



UMWELT-MATERIALIEN NR. 184

Wald



LOTHAR

**Ursächliche Zusammenhänge
und Risikoentwicklung**

Synthese des Teilprogramms 6



**Bundesamt für
Umwelt, Wald und
Landschaft
BUWAL**

**UMWELT-MATERIALIEN
NR. 184**

Wald

LOTHAR

**Ursächliche Zusammenhänge
und Risikoentwicklung**

Synthese des Teilprogramms 6

Avec résumé en français

**Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL
Bern, 2005**

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
(BUWAL)

*Das BUWAL ist ein Amt des Eidg. Departements für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
(UVEK)*

Autoren

Bearbeitung Synthesekapitel:

Martin Indermühle, punctowald, Bern
Philippe Raetz, BUWAL/Forstdirektion
Richard Volz, BUWAL/Forstdirektion

Autoren Projektbeiträge:

Peter Bachmann, Peter Bebi, Peter Brang,
Sabine Braun, Matthias Dobbertin, Lubor Dvorak,
Walter Flückiger, Michael Götz, Christian Körner,
Peter Lüscher, Philipp Mayer, Fabian Meyer,
Anja Rammig, Daniel Rigling, Jean-Philippe Schütz,
Martin Zürrer

Zitierung

Gesamtbericht:

INDERMÜHLE M., RAETZ P., VOLZ R. 2005: *LOTHAR
Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung.
Synthese des Teilprogramms 6*. Umwelt-Materialien
Nr. 184. Bundesamt für Umwelt, Wald und
Landschaft, Bern. 145 S.

Einzelne Beiträge:

AUTOR(INNEN) 2005: Kapitelbezeichnung, in:
INDERMÜHLE M., RAETZ P., VOLZ R. 2005: *LOTHAR
Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung.
Synthese des Teilprogramms 6*. Umwelt-Materialien
Nr. 184. Bundesamt für Umwelt, Wald und
Landschaft, Bern. 145 S.

Begleitung BUWAL

Richard Volz, Philippe Raetz, Forstdirektion

Reviewgruppe:

Reinhard Eichrodt, Ottmar Holdenrieder,
Adrian Meier, Bernhard Oester, Jürg Zinggeler

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfoto

Markus Senn (Fotograf)
H. Jordi, R. Lässig (WSL)
Lukas Lehmann (KEY)

Bezug

BUWAL
Dokumentation
CH-3003 Bern
Fax +41 (0) 31 324 02 16
docu@buwal.admin.ch
www.buwalshop.ch

Bestellnummer / Preis:

UM-184-D / CHF 20.– (inkl. MWSt)

© BUWAL 2005

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5		
Avant-propos	7		
Zusammenfassung	9		
Résumé	18		
1 Ausgangslage und Auftrag	27		
2 Einfluss verschiedener Faktoren auf Art und Ausmass der Sturmschäden	29		
2.1 Windcharakteristik und Sturmschäden im Raum Reusstal-Limmattal	29	2.6 Einfluss des letzten Eingriffs auf die Sturmschäden	82
2.1.1 Variation des Windfeldes und Schäden	29	2.6.1 Erkenntnisse aus der Studie im Reusstal-Limmattal	82
2.1.2 Bestandesaufbau	30	2.6.2 Erkenntnisse aus dem Plenterwald	83
2.1.3 Präventive Massnahmen	32	2.7 Einfluss benachbarter Waldteile	85
2.1.4 Muster der Bestandesauflösung erkennbar (Massnahmen)	33	2.7.1 Einfluss des Waldrandes	85
2.1.5 Baumart	36	2.7.2 Einfluss des Bestandesschutzes	87
2.2 Erfassung der Bestandesdaten und Schäden auf dem repräsentativen 4x4-km Sanasilva-Netz	39	2.8 Erklären Holzqualität und Baumernährung das Bruch- und Wurfrisiko der Fichte bei extremen Sturmereignissen?	88
2.2.1 Zielsetzung	39	2.8.1 Ziele und Methoden	88
2.2.2 Methodik	39	2.8.2 Resultate	90
2.2.3 Ergebnisse	40		
2.2.4 Fichten und Tannen mehr als doppelt so häufig geschädigt wie Laubhölzer	46	3 Einfluss verschiedener Faktoren auf die Entwicklung der Wiederbewaldung	95
2.2.5 Multi-variate Auswertung	47	3.1 Bestand vor dem Sturm	95
2.2.6 Schlussfolgerungen	50	3.2 Bodenverdichtung	97
2.3 Sturmschäden in Abhängigkeit vom Bestandesaufbau in einem Plenterwaldgebiet	51	3.2.1 Folgerungen für Massnahmen im Hinblick auf eine zukünftige Sturmschadenbewältigung	97
2.3.1 Einfluss des Bestandes	51	3.2.2 Synthesebericht	98
2.3.2 Einfluss der Baumarten	57	3.2.3 Ausgewählte Resultate	98
2.4 Wie wirken sich Fäulebefall an Stamm- und Wurzeln auf die Sturmempfindlichkeit aus und welche Erreger sind beteiligt?	60	3.2.4 Folgerungen	104
2.4.1 Problemstellung	60	3.3 Regenerationsfähigkeit von Bodenschäden im Wald	107
2.4.2 Methodik	60	3.3.1 Rahmenbedingungen	107
2.4.3 Resultate	62	3.3.2 Folgerungen für Massnahmen im Hinblick auf eine zukünftige Sturmschadenbewältigung	107
2.4.4 Schlussfolgerungen	65	3.3.3 Synthesebericht zum festgehaltenen Ausgangszustand	108
2.5 Standorteinflüsse	66	3.4 Entscheidungshilfen zum Schutz des Bodens bei Räumungsarbeiten nach Flächenschäden	110
2.5.1 Standorteinfluss in der Studie im Reusstal-Limmattal	66	3.4.1 Erkenntnisse aus den Untersuchungen auf Lothar Reservatsflächen	110
2.5.2 Standorteinfluss im Plenterwald	67	3.4.2 Folgerungen	111
2.5.3 Bodenversauerung, Wurzelsystem und Sturmschaden	69	3.5 Einfluss von Bodeneigenschaften auf die Wiederbewaldung	113
2.5.4 Einfluss der Bodenchemie auf Wurzelsystem und Sturmschäden	78	3.5.1 Bodenphysikalische Eigenschaften	113
		3.5.2 Bodenchemismus	117
		3.5.3 Bodenbiologie	120
		3.6 Bewertung der Erfolgsaussichten	122
		3.6.1 Wichtige Faktoren für die Wiederbewaldung und Parametrisierungsgrundlagen	122
		3.6.2 Ausblick	131

