Die Feldpflanzen und Waldbäume in ihren Ansprüchen an das mineralische Nährstoffcapital des Bodens und die chemische Bedeutung der Waldstreu*. Tharandter forstliches Jahrbuch 27: 25–48.
- Schroeder, J., 1877b: *Untersuchungen über den Stickstoffgehalt des Holzes und der Streumaterialien – als Beitrag zur Lösung der Stickstofffrage des Waldes*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 53: 221–232.
- Schubert, W. & Vent, W. (Hg.), *Werner Rothmaler Gefäßpflanzen: Kritischer Band, Exkursionsflora von Deutschland*, Bd. 4 (Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart, 1994), 8. Aufl., 811 S.
- Schütze, W., 1878: *Ueber die Menge und den Aschengehalt der monatlich abfallenden Nadeln in Kiefernbeständen*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 10: 63–73.
- Schwappach, *Forstdüngung*. Neudammer Forstliche Belehrungshefte (Neumann, Neudamm, 1916), zweite Aufl., 28 S.
- Seidling, W., 1994: *Vegetationsdynamik bodensaurer Kiefern-Traubeneichenwälder und entsprechender Kiefernforstgesellschaften nach Kalkdüngungsmaßnahmen*. Tuexenia 14: 53–71.
- Statistisches Bundesamt, 2000: *Corine Landcover- GIS-Daten zur Bodenbedeckung für die BR Deutschland*.
- Statsoft, 1984-2001: *Statistica*.
- Stier, B., 1958: *Die Förderung der Buchennaturverjüngung durch NH₃ Begasung*. Der Forst- und Holzwirt 13: 302–304.
- Tamm, C. O., 1995: *Towards an understanding of the relations between tree nutrition, nutrient cycling and environment*. Plant and Soil 168-169: 21–27.
- Thimonier, A., Dupouey, J. L. & Timbal, J., 1992: *Floristic changes in the herb-layer vegetation of a deciduous forest in the Lorraine Plain under the influence of atmospheric deposition*. Forest Ecology and Management 55: 149–167.
- Trefz-Malcher, G., 2001: *Schriftliche Benachrichtigung*.
- Ulrich, B. & Keuffel, W., 1970: *Auswirkungen einer Bestandeskalkung zu Fichte auf den Nährstoffhaushalt des Bodens. Untersuchungen an den Kalkungsversuchen im Forstamt Escherode*. Forstarchiv 41: 30–35.
- Ulrich, B., Mayer, R. & Khanna, P. K., *Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling, Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Bd. 58 (Sauerländer, Frankfurt am Main, 1979), 291 S.
- Vejre, H., Ingerslev, M. & Raulund-Rasmussen, K., 2001: *Fertilization of Danish forests: a review of experiments*. Scandinavian Journal of Forest Research 16: 502–513.
- Walter, M., 1996: *Die Naturverjüngung der Tanne auf oberem Buntsandstein in Abhängigkeit von Vegetation und Bestand*. Diplomarbeit, Forstwissenschaftliche Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