4	Folgerungen für vorsorgliche Risikominderung und erfolgreiche Wiederbewaldung	133
4.1	Entwicklung von externen Risikofaktoren	133
4.1.1	Entwicklung von risikobehafteten Klimaereignissen	134
4.1.2	Sturmtätigkeit	135
4.1.3	Wärme und Trockenheit	135
4.1.4	Wasserhaushalt	135
4.1.5	Entwicklung der Schadstoffeinflüsse auf den Wald	136
4.2	Empfehlungen	139
4.2.1	Waldbau – Verjüngung und Waldpflege	139
4.2.2	Bodenschutz – Holzernte und Räumungsarbeiten	141
4.2.3	Umweltpolitik – anthropogene Einträge	141
4.2.4	Umsetzung – Schulung	142
5	Perspectives	143
6	Projekte im Teilprogramm 6	145

Abstracts

E

Keywords:

Lothar, hurricanes,
forest damage,
hazards, causes,
operating damage, soil,
wood, silviculture,
rehabilitation,
prevention, forecasting

This publication presents the main findings of eleven research studies carried out on the causes of forest damage and the development of the hazard arising from hurricanes. The studies were carried out as part of a research programme launched in the aftermath of hurricane Lothar. Each project focuses on a specific issue associated with windthrow and uses a different methodology. A synthesis process implemented in the course of the research facilitated the exchange of information between the researchers. It also provided an opportunity for dialogue which made it possible to respond through the findings to the questions raised which are of interest in the context of forestry practice.

D

Stichwörter:

Lothar, Sturm,
Waldschäden, Risiko,
Ursachen,
Räumungsschäden,
Boden, Holz, Waldbau,
Wiederbewaldung,
Prävention, Vorhersage

Dieser Bericht stellt die wichtigsten Resultate von elf Forschungsprojekten vor, die im Rahmen des Lothar Grundlagenprogramms in die Wege geleitet wurden und sich mit den Ursachen der Waldschäden und der Risikoentwicklung durch Sturmergebnisse beschäftigten. Jedes Projekt konzentrierte sich auf einen spezifischen Aspekt in Zusammenhang mit dem Sturmholz und bediente sich einer je eigenen Methode. Ein Syntheseprozess, der während der Projekte stattfand, führte zu einem Dialog unter den Forschenden. Dieser Austausch ermöglichte es, gestützt auf die Forschungsergebnisse offene Fragen aus der Forstpraxis zu beantworten. Diese Fragen werden in der Zusammenfassung vorgestellt.

F

Mots-clés:

Lothar, ouragans,
dégâts forestiers,
risques, causes, dégâts
d'exploitation, sols,
bois, sylviculture,
reconstitution,
prévention, prévision

Cet ouvrage présente les résultats principaux de 11 travaux de recherche sur les causes des dégâts forestiers et le développement du risque engendré par les ouragans dans le cadre d'un programme de recherche lancé suite à lothar. Chaque projet est centré sur un aspect bien précis lié aux chablis et fait appel une méthode propre. Un processus de synthèse mené pendant les travaux a permis un échange entre les chercheurs, un dialogue qui a permis de répondre au travers des résultats respectifs à des questions intéressant la pratique forestière, lesquelles font l'objet du résumé.

I

Parole chiave:

Lothar, tempesta, danni
forestali, rischio, cause,
danni causati dallo
sgombero, suolo,
legname, selvicoltura,
ripristino, prevenzione,
previsione

Il rapporto illustra i risultati più importanti emersi da undici progetti di ricerca avviati nell'ambito del programma di ricerca sulla tempesta Lothar, i quali hanno esaminato le cause dei danni forestali e l'evoluzione dei rischi generati dalle tempeste. Ogni progetto si è concentrato su un aspetto specifico relativo al legname da tempesta e ha applicato un suo metodo. Un processo di sintesi, elaborato nel corso di tali progetti, ha favorito il dialogo tra i ricercatori coinvolti. Questo scambio ha permesso, sulla base dei risultati ottenuti, di rispondere ad alcune domande sollevate dalla pratica forestale, le quali sono presentate nel riassunto.

Avant-propos

À l'occasion des dernières décennies, les dégâts dus aux ouragans ont représenté un facteur dominant de la gestion forestière. Les questions relatives aux causalités et au développement du risque sont de première importance pour améliorer la gestion des dégâts. Dans le cadre du programme de recherche et d'évaluation Lothar, 11 projets ont été lancés en 2000 dans un programme partiel qui devait cerner cette problématique.

Suite à quatre ans de recherche, les résultats définitifs ou préliminaires sont présentés ici sous forme de synthèse. Elle permet de tirer des connaissances directement applicables par le praticien ainsi que celles en mesure de modifier la compréhension des dégâts dus aux ouragans et donner une nouvelle perspective à la manière de gérer ces événements. Elle vient en complément à la synthèse générale du programme Lothar qui est centrée sur la gestion politique de la crise forestière Lothar. Elle s'adresse en premier lieu aux praticiens forestiers.

Les connaissances acquises nous livrent la clé d'une gestion plus rationnelle des dégâts forestiers qui pourrait se résumer succinctement par la maxime suivante: mieux vaut prévenir que guérir. Le développement des forêts est un cycle de longue haleine et il importe d'intervenir le plus judicieusement possible en respectant les étapes naturelles. Même si le sylviculteur n'est pas en mesure de dicter le climat ni de contrer les effets des polluants sur les sols et l'état sanitaire des peuplements, il peut influencer positivement la structure et la composition des peuplements. Et ainsi minimiser l'effet des ouragans.

Par cette contribution à la connaissance des causes des dégâts forestiers et du développement des risques, nous souhaitons apporter à la pratique de la gestion forestière et à la politique forestière des informations utiles et espérons que les recommandations émises dans cette synthèse constitueront une bonne base pour le développement futur des forêts suisses.

Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage

Werner Schärer
Directeur des forêts

Zusammenfassung

Ausgangslage, Auftrag

Das Verständnis von Sturmereignissen, ihre Charakteristik und ihre Auswirkungen auf den Wald sowie die Kenntnis der Risikofaktoren, die Art und Ausmass der Sturmschäden beeinflussen, sind Voraussetzung dafür, dass mit solchen Ereignissen angemessen umgegangen werden kann und dass eine Strategie entwickelt und vorbeugende Massnahmen ergriffen werden können, um die Schäden und ihre Folgen in Zukunft geringer zu halten. Der Sturm Lothar und seine Auswirkungen, im Ausmass zweieinhalbmal stärker als Vivian, waren so gesehen auch ein **einmaliges Beobachtungs- und Studienobjekt**, das es zu nutzen und mit den Erfahrungen von Vivian zu kombinieren galt.

Diese Ausgangslage bewog die Eidgenössische Forstdirektion (F+D/BUWAL), das **Lothar Grundlagenprogramm 2000–2003** zu starten mit dem Ziel, den Umgang mit zukünftigen Sturmereignissen und ihren Folgen auf politischer, ökonomischer, sozialer und ökologischer Ebene zu verbessern. Das **Teilprogramm 6, Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung**, befasste sich dabei mit den naturwissenschaftlichen Fragestellungen und Bewertungen. Drei Fragenkomplexe standen dabei im Vordergrund:

- Welches sind die prädisponierenden und auslösenden Faktoren, die Art und Ausmass der Sturmschäden beeinflussen?
- Welche Faktoren wirken sich auf das Potenzial für die Wiederbewaldung der Sturmflächen aus?
- Welche dieser Faktoren können im Sinne der Vorsorge so beeinflusst werden, dass sich die Sturmresistenz der Wälder erhöhen lässt und dass sich das Potenzial für eine weitgehend natürliche Wiederbewaldung verbessert?

Einfluss verschiedener Faktoren auf Art und Ausmass der Sturmschäden

Die Untersuchungen zeigen, dass die Empfindlichkeit gegenüber Sturmereignissen deutlich durch die Baumart, die Baumartenmischung und die Struktur eines Bestandes, gesamthaft also durch den Bestandesaufbau, beeinflusst wird.

Baumarten

Bei der Einzelbetrachtung der **Baumarten** stellt sich heraus, dass reine Nadelholzbestände viel häufiger geschädigt werden als reine Laubholzbestände. Dabei ist in gleichförmigen Beständen die Fichte nur unwesentlich empfindlicher als die Weiss-tanne, aber beide sind deutlich empfindlicher (etwa Faktor 2,5) als die Buche. Im Plenterwald hingegen wurde festgestellt, dass die Fichte empfindlicher ist als die Weiss-tanne und dass Buchen in der Oberschicht bei Lothar kaum geschädigt worden sind. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass Lothar ein Wintersturm war, die Laubbäume also im kahlen, das heisst in einem dem Wind weniger Widerstand entgegen setzenden Zustand traf.

Baumartenmischung	Eine überproportional wichtige Rolle spielt die Baumartenmischung eines Bestandes. So wurde festgestellt, dass bereits eine Beimischung von 10–20% Buchen in der Oberschicht in einem Nadelholzbestand die Empfindlichkeit gegenüber Sturmereignissen erheblich senkt. Fichtenreinbestände weisen demnach ein signifikant höheres Sturmschadenrisiko auf, als gemischte Bestände.
Bestandesstruktur	In Beständen mit stufiger oder ungleichförmiger Bestandesstruktur sind die Sturmschäden geringer als in einschichtigen oder mehrschichtigen Beständen. Diese Erkenntnis wird gestützt durch ein Fallbeispiel in einem Plenterwaldgebiet, wo sowohl die Plenterbestände wie auch die Überführungsbestände weniger Sturmschäden aufweisen als die einschichtigen Bestände im gleichen Gebiet.
Oberhöhe	Nicht unerwartet ist die Erkenntnis, dass das Schadenausmass mit der Oberhöhe der Bestände, das heisst indirekt mit ihrem Alter und der Entwicklungsstufe, zunimmt. Während in jungen Beständen mit Oberhöhen bis etwa 20 m kaum Schäden auftraten, nahmen diese bei Oberhöhen im Bereich von 20–35 m deutlich zu. Bei Oberhöhen von über 35 m sind kaum mehr Unterschiede festzustellen. Zusätzlich beeinflusst die Höhe des in Windrichtung vorgelagerten Nachbarbestandes das Ausmass der Sturmschäden. Ein höherer Nachbarbestand verringert die Sturmempfindlichkeit, ein tieferer erhöht sie. Gering ist hingegen die Bedeutung des Schlankheitsgrades (H:D), selbst wenn er nur auf die Gerüstbäume eines Bestandes bezogen wird. Zur Vermutung, dass Durchforstungseingriffe die Bestandesstabilität beeinflussen, konnte in Lotharuntersuchungen festgestellt werden, dass Eingriffe in den letzten 5 Jahren vor dem Sturm, die Empfindlichkeit der Bestände erhöhen. Die Fallstudie im Plenterwald zeigte zudem, dass auch in Flächen, in denen lange nicht mehr eingegriffen worden ist, eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Sturmschäden besteht. Allerdings ist die Wirkung eines einzelnen Eingriffes auch abhängig von dessen Stärke, von der Gleichmässigkeit der Intervention und von der gesamten Durchforstungsgeschichte eines Bestandes, die die langfristige Stabilitätsentwicklung und damit auch die Wirkung des letzten Eingriffes vor dem Sturm mitbeeinflusst. Diese Aspekte konnten in den Untersuchungen jedoch nicht berücksichtigt werden, was auch der Grund sein mag, warum der Zusammenhang zwischen Durchforstungseingriff und Sturmschaden nicht in allen Studien erkennbar ist. Hingegen gibt es Hinweise darauf, dass das unregelmässiges Öffnen von Beständen (Lücken, Säume) die Sturmempfindlichkeit erhöht.
benachbarter Bestand	
Schlankheitsgrad Durchforstung	
Öffnungen	
Baumeigenschaften	Die Baumform scheint im Vergleich zu anderen Einflussgrössen wie Baumart, Baumartenmischung und Bestandesstruktur eine geringere Rolle zu spielen. Andere Baumeigenschaften weisen aber sehr wohl einen Zusammenhang mit der Sturmempfindlichkeit auf. So konnte bei Fichte festgestellt werden, dass Bäume mit erhöhtem Stickstoffgehalt, geringerer Stärkeanreicherung und breiteren Jahrringen ein deutlich erhöhtes Risiko für Stammbruch aufweisen. Geworfene Bäumen unterscheiden sich in dieser Hinsicht nicht von intakt gebliebenen. Obschon die Ursachenkette noch nicht belegt werden kann, liegt die Vermutung nahe, dass die in jüngster Zeit festgestellte Stimulierung des Baumwachstums durch Stickstoff-Depositionen aus der Luft das Risiko von Stammbrüchen bei Sturm erhöht. Weiter

zeigte ein Vergleich des Fäulebefalls zwischen geschädigten und nicht geschädigten Fichten, dass Fäulen die Sturmempfindlichkeit erhöhen. Die von Lothar geworfenen und gebrochenen Bäume waren grundsätzlich fauler als benachbarte stehen gebliebene Bäume. Mit Abstand am höchsten ist der Fäulebefall bei Bäumen mit Stockbrüchen (Bruchstelle tiefer als 0,5m).

Bodeneigenschaften

Es ist anzunehmen, dass verschiedene **Bodeneigenschaften** als prädisponierende Faktoren bei Sturmschäden wirken. Allerdings sind solche Nachweise nicht einfach zu erbringen, weil der Bodenzustand an einem bestimmten Standort keine Konstante ist sondern sich dauernd verändert. Am offensichtlichsten ist diese Tatsache bei der Wassersättigung des Bodens, die sich unter den täglichen Wettereinflüssen relativ kurzfristig ändert. Weniger offensichtlich sind die Veränderungen bei der Versauerung des Bodens, die in längeren Zeiträumen abläuft. Für die Auswirkungen eines Sturmes ist deshalb der aktuelle Bodenzustand zur Zeit des Ereignisses wie auch seine Entwicklung in der Vergangenheit von Bedeutung. Zur Zeit des Sturmes Lothar war der Wassersättigungsgrad in den Böden sehr hoch und damit die Verankerung der Bäume im Boden geschwächt.