- Walter, M., Krug, M., Schreiner, M. & Reif, A., 1998: *Brombeeren auf oberem Buntsandstein*. Allgemeine Forstzeitschrift/ Der Wald 53: 600–603.
- Weber, G., 1999: *Warum versagen Esche und Bergahorn auf stark versauerten Böden?* Allgemeine Forstzeitschrift/ Der Wald 54: 848–850.
- Weber, H. E., 1996: *Die Gattung Rubus im mittleren Schwarzwald mit Nachbargebieten*. Carolina 54: 9–36.
- Weber, R., 1875: *Ueber den Einfluß des Standortes auf die Zusammensetzung der Aschen von Buchenlaub und Fichtennadeln*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 51: 221–231.
- von Wedel, K., 1969: *Ergebnisse eines Kalkdüngungsversuches zur Förderung der Buchennaturverjüngung im Forstamt Medingen*. Der Forst- und Holzwirt 24: 366–399.
- Weihls, U. & Langhorst, U., 1991: *Auswirkungen unterschiedlicher Düngungsmaßnahmen auf die Waldbodenvegetation typischer Harzhochlagenstandorte*. Forst und Holz 46: 172–177.
- Wieler, A., 1897: *Ueber unsichtbare Rauchschäden bei Nadelbäumen*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 29: 513–529.
- Wieler, A., 1903: *Über unsichtbare Rauchschäden*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 35: 204–225.
- Wieler, A., 1922: *Die Beteiligung des Bodens an den durch Rauchsäuren hervorgerufenen Vegetationsschäden*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 54: 534–543.
- Wilmot, T. R., Ellsworth, D. S. & Tyree, M. T., 1996: *Base cation fertilization and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands*. Forest Ecology and Management 84: 123–134.
- von Wilpert, K., 1996: *Stoffhaushalt in Misch- und Reinbeständen der Ökosystemfallstudie „Conventwald“*. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 194: 179–190.
- von Wilpert, K., 2001: *Persönliche Mitteilung*.
- von Wilpert, K., 2003: *Drift des Stoffhaushalts im Fichten-Düngeversuch Pfalzgrafenweiler*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 174: 21–30.
- von Wilpert, K., Hildebrand, E., & Huth, T., *Ergebnisse des Praxis-Großdüngerversuches: Abschlußbericht über die Anfangsaufnahmen (1985/86) und die Endaufnahmen (1989/90), Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg*, Bd. 171 (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA), Freiburg, 1993), 131 S.
- von Wilpert, K. & Schäffer, J., *Bodenschutzkalkung im Wald, Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg*, Bd. 50 (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 2000), 21 S.
- Wislicenus, H. (Hg.), *Waldsterben im neunzehnten Jahrhundert: Sammlung von Abhandlungen über Abgase und Rauchschäden* (VDI, Düsseldorf, 1985).
- Wittich, W., 1930: *Über die Wirkung intensiver Bodenbearbeitung auf diluvialen Sandböden mit Trockentorfauflage*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 62: 565–579.

LITERATURVERZEICHNIS

- Wittich, W., 1934: *Untersuchungen in Nordwestdeutschland über den Einfluß der Holzart auf den biologischen Zustand des Bodens*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 66: 213–218.
- Wittich, W., 1939: *Untersuchungen über den Verlauf der Streuzersetzung auf einem Boden mit Mullzustand*. Forstarchiv 15: 96–111.
- Wittich, W., 1942: *Die Aktivierung von Rohhumus extrem ungünstiger Beschaffenheit*. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 74: 241–271.
- Wittich, W., 1943: *Untersuchungen über den Verlauf der Streuzersetzungen auf einem Boden mit Mullzustand II*. Forstarchiv 19: 1–18.
- Wittich, W., *Der heutige Stand unseres Wissens vom Humus und neue Wege zur Lösung des Rohhumusproblems im Walde* (Sauerländer, Frankfurt am Main, 1952), 106 S.
- Wittich, W., 1958: *Die Bedeutung der Düngung in der Forstwirtschaft*. Der Forst- und Holzwirt 13: 289–290.
- Zimmerle, H., 1949: *Die Versuchsflächen des Staatswalds Weckenhardt im Forstbezirk Hirsau*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 68: 401–414.
- Zoldan, J. W., 1997: *Vegetationsveränderungen in der Krautschicht von Wäldern – Zwischenergebnisse nach zwei bzw. drei Wiederholungskartierungen in zwei ausgewählten Dauerbeobachtungsflächen*. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz 40: 113–137.
- Zukrigl, K., Egger, G. & Rauchecker, M., 1993: *Untersuchungen über Vegetationsveränderungen durch Stickstoffeintrag in österreichische Waldökosysteme*. Phytocoenologia 23: 95–114.

Anhang

A Artenliste mit Abkürzungen, Informationen zu Lebensform, Gefährdung und Enge der Bindung an Waldstandorte

Tabelle A.1: Auflistung aller vorkommenden Pflanzen- Moos und Flechtenarten mit Kurzbezeichnung, wissenschaftlichem Namen und Lebensform (aus Ellenberg et al., 1992) und Gefährdungsgrad nach den Roten Listen (Korneck et al., 1996; Ludwig et al., 1996) in Baden-Württemberg (B-W) und Deutschland (D). Krautige Pflanzen und Gehölze mit der Einordnung als Waldpflanze im Hügel- und Bergland nach Schmidt et al. (2003).