Die Untersuchungen zeigen nun, dass bei Lothar auf nassen Standorten häufiger Schäden auftraten als anderswo. Dasselbe gilt für die sauren Standorte, wobei zwischen dem Säurezustand des Bodens und den Sturmschäden ein sehr enger Zusammenhang besteht. Das häufigere Auftreten von Sturmschäden auf Standorten mit Rohhumusauflage bestätigt diese Feststellung. Hingegen ergaben sich aus der Untersuchung der Wurzelballen keine Hinweise darauf, dass deren Dimensionen wesentlich vom Bodenchemismus im Wurzelraum abhängen. Die Fallstudie im Plenterwald zeigt auf, dass die sauren und die vernässten Standorte stärker als die mittleren und die reichen, frischen Standorte vom Sturm betroffen wurden. Zwischen der Gründigkeit des Bodens und den Sturmschäden wurde kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt.

topografische Lage

Die Auswertung der Sturmschäden von Lothar je nach **topografischer Lage** der Waldbestände ergibt kein einheitliches Bild. Es scheint, dass Bestände auf Kuppen, in leicht geneigtem Gelände und in ebenen Lagen am stärksten betroffen waren. Mit zunehmender Hangneigung nahmen die Sturmschäden ab. Im Gegensatz zu Vivian spielte die Hangrichtung (Luv oder Lee) jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Diese Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass bei Lothar weniger die topografische Lage als vielmehr die Windstärken und vor allem die Böigkeit bzw. die Turbulenzen für Art und Ausmass der Sturmschäden von Bedeutung sind.

Stickstoffeinträge Versauerung Nährstoffhaushalt Baumwachstum

Aus vielen Untersuchungen ist bekannt, dass sich die **Stickstoffeinträge** auf die Standorteigenschaften auswirken. Sie fördern die Versauerung und verändern den Nährstoffhaushalt. Damit wirken sie sich über den Boden auch auf die Baumeigenschaften aus. Die durchgeführten Untersuchungen sind nicht darauf angelegt einen direkten Zusammenhang zwischen dem atmosphärischen Stickstoffeintrag und dem Ausmass der Strumschäden nachzuweisen. Dazu ist der Wirkungspfad über die oberirdische Aufnahme durch die Bäume und über die Veränderung von Boden-

eigenschaften und Nährstoffhaushalt zu komplex. Immerhin konnte aber festgestellt werden, dass Fichten mit erhöhtem Stickstoffgehalt und stärkerem Radialwachstum (und damit geringerer Stärkeanreicherung im Gewebe) ein deutlich erhöhtes Stammbruchrisiko aufweisen. Ebenso nimmt der Anteil geworfener Buchen mit Zunahme des Stickstoffgehaltes im Buchenlaub zu.

Versauerung, stimuliertes **Baumwachstum** und gestörtes **Nährstoffgleichgewicht** sind für Sturmschäden als Risikofaktoren einzustufen. Alle drei Phänomene werden nach den heutigen Erkenntnissen in enge Verbindung mit den hohen atmosphärischen Stickstoffdepositionen gebracht.

Zusammenfassende Wertung

Nicht alle untersuchten Faktoren wirken sich gleichermassen auf die Sturmempfindlichkeit von Bäumen und Beständen und damit auf Art und Ausmass der Sturmschäden aus. Auch wenn sich die Ergebnisse der Untersuchungen auf das Sturmereignis «Lothar» beziehen und deshalb nicht ohne weiteres verallgemeinert werden können, lässt sich die Bedeutung einzelner Faktoren für die Sturmempfindlichkeit doch grob abstufen:

- Die grösste Bedeutung unter den Risikofaktoren für die Sturmempfindlichkeit kommt der Baumartenmischung, der Baumart, der Bestandeshöhe, den Höhenunterschieden zwischen Beständen und dem Säurezustand des Bodens zu.
- Mittlere Bedeutung kann dem Wasserhaushalt des Bodens, der Bestandesstruktur, der Waldbehandlung vor dem Sturm (letzter Eingriff) sowie der Wachstumsgeschwindigkeit, dem Ernährungszustand und dem Fäulebefall der Bäume zugeordnet werden.
- Von eher untergeordneter Bedeutung für die Sturmempfindlichkeit sind dagegen die Baumform und die topografische Lage eines Bestandes.

Einfluss verschiedener Faktoren auf die Wiederbewaldung

Bestand und Behandlung Schadenfläche

Die Eigenschaften eines Bestandes vor dem Sturm beeinflussen den Zustand einer Fläche nach dem Sturm und damit das Potenzial für die Wiederbewaldung. Beobachtungen der Fallstudie im Plenterwaldgebiet zeigen, dass in plenterartigen Beständen nach Streuschäden in der Grössenordnung von 30–40% des Bestandesvolumens oft kaum nennenswerte negative Veränderungen der Bestandesstruktur entstehen. Selbst nach totaler Räumung von Flächenschäden bleiben viele differenzierte Jungwuchsgruppen und einzelne Bäume der Mittel- und Unterschicht auf der Sturmfläche stehen. Die **Reststrukturen** beeinflussen das Mikroklima und die Verjüngungsgunst, es sind bereits Jungwuchsgruppen und oft noch **Samenbäume** der standortgerechten Baumarten vorhanden und die Kontinuität in der Walderneuerung wird nicht so stark gestört. Diese gegenüber Sturmflächen in gleichförmigen Beständen günstigen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Wiederbewaldung sind

Reststrukturen

Samenbäume

vor allem in Wäldern mit besonderer Schutzfunktion, wo flächendeckend eine Dauerbestockung erforderlich ist, von grosser Bedeutung.

Räumungstechnik

Durch die **Behandlung** der Sturmschadenflächen werden Faktoren beeinflusst, die sich auf die Wiederbewaldung auswirken können. Dies betrifft neben dem Restbestand vor allem die Bodeneigenschaften auf der Sturmfläche. Die Untersuchungen auf Räumungsflächen haben gezeigt, dass je nach **Räumungstechnik** und Standort Bodenverdichtungen unterschiedlichen Ausmasses entstehen. Einen entscheidenden Einfluss spielt dabei der Wassersättigungsgrad des Bodens zur Zeit der Räumung. Neue Entscheidungshilfen sollen in Zukunft dem Praktiker helfen, im Einzelfall und situationsabhängig eine angemessene bodenschonende Räumungstechnik zu wählen oder auf eine Räumung zu verzichten.

Die Veränderungen im natürlich gelagerten Boden durch das Befahren mit Forstmaschinen sind oft tiefgreifend, langanhaltend und beeinträchtigen für das Pflanzenwachstum wichtige Bodenfunktionen. Geeignete Massnahmen können die natürliche Regeneration punktuell unterstützen. In Dauerbeobachtungsflächen werden solche Verfahren zur Verbesserung des Porensystems und zur Erhöhung der biologischen Aktivität geprüft.

Bodeneigenschaften

Bodenveränderungen

Die bei der Räumung von Sturmflächen eingesetzten Maschinen verursachen durch ihr Gewicht und dynamische Belastungsspitzen **Bodenveränderungen** nicht nur im Oberboden, sondern auch in grösseren Tiefen. Dabei bewirkt die erste Überfahrt auf einem natürlich gelagerten Boden die intensivsten Verformungen. Diese Verdichtungen führen zu einer Einschränkung des Porenvolumens und der Porenkontinuität und verringern so die Transportkapazität für Wasser und Luft im Boden. Neben den mechanischen Schäden an den Wurzeln im Oberboden werden damit die Lebensbedingungen für die **Wurzeln** auch in tieferen Bodenschichten durch Sauerstoffmangel und Staunässe verschlechtert, was sich negativ auf die Wurzelentwicklung auswirkt. Auch zeigen gepflanzte Bäume (Bergahorn, Eiche) auf verdichteten Stellen ein reduziertes Höhenwachstum.

Wurzeln

biologische Aktivität

Eine weitere Folge der Bodenverdichtungen ist die Beeinträchtigung der **biologischen Aktivität**. So wurde in verdichteten Flächen ein Trend zur Abnahme der horizontal und vertikal bohrenden Regenwürmern gegenüber nicht verdichteten Flächen festgestellt.

Bodenchemismus

Bei der Untersuchung des **Bodenchemismus** hat sich gezeigt, dass während der Dauer der Untersuchungen die Nitratkonzentration im Sickerwasser auf nicht geräumten Flächen deutlich höher war als auf geräumten Flächen oder in benachbarten, vom Sturm nicht betroffenen Beständen. In verdichteten Böden ist die Acidität wegen Sauerstoffmangels und der reduzierenden Verhältnisse geringer als in nicht verdichteten Flächen.

Bewertung der Erfolgsaussichten

Mit einem **integrativen Modellierungsansatz** werden Voraussagen angestrebt, wie lange die Wiederbewaldung auf Windwurf­flächen in Abhängigkeit von Standort­faktoren, Behandlungs­variante und Verbiss dauert. Wichtige für die Modellierung berücksichtigte Faktoren sind dabei «Samenverteilung», «Vegetationsentwicklung», «Keimung» und «Wachstum und Mortalität». Das daraus abgeleitete Entscheidungshilfeinstrument wird die Beurteilung von neuen Windwurf­flächen hinsichtlich ihres Potenzials für die natürliche Wiederbewaldung erlauben. Daraus wiederum kann abgeleitet werden, ob und welche unterstützenden oder lenkenden Massnahmen ergriffen werden müssen.

Folgerungen für vorsorgliche Risikominderung und erfolgreiche Wiederbewaldung

Entwicklung von externen Risikofaktoren

Klima Umweltbelastungen

Als externe Risikofaktoren für den Wald sind vor allem **klimatische Ereignisse** sowie **Umweltbelastungen** von Bedeutung. Die Klimarisiken dürften mit der Klimaerwärmung zunehmen, vor allem wenn damit vermehrt **Extremereignisse** wie Stürme und Dürre auftreten. Die Schadstoffbelastung wirkt sich dagegen eher schleichend aus. Für die zukünftigen Risiken sind deshalb auch die Massnahmen zur Luftreinhaltung auf nationaler und internationaler Ebene von Bedeutung.

Im Hinblick auf die Entwicklung risikobehafteter Klimaereignisse kann nach den heutigen Kenntnissen festgehalten werden:

- Über die Häufigkeit zukünftiger Sturmereignisse können keine gesicherten Aussagen gemacht werden.
- Die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein angreifender Wintersturm den Wald auf durchnässten Böden antrifft. Dies dürfte die Standfestigkeit der Bäume beeinträchtigen. Weil der Boden im Winter nur langsam abtrocknet sind dadurch auch die Bedingungen für einen Maschineneinsatz bei der Räumung von Sturmflächen ungünstig.
- Nach Sturmschäden ist wegen der Erwärmung die Wahrscheinlichkeit von günstigen Bedingungen für die Borkenkäfervermehrung erhöht.
- Diese Einflüsse lassen erwarten, dass im Falle eines Sturmereignisses das Ausmass der Schäden tendenziell erhöht wird.

Die Lotharuntersuchungen haben gezeigt, dass **Versauerung** und **Stickstoff** die Art und das Ausmass der Sturmschäden beeinflussen und als Risikofaktoren zu bezeichnen sind. Auch wenn der direkte Zusammenhang zu den anthropogenen Stoffeinträgen nicht belegt ist, ist doch unbestritten, dass diese einen Beitrag an die Versauerung der Böden und die Stickstoffübersorgung leisten. Kartierungen in den neunziger Jahren ergaben, dass die **kritische Belastung** für Versauerung, Stickstoffeintrag und Ozon auf weiten Teilen der schweizerischen Waldfläche überschritten sind. Die **Massnahmen zur Luftreinhaltung**, die in den achtziger Jahren ergriffen wurden, konnten den ansteigenden Trend zwar brechen. Eine rasche

kritische Belastung

Luftreinhaltung

Verbesserung der Risikofaktoren Versauerung und Stickstoffeintrag und damit eine Erholung der Waldböden ist aber trotz laufender Anstrengungen nicht zu erwarten.

Empfehlungen

Die aus den Projektergebnissen abgeleiteten Empfehlungen beziehen sich hauptsächlich auf **Waldbau, Bodenschutz, Umweltpolitik und die Umsetzung für die Praxis**. Während beim Waldbau und Bodenschutz die Waldbesitzer und -bewirtschafter unmittelbar Einfluss nehmen können, sind bei der Umweltpolitik und Umsetzung die Politiker, Behörden, Verbände und Ausbildungsstätten zum Handeln aufgerufen.

waldbauliche Planung	Der deutliche Zusammenhang zwischen Baumartenmischung, Baumart und Bestandeshöhe und der Sturmempfindlichkeit zeigt, dass der waldbaulichen Planung und Arbeit eine hohe Bedeutung zukommt. Die Hauptentscheide fallen dabei in der Verjüngungs- und Jungwaldphase. Differenzierte Verjüngungsverfahren und frühzeitige Mischungsregulierung sollen darauf ausgerichtet sein, die standortgerechten Baumarten in ihrem ganzen Spektrum zu begünstigen, einen minimalen Laubholzanteil sicher zu stellen und stufige Strukturen zu fördern. Standortfremde, reine Fichtenbestände sind zu vermeiden. Schon geringe Anteile (>10% in der Oberschicht) von Laubbäumen oder standortverträglichen, stabilen Gastbaumarten wie Douglasie oder Lärche, vermögen die Sturmempfindlichkeit erheblich zu senken. Erstdurchforstungen sollen früh und stark sein und dann mit regelmässigen und schwächeren Durchforstungen fortgesetzt werden. Wo es die standörtlichen Voraussetzungen erlauben sind stufige oder plenterartige Bestände eine gute Wahl zur Verminderung der Sturmempfindlichkeit. Hohe Priorität hat die Verjüngung bzw. Umwandlung von alten gleichförmigen und vorratsreichen Beständen mit hohem Nadelholzanteil, die besonders sturmgefährdet sind. Besondere waldbauliche Sorgfalt ist auf den sauren und den nassen Standorten angebracht.
Verjüngung	
Mischungsregulierung	
Durchforstung	
Umwandlung	
Wiederbewaldung	Die waldbaulichen Massnahmen zur Verminderung der Sturmempfindlichkeit wirken sich auch positiv auf die Ausgangslage für die Wiederbewaldung nach einem Sturm aus. Die standortgerechte Baumartenwahl erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass nach einem Sturm auf der Sturmfläche oder in deren Umgebung geeignete Samenbäume für die Wiederbewaldung vorhanden sind. Bei strukturreichen Mischbeständen, wo auf einem grossen Teil der Fläche Verjüngungsprozesse laufen, sind nach einem Sturmereignis auf der Sturmfläche oft bereits differenzierte Verjüngungsansätze vorhanden.
Samenbäume	
Verjüngungsansätze	
Bodenschonung	Wichtigste Vorsorgemassnahme bei der Räumung von Sturmflächen ist die Vermeidung von Bodenverdichtungen . Ein flächiges Befahren muss vermieden werden. Der sorgfältigen Planung einer Räumung, inkl. der Möglichkeit auf eine Räumung zu verzichten, kommt deshalb grosse Bedeutung zu. Dabei müssen die Empfindlichkeit der Standorte, der Wassersättigungsgrad des Bodens, die Wahl der geeignetsten Mittel und mögliche Massnahmen zur Verminderung von Bodenschäden in die Entscheidungsfindung einbezogen werden. Eine neue Entscheidungshilfe