Wissenschaftlicher Name	Kurzform	Lebensform	Rote Liste	Waldpflanze
Gehölze				
<i>Abies alba</i>	5ABIalba	P	3 (D)	B
<i>Picea abies</i>	5PICabie	P		B
<i>Pinus strobus</i>	5PINstro	P		
<i>Pinus sylvestris</i>	5PINsylv	P		B
<i>Acer pseudoplatanus</i>	5ACEpseu	P		B
<i>Betula pendula</i>	5BETpend	P		B
<i>Betula pubescens</i>	5BETpube	P		B
<i>Fagus sylvatica</i>	5FAGsylv	P		B
<i>Quercus spec.</i> (Verjüngung)	5QUEspec	P		B
<i>Tilia cordata</i>	5TILcord	P		B
<i>Sorbus aria</i>	5SORaria	P, N		B
<i>Sorbus aucuparia</i>	5SORaucu	P, N		B
<i>Corylus avellana</i>	5CORavel	N		S.2.1
<i>Frangula alnus</i>	5FRAalnu	N		S.2.1
<i>Salix caprea</i>	5SALcapr	N, P		B
<i>Sambucus racemosa</i>	5SAMrace	N		S.2.1
Halbsträucher				
<i>Rubus fruticosus</i> agg. (<i>Rubus hirtus</i> agg.)	5RUBfrut	H		S.2.2
<i>Rubus idaeus</i>	5RUBidae	H		S.2.1
Zwergsträucher				
<i>Calluna vulgaris</i>	5CALvulg	Z		K.2.1
<i>Genista pilosa</i>	5GENpilo	Z		K.2.2
<i>Vaccinium myrtillus</i>	5VACmyrt	Z		K.2.1
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	5VACviti	Z	3 (B-W)	K.2.1

Krautige Pflanzen
Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung Tab. A.1

Wissenschaftlicher Name	Kurzform	Lebensform	Rote Liste	Waldpflanze
<i>Ajuga reptans</i>	5AJUrept	H		K.2.1
<i>Digitalis purpurea</i>	5DIGpurp	H		K.1.2
<i>Epilobium angustifolium</i>	5EPIangu	H		K.2.1
<i>Epipactis helleborine</i>	5EPIhell	G		K.1.1
<i>Epilobium montanum</i>	5EPImont	H, C		K.2.1
<i>Fragaria vesca</i>	5FRAvesc	H		K.2.1
<i>Galium hircynicum</i>	5GALharc	C, H		K.2.1
<i>Galium rotundifolium</i>	5GALrotu	C		K.1.1
<i>Hieracium sylvaticum</i>	5HIEsylv	H		K.2.1
<i>Hypericum perforatum</i>	5HYPperf	H		K.2.2
<i>Melampyrum pratense</i>	5MELprat	T		K.2.1
<i>Mycelis muralis</i>	5MYCmura	H		K.2.1
<i>Orthilia secunda</i>	5ORTsecu	C		K.1.1
<i>Oxalis acetosella</i>	5OXAacet	G, H		K.1.1
<i>Prenanthes purpurea</i>	5PREpurp	H		K.1.1
<i>Senecio fuchsii</i>	5SENFuch	H		K.1.2
<i>Urtica dioica</i>	5URTdioi	H		K.2.1
<i>Veronica officinalis</i>	5VERoffi	C		K.2.1
Farne				
<i>Athyrium filix-femina</i>	5ATHfili	H		K.2.1
<i>Blechnum spicant</i>	5BLEspic	H		K.1.1
<i>Dryopteris carthusiana</i>	5DRYcart	H		K.2.1
<i>Dryopteris dilatata</i>	5DRYdila	H		K.2.1
<i>Dryopteris filix-mas</i>	5DRYfili	H		K.1.1
<i>Polypodium vulgare</i>	5POLvulg	C		K.2.1
<i>Pteridium aquilinum</i>	5PTEaqui	G		K.2.1
<i>Thelypteris limbosperma</i>	5THElimb	H		K.2.1
Gräser				
<i>Agrostis tenuis</i>	5AGRtenu	H		K.2.1
<i>Carex pilulifera</i>	5CARpilu	H		K.2.1
<i>Carex sylvatica</i>	5CARsylv	H		K.1.1
<i>Deschampsia flexuosa</i>	5DESflex	H		K.2.1
<i>Festuca altissima</i>	5FESalti	H		K.1.1
<i>Juncus effusus</i>	5JUNeffu	H		K.2.1
<i>Luzula luzuloides</i>	5LUZluzu	H		K.2.1
<i>Milium effusum</i>	5MILEffu	H		K.1.1
<i>Molinia caerulea</i>	5MOLcaer	H		K.2.1