Entscheidungshilfe	wird es dem Praktiker erlauben, bei der Einzelfläche Möglichkeiten und Risiken einer Räumung abzuschätzen und sich so für ein möglichst schonendes Vorgehen oder den Verzicht auf eine Räumung zu entscheiden. Bei bereits beeinträchtigten Böden können geeignete Massnahmen wie das Pflanzen von Baumarten mit intensivem Durchwurzelungspotenzial oder die Förderung der biologischen Aktivität punktuell die natürlichen Regenerationsprozesse unterstützen.
Regeneration	
Reduktion der Schadstoffeinträge	Als Risikofaktor für die Sturmempfindlichkeit hat sich die Stickstoffübersorgung der Bäume und der Säurezustand des Bodens erwiesen. Auch wenn in den ursächlichen Beziehungen zwischen diesen Faktoren und dem Stickstoffeintrag bzw. dem Eintrag versauernder Stoffe noch viele Fragen offen sind, muss aus dieser Sicht die Forderung nach weiterer Reduktion der atmosphärischen Stickstoff-Depositionen und versauernder Einträge unterstützt werden.
Umsetzung	Ein Überblick über die Empfehlungen zeigt, dass deren Umsetzung viel Fachwissen und Knowhow bei vielen Akteuren voraussetzt. Spezifische und stufenübergreifende Aus- und Weiterbildungsangebote in den Bereichen Waldbau, Holzernte und Bodenschutz sollen die Empfehlungen und Hilfsmittel einführen und dafür sorgen, dass die gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis sinnvoll und effizient umgesetzt werden. Dabei muss besonderes Gewicht auf die Belange der Risikobewertung, der Vorsorge und der sorgfältigen Massnahmenplanung, gelegt werden.
Ausblick	
Die Ergebnisse aus dem Teilprogramm 6 beziehen sich auf die Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Lebensgemeinschaft Wald und ihrer Widerstandskraft gegenüber Sturmereignissen. Die Frage, auf die im Rahmen der Synthese dieser Ergebnisse Antworten gesucht wurden, kann in vereinfachender Weise so formuliert werden: welche Empfehlungen können aus den gewonnenen Erkenntnissen abgeleitet werden, die dem Waldbauer und Bewirtschafter helfen, den Wald gegenüber Sturmereignissen zu stärken und seine Verjüngungskraft nach Sturmereignissen zu verbessern?	
naturnaher Waldbau	Als zentral kann die Rolle des Waldbaus bezeichnet werden, wobei viele seit langem bekannte Erkenntnisse in neuem Zusammenhang bestätigt werden. Ein auf den Standort abgestimmter naturnaher Waldbau ist die beste Vorsorge gegen Waldschäden, welchen Ursprungs sie auch immer sind. Dies dürfte mit der Erwärmung des Klimas eine zunehmende Herausforderung werden. Allerdings sind waldbauliche Massnahmen in der Regel erst langfristig wirksam und die entscheidenden Weichenstellungen müssen in der Verjüngungs- und Jungwaldphase fallen. Zudem ist ihre Wirkung insofern beschränkt, als einem sehr starken Orkan auch ein Wald in bestem Zustand nicht mehr Stand halten kann.
Standort und Baumartenwahl	Eine sorgfältig auf den Standort abgestimmte Baumartenwahl, die Förderung von Laubholz und stabilen Nadelhölzern, die Vermeidung von standortfremden reinen Fichtenbeständen sowie früh einsetzende Durchforstungen erhöhen die Stabilität

der Wälder nicht nur gegen Windeinflüsse. Durch die Senkung des **Produktionsrisikos** werden auch die wirtschaftlichen Risiken der Holzproduktion langfristig vermindert. Walderhaltung und Holzproduktion können mit derselben Strategie nachhaltig betrieben werden.

Boden

Weitgehend ausserhalb des Einflussbereiches des Waldbauers wirken die Treibhausgase mit der **Erwärmung des Klimas** und vor allem die atmosphärischen **Stickstoffeinträge** auf den Wald. Der **Boden** bildet die Schnittstelle zwischen diesen Stoffeinträgen und dem Wald. Die zunehmende Versauerung der Böden wirkt sich auf die Physiologie und den Ernährungszustand der Bäume und damit auf ihre Stabilität aus. Der enge Zusammenhang zwischen dem Säurezustand des Bodens und den Sturmschäden ist ein deutliches Zeichen dafür, auch wenn die Forschung dieses komplexe Beziehungsnetz noch hat nicht in allen Einzelheiten erklären kann.

Forschung Vorsorge

Grosse **Forschungsanstrengungen** sind noch nötig, das Wissen um die Zusammenhänge zwischen den anthropogenen Emissionen und der Klimaveränderung einerseits sowie zwischen der Klimaveränderung, den Immissionen und der Lebensgemeinschaft Wald andererseits zu verbessern. Nur die Kenntnis dieser Zusammenhänge und ihre klare Kommunikation werden es ermöglichen, von einer Strategie der Schadenbehebung zu einer nachhaltigen **Strategie der Vorsorge** zu kommen.

Résumé

Situation initiale, mandat

La compréhension des tempêtes, leurs caractéristiques et leurs répercussions sur la forêt, et la connaissance des facteurs de risque qui influencent la nature et l'étendue des dégâts sont des conditions préalables pour pouvoir gérer de façon adéquate ces événements, développer une stratégie et prendre des mesures préventives afin de limiter les dégâts et leurs conséquences à l'avenir. A cet égard, l'ouragan Lothar, dont les effets ont été deux fois et demie plus dévastateurs que ceux de Vivian, a constitué un **objet d'observation et d'étude exceptionnel** dont il fallait tirer profit en complément des expériences acquises avec Vivian.