Laubmoose

Fortsetzung nächste Seite

A Artenliste

Fortsetzung Tab. A.1				
Wissenschaftlicher Name	Kurzform	Lebensform	Rote Liste	Waldpflanze
<i>Atrichum undulatum</i>	6ATRundu	H		
<i>Brachythecium rutabulum</i>	6BRAruta	C, (E)		
<i>Dicranodontium denudatum</i>	6DICdenu	C	V (D)	
<i>Dicranella heteromalla</i>	6DIChete	C		
<i>Dicranum montanum</i>	6DICmont	C, E		
<i>Dicranum polysetum</i>	6DICpoly	C		
<i>Dicranum scoparium</i>	6DICscop	C, E		
<i>Eurhynchium angustirete</i>	6EURangu	C		
<i>Eurhynchium praelongum</i>	6EURprae	C		
<i>Eurhynchium striatum</i>	6EURstri	C, (E)		
<i>Herzogiella seligeri</i>	6HERseli	C, (H)		
<i>Hylocomium splendens</i>	6HYLsple	C, (E)	V (D)	
<i>Hypnum cupressiforme</i>	6HYPcupr	C, (E)		
<i>Hypnum jutlandicum</i>	6HYPjutl	C		
<i>Leucobryum glaucum</i>	6LEUglau	C	V (D)	
<i>Mnium hornum</i>	6MNIhorn	H, (E)		
<i>Mnium stellare</i>	6MNIstel	H	V (D)	
<i>Plagiomnium undulatum</i>	6PLMundu	H, C		
<i>Plagiothecium curvifolium</i>	6PLAcurv	H		
<i>Plagiothecium laetum</i>	6PLAlaet	H, (E)		
<i>Plagiothecium undulatum</i>	6PLAundu	H	V (D)	
<i>Pleurozium schreberi</i>	6PLEschr	H, C		
<i>Polytrichum formosum</i>	6POLform	C, H		
<i>Ptilium crista-castrensis</i>	6PTIcris	H, C	V (D)	
<i>Rhizomnium punctatum</i>	6RHIpunc	C, H		
<i>Rhytidiadelphus loreus</i>	6RHYlore	H, C	V (D)	
<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>	6RHYtriq	C	V (D)	
<i>Scleropodium purum</i>	6SCLpuru	C		
<i>Sphagnum capillifolium</i>	6SPHcapi	C	V (D)	
<i>Sphagnum girgensohnii</i>	6SPHgirg	C	V (D)	
<i>Sphagnum quinquefarium</i>	6SPHquin	C	3 (D)	
<i>Sphagnum russowii</i>	6SPHruss	C, (A)	V (D)	
<i>Thuidium tamariscinum</i>	6THUutama	C, (E)		
Lebermoose				
<i>Bazzania trilobata</i>	6BAZtril	C	V (D)	
<i>Lepidozia reptans</i>	6LEPrept	C, H, (E)		
<i>Lophocolea bidentata</i>	6LOPbide	C		
<i>Lophocolea heterophylla</i>	6LOPhete	C, H, E		
<i>Plagiochila asplenioides</i>	6PLAaspl	C	V (D)	

Bodenflechten

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung Tab. A.1

Wissenschaftlicher Name	Kurzform	Lebensform	Rote Liste	Waldpflanze
-------------------------	----------	------------	------------	-------------

<i>Peltigera spec.</i>	6PELspec			
------------------------	----------	--	--	--

Abkürzungen Lebensform

A Hydrophyt, C Chamaephyt, E Epiphyt, G Geophyt H Hemikryptophyt, N Nanophanerophyt, P Phanerophyt, T Therophyt, Z holziger Chamaephyt.

Abkürzungen rote Liste

3 gefährdet, V Vorwarnliste (zurückgehend, örtlich gefährdet)

Abkürzungen Waldartenliste

B Arten der Baumschicht, S Arten der Strauchschicht, K Arten der Krautschicht.