C'est ce qui a incité la Direction fédérale des forêts (D+F/OFEFP) à lancer le **Programme de recherche et d'évaluation Lothar 2000–2003**. Son objectif est d'améliorer la gestion des prochaines tempêtes et de leur impact au niveau politique, économique, social et écologique. Le **Programme partiel 6, Risques et causalités**, a porté sur l'analyse et l'évaluation de l'événement sous l'angle des sciences naturelles, en abordant trois questions essentielles :

- Quels sont les facteurs de prédisposition et les facteurs déclenchants qui influencent la nature et l'étendue des dégâts ?
- Quels facteurs déterminent le potentiel de reboisement des surfaces touchées par Lothar ?
- Sur quels facteurs peut-on intervenir à titre préventif pour augmenter la résistance des forêts et faciliter un reboisement le plus naturel possible ?

Influence de différents facteurs sur la nature et l'étendue des dégâts dus à une tempête

Les recherches ont révélé une influence marquée des essences, des mélanges d'essences et de la structure des peuplements en général sur la sensibilité aux tempêtes.

essences

L'observation individuelle des **essences** montre que les dégâts sont beaucoup plus fréquents dans les peuplements purs de résineux que dans les peuplements purs de feuillus. En peuplements réguliers, l'épicéa n'est pas beaucoup plus sensible que le sapin blanc, mais tous deux sont nettement plus sensibles que le hêtre (facteur de 2,5 environ). En revanche, dans les forêts jardinées, on a constaté d'une part que l'épicéa était plus sensible que le sapin blanc, d'autre part que les hêtres de l'étage dominant n'avaient pratiquement pas été atteints par Lothar. Mais pour interpréter ces résultats, il faut tenir compte du fait que Lothar était une tempête hivernale, et donc que les feuillus étaient dénudés et offraient moins de résistance au vent.

mélange des essences

Le **mélange des essences** joue un rôle beaucoup plus important. On a constaté que la présence de 10 à 20% de hêtre dans l'étage dominant d'un peuplement de résineux réduisait déjà considérablement la sensibilité aux tempêtes. Le risque de dégâts dus à une tempête est par conséquent significativement plus élevé dans des peuplements purs d'épicéa que dans des peuplements mélangés.

structure des peuplements	Les dégâts dus à la tempête sont moins importants dans les peuplements présentant une structure étagée ou irrégulière que dans les peuplements à un ou plusieurs étages. Ce constat est confirmé par des observations menées dans une région de forêt jardinée, où les peuplements jardinés et de conversion ont subi moins de dégâts que les peuplements à un étage situés dans la même région.
hauteur dominante	Comme on pouvait s’y attendre, les dégâts augmentent avec la hauteur dominante des peuplement, et donc indirectement avec l’âge et le stade de développement de ces derniers. Les jeunes peuplements d’une hauteur dominante de 20 m environ ne sont pratiquement pas touchés ; les dégâts augmentent considérablement lorsque les hauteurs dominantes sont comprises entre 20 et 35 m ; au-delà de 35 m, on ne constate pratiquement plus de différence. La hauteur du peuplement voisin face au vent influence également l’étendue des dégâts. Si elle est élevée, la sensibilité aux tempêtes diminue et inversement. En revanche, le coefficient d’élancement (rapport hauteur/diamètre) n'a pas beaucoup d'importance, même si on ne tient compte que des arbres les plus stables d'un peuplement. Quant à une influence éventuelle des éclaircies sur la stabilité, les recherches sur Lothar ont montré que les interventions effectuées au cours des cinq dernières années précédant la tempête augmentent la sensibilité des peuplements. L'étude de cas sur la forêt jardinée a également révélé une sensibilité accrue dans des surfaces n'ayant pas subi d'intervention depuis longtemps. Cela étant, l'influence d'une intervention dépend aussi de son intensité, de sa régularité ainsi que de toutes les éclaircies antérieures, car celles-ci déterminent l'évolution de la stabilité à long terme et donc l'effet de la dernière intervention avant la tempête. Ces aspects n'ont toutefois pas pu être pris en considération dans ces recherches, ce qui explique peut-être pourquoi on n'a pas pu mettre en évidence dans toutes les études une corrélation entre éclaircies et dégâts dus à une tempête. En revanche, des indices tendent à démontrer que les ouvertures irrégulières dans les peuplements (clairières, lisières) augmentent la sensibilité aux tempêtes.
peuplement voisin	
coefficient d’élancement	
éclaircies	
ouvertures	
caractéristiques des arbres	La forme de l'arbre ne semble jouer qu'un rôle secondaire par rapport à des facteurs comme l'essence, le mélange des essences et la structure des peuplements. En revanche, il existe des corrélations évidentes entre d'autres caractéristiques des arbres et la sensibilité aux tempêtes. Ainsi, on a constaté chez l'épicéa que les risques de cassure du tronc étaient sensiblement plus élevés chez les arbres présentant une concentration élevée d'azote, une plus faible accumulation d'amidon et de larges cernes annuels. Aucune corrélation de ce genre n'a pas pu être mise en évidence en ce qui concerne les arbres versés. Bien que la chaîne de causalité n'ait pas encore pu être établie avec certitude, il est probable que la stimulation de la croissance des arbres par les dépôts d'azote atmosphérique observée depuis peu augmente les risques de cassure du tronc lors de tempêtes. Par ailleurs, une comparaison des attaques de pourriture entre des épicéas endommagés et intacts a montré que la pourriture augmentait la sensibilité aux tempêtes. Les arbres abattus et cassés par Lothar étaient en général plus attaqués que les arbres voisins restés sur pied. Ce sont les arbres cassés au niveau de la souche (hauteur de la cassure inférieure à 0,5 m) qui présentaient de loin le plus de pourriture.

**caractéristiques
pédologiques**

Il est probable que certaines **caractéristiques pédologiques** accroissent les risques de dégâts lors de tempêtes. Il est toutefois difficile d'en apporter la preuve, car l'état du sol dans une station donnée n'est pas constant, mais varie constamment. Cela apparaît de façon particulièrement évidente avec l'humidité du sol, qui change chaque jour assez rapidement sous l'influence des conditions météorologiques. L'évolution de l'acidité du sol est moins manifeste, car ce processus s'étend sur une longue période. L'état du sol au moment de l'événement et son évolution par le passé sont donc deux facteurs importants quant aux conséquences d'une tempête. A l'époque de Lothar, les sols étaient saturés d'eau et offraient un moins bon ancrage aux arbres.