1 Weitgehend an Wald gebunden

1.1 Vorwiegend im geschlossenen Wald 1.2 Vorwiegend an Waldrändern und auf Waldverlichtungen

2 Im Wald und im Offenland

2.1 Im Wald wie im Offenland 2.2 Auch im Wald, aber Schwerpunkt im Offenland

—

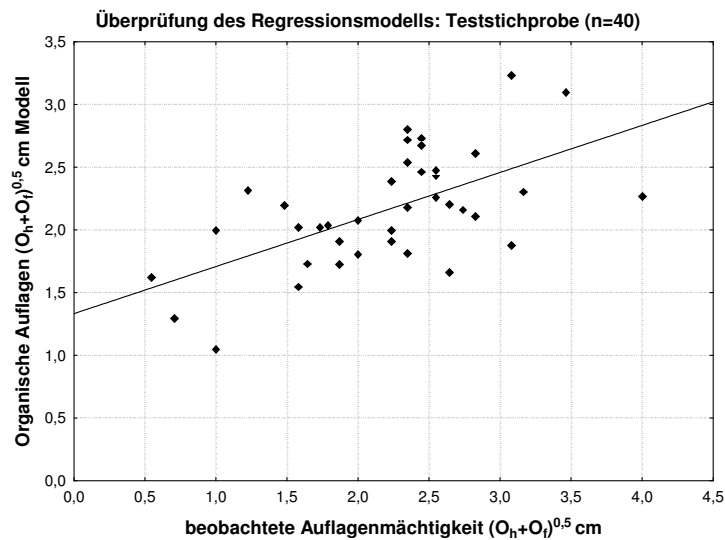
B Vergleich der Standorte

Tabelle B.1: Mittelwerte \bar{x} und Standardabweichungen s für wichtige Bodenvariablen und Feuchte-Zeigerwerte der Vegetationsaufnahmen nach Ellenberg et al. (1992) jeweils im Vergleich der nichtvernässenden (nv) und mehr oder weniger vernässenden (mowv) Standortseinheiten auf ungedüngten Untersuchungsflächen. Untersuchungsfläche L3 U besteht nur aus nichtvernässenden Standortseinheiten. Überprüfung mit MWU-Test zweiseitig, Signifikanzniveaus * ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$). Signifikante Unterschiede sind durch Unterstreichung hervorgehoben.

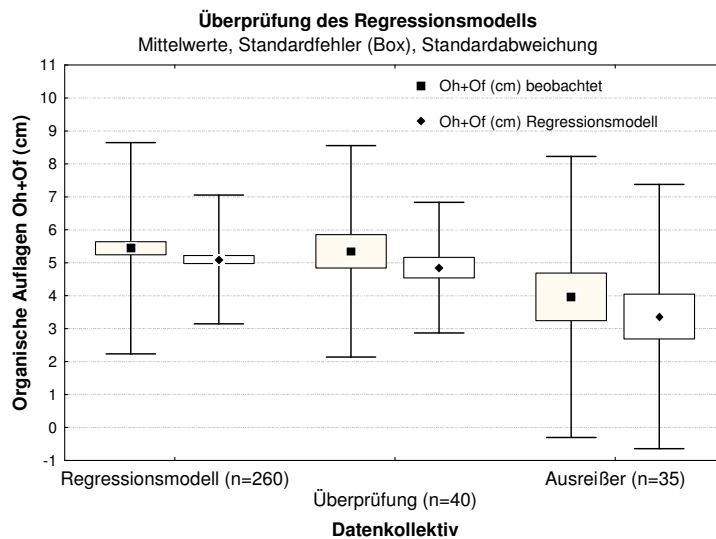
Fläche Vernässung	L1 U				L2 U				L3 U		L4 U			
	mowv		nv		mowv		nv		nv		mowv		nv	
Anzahl	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
	25		10		9		16		40		4		6	
pH _{CaCl₂} ¹	2,91	0,31	2,97	0,27	2,85	0,66	2,90	0,38	2,83	0,59	2,92	0,76	2,91	0,72
N ²	2,58	1,04	2,51	0,78	1,44	0,41	1,15	0,24	1,69	0,71	1,64	0,59	1,46	0,71
P ²	0,20	0,05	0,25	0,14	0,13	0,01	0,12	0,03	0,18	0,07	0,15	0,03	0,11	0,05
Ca ²	0,12*	0,07	0,28*	0,40	0,11	0,04	0,11	0,03	0,16	0,12	0,11	0,04	0,11	0,05
F-Zahl _u ³	5,03	0,20	5,04	0,35	5,02*	0,16	4,88*	0,26	5,15	0,29	5,05	0,37	5,09	0,16
F-Zahl _{gew} ⁴	4,95	0,85	5,63	0,98	5,25	0,60	4,82	0,72	5,77	0,21	5,70	0,31	5,39	0,28

¹ 0-5 cm Mineralboden, ² Druckaufschluss 0-5 cm Mineralboden, ³ ungewichteter Zeigerwert, ⁴ gewichtet mit der Deckung

C Validierung der Regressionsmodelle für die Modellierung der Mächtigkeit der organischen Auflagen sowie der Artenzahl



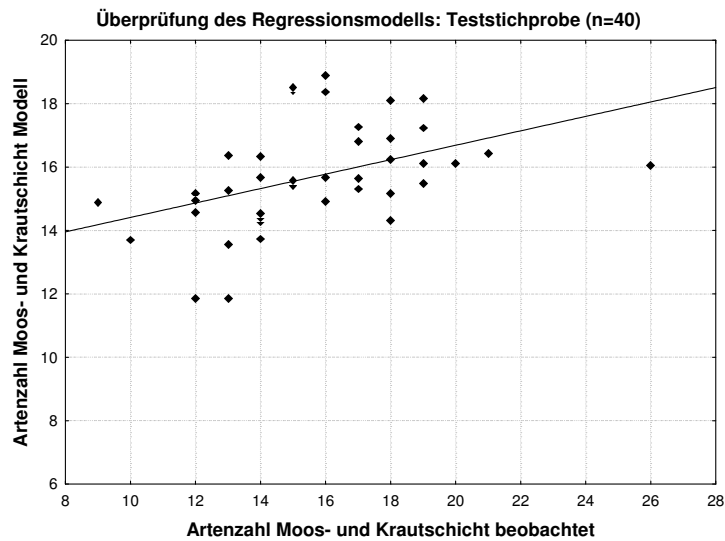
(a) Streudiagramm: $R = 0,58$, $p < 0,01$ (Spearman)



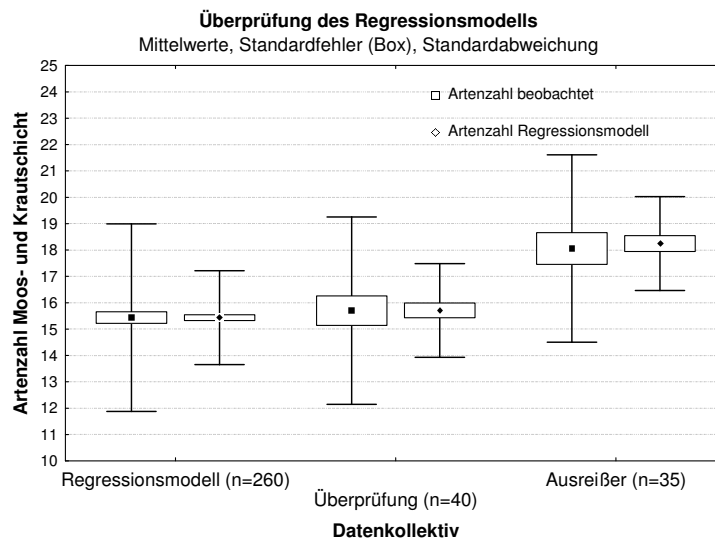
(b) Mittelwertsvergleich: In keinem Kollektiv signifikante Unterschiede zwischen Beobachtungs- und Modellwerten (MWU-Test)

Abbildung C.1: Validierung des Regressionsmodells „Organische Auflagen“: Der Zusammenhang zwischen beobachteten und erwarteten Werten der Teststichprobe ($n = 40$). Mittelwerte und Standardabweichungen der organischen Auflagen jeweils im Vergleich zwischen beobachteten Werten der organischen Auflagen ($O_h + O_f$) und modellierten Werten (vgl. 3.3.3.4, S. 37) für drei Kollektive: das mit dem das Regressionsmodell erstellt wurde, eine unabhängige Teststichprobe (Validierung) und einen aus Ausreißern bestehenden Datensatz.

C Validierung der Regressionsmodelle

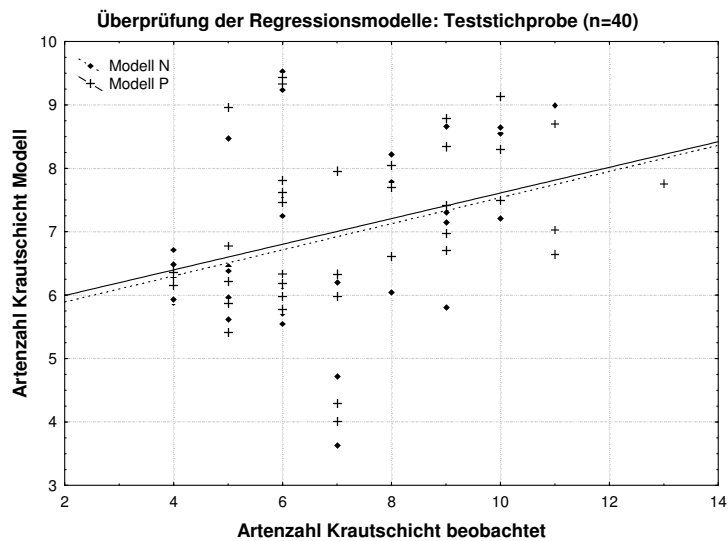


(a) $R = 0,55, p < 0,01$ (R nach Spearman)

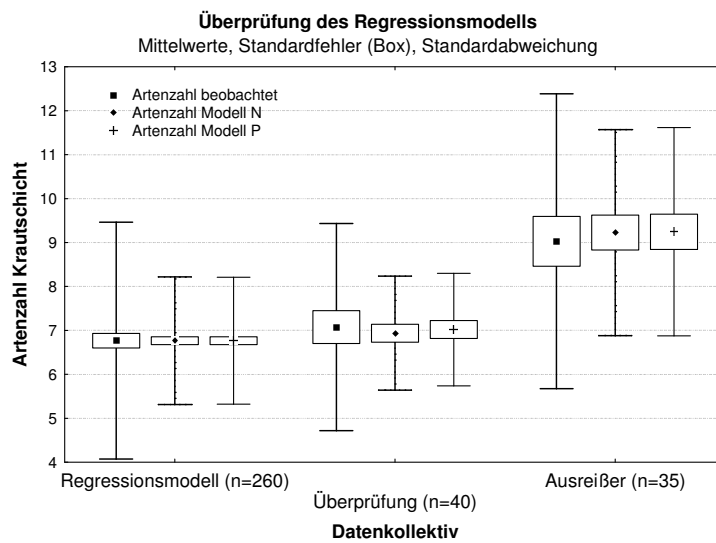


(b) Mittelwertsvergleich: In keinem Kollektiv signifikante Unterschiede zwischen Beobachtungs- und Modellwerten (MWU-Test)

Abbildung C.2: Überprüfung des Regressionsmodells - Artenzahl Moos- und Krautschicht. Der Zusammenhang zwischen beobachteten und erwarteten Werten der Teststichprobe ($n = 40$). Mittelwerte und Standardabweichungen der Artenzahlen (Moos- und Krautschicht) jeweils im Vergleich zwischen beobachteten Werten und modellierten Werten (vgl. 3.3.4.7, S. 44) für drei Kollektive: das mit dem das Regressionsmodell erstellt wurde, eine unabhängige Teststichprobe (Validierung) und einen aus Ausreißern bestehenden Datensatz.



(a) Zusammenhänge (R nach Spearman): „N“ $R = 0,40, p < 0,05$, „P“ $R = 0,45, p < 0,01$



(b) Mittelwertsvergleich: In keinem Kollektiv signifikante Unterschiede zwischen Beobachtungs- und Modellwerten (Kruskal-Wallis- H -Test)

Abbildung C.3: Überprüfung der Regressionsmodelle „N“ und „P“ - Artenzahl Krautschicht. Der Zusammenhang zwischen beobachteten und erwarteten Werten der Teststichprobe für die Modelle „N“ und „P“ ($n = 40$). Mittelwerte und Standardabweichungen der Artenzahlen (Krautschicht) jeweils im Vergleich zwischen beobachteten Werten und modellierten Werten (vgl. 3.3.4.7, S. 44) für drei Kollektive: das mit dem das Regressionsmodell erstellt wurde, eine unabhängige Teststichprobe (Validierung) und einen aus Ausreißern bestehenden Datensatz.