Dans le cas de Lothar, les recherches montrent que les dégâts ont été plus fréquents dans les stations humides que dans les autres stations. C'est également vrai pour les stations acides, où l'on observe une corrélation très étroite entre l'acidité du sol et les dommages causés par la tempête. Cette constatation est confirmée par le fait que les dégâts ont été plus fréquents dans les stations avec une couche d'humus brut. En revanche, l'examen des mottes n'a pas permis d'établir de relation notable entre la dimension de la motte et le chimisme du sol dans la zone d'enracinement. L'étude de cas dans la forêt jardinée démontre que les stations acides et humides ont été plus touchées par la tempête que les stations moyennes et les stations riches et fraîches. On n'a pas observé de corrélation claire entre la profondeur du sol et les dégâts dus à la tempête.

topographie

L'évaluation des dégâts dus à Lothar d'après la **topographie** des peuplements donne des résultats inégaux. Les peuplements situés sur des croupes, dans des terrains plats ou légèrement en pente semblent avoir été les plus touchés. Les dégâts diminuent avec l'augmentation de la pente. Contrairement à Vivian, l'exposition de cette dernière (face au vent / sous le vent) n'a joué qu'un rôle secondaire. On peut en déduire que, dans le cas de Lothar, c'est probablement moins la topographie du terrain que la force du vent, et surtout les turbulences et l'agitation de l'air, qui ont déterminé la nature et l'étendue des dégâts.

**dépôts d'azote
acidification du sol
déséquilibres nutritifs
croissance des arbres**

On sait d'après plusieurs études que les **dépôts d'azote** influencent les propriétés du milieu. Ils favorisent l'acidification et modifient le cycle des éléments nutritifs. Par l'intermédiaire du sol, ils agissent aussi sur les propriétés des arbres. Telles qu'elles ont été conçues, les recherches ne permettaient pas d'établir une corrélation directe entre les dépôts d'azote atmosphérique et l'étendue des dégâts dus à la tempête. Le mode d'action à travers l'assimilation aérienne par les arbres, la transformation des propriétés du sol et le cycle des éléments nutritifs est trop complexe pour cela. Mais elles ont tout de même montré que le risque de cassure du tronc était nettement plus important chez les épicéas présentant une concentration élevée d'azote, une faible accumulation d'amidon dans les tissus végétaux et de larges cernes annuels. De même, la proportion de hêtres abattus augmente avec la concentration d'azote dans les feuilles.

L'acidification, la stimulation de la **croissance des arbres** et les **déséquilibres nutritifs** doivent être considérés comme des facteurs de risque concernant les

dégâts dus à une tempête. D'après les connaissances actuelles, ces trois phénomènes sont étroitement liés aux importants dépôts d'azote atmosphérique.

Conclusions

Les facteurs étudiés n'ont pas tous la même incidence sur la sensibilité des arbres et des peuplements et donc sur la nature et la gravité des dégâts dus à une tempête. Les résultats des recherches se rapportent à la tempête Lothar et ne peuvent donc pas être généralisés tels quels, mais ils permettent déjà une classification grossière des facteurs par rapport à la sensibilité aux tempêtes :

- Les principaux facteurs de risque sont le mélange des essences, l'essence, la hauteur des peuplements, la différence de hauteur entre peuplements, et l'acidité du sol.
- L'humidité du sol, la structure des peuplements, le traitement de la forêt avant la tempête (dernière intervention), de même que la vitesse de croissance des arbres, leur état nutritionnel et les attaques de pourriture peuvent être considérés comme des facteurs moyennement importants.
- La forme des arbres et la topographie des peuplements jouent un rôle plutôt secondaire dans la sensibilité aux tempêtes.

Influence de différents facteurs sur le reboisement

Peuplement et traitement des surfaces sinistrées

structures résiduelles

semenciers

Les caractéristiques du peuplement avant la tempête influencent l'état d'une surface après une tempête et donc son potentiel pour le reboisement. L'étude de cas menée dans la région de forêt jardinée a montré que, dans les peuplements jardinés ayant subi des dégâts isolés de l'ordre de 30 à 40% du volume, la structure du peuplement n'était souvent pratiquement pas perturbée. Même après un déblaiement total de surfaces sinistrées étendues, il subsiste beaucoup de zones de recrû différenciées et d'arbres isolés de l'étage intermédiaire ou inférieur. Ces **structures résiduelles** influencent le micro-climat et la régénération, il existe déjà des zones de recrû et souvent aussi des **semenciers** d'essences adaptées à la station, de sorte que la continuité du renouvellement forestier n'est pas trop affectée. Par rapport aux surfaces touchées dans des peuplements uniformes, on trouve ici des conditions plus favorables au reboisement, ce qui est particulièrement important pour les forêts protectrices où il faut maintenir une couverture permanente sur l'ensemble de la surface.

technique de déblaiement

Le **traitement** des surfaces touchées par la tempête influence certains facteurs qui peuvent avoir des répercussions sur le reboisement. Outre les peuplements résiduels, cela concerne surtout les propriétés du sol. Les études menées dans des surfaces déblayées ont révélé la présence de compactations plus ou moins importantes suivant la **technique de déblaiement** et la station. L'humidité du sol lors des opérations de déblaiement joue un rôle déterminant. A l'avenir, de nouvelles aides à la décision devraient aider les acteurs sur le terrain à déterminer au cas par cas et

d'après la situation s'il existe une technique appropriée permettant de ménager le sol ou s'il est préférable de renoncer au déblaiement.

Les atteintes portées par les engins forestiers aux sols naturels sont souvent profondes et persistantes et affectent des fonctions importantes pour la croissance végétale. Il est possible de soutenir ponctuellement la régénération naturelle par des mesures appropriées. Des méthodes visant à améliorer la porosité et à stimuler l'activité biologique sont testées sur des surfaces d'observation permanente.

Propriétés du sol

transformation du sol	Sous l'effet de leur poids et des contraintes dynamiques extrêmes, les machines utilisées pour déblayer les surfaces touchées par la tempête entraînent des transformations du sol qui affectent non seulement la couche supérieure, mais aussi les couches profondes. C'est le premier passage sur un sol naturel qui occasionne les déformations les plus importantes. Ces compactations réduisent le volume et la continuité des pores et diminuent ainsi leurs capacités à transporter l'eau et l'air. Outre les dégâts mécaniques infligés aux racines dans la couche supérieure, le manque d'oxygène et l'humidité résiduelle créent aussi des conditions défavorables aux
racines	racines dans les couches profondes, ce qui a des conséquences négatives sur le développement racinaire. On observe également une réduction de la croissance en hauteur chez des arbres (érable sycomore, chêne) plantés dans des emplacements compactés.
activité biologiques	Les compactations ont aussi pour effet de réduire l'activité biologique . On a constaté que l'activité des vers de terre qui creusent des galeries horizontales ou verticales tendait à diminuer dans les terrains compactés.
chimisme du sol	L'étude du chimisme du sol a montré que, pendant la période étudiée, les concentrations de nitrate dans les eaux d'infiltration étaient nettement plus élevées dans les terrains non déblayés que dans des surfaces déblayées ou dans des peuplements voisins épargnés par la tempête. Les sols compactés étaient moins acides que les sols non compactés du fait du manque d'oxygène et des conditions réductrices.
Evaluation des chances de succès	A l'aide d'une modélisation intégrative , on s'efforce d'établir des prévisions sur la durée nécessaire au reboisement d'une surface de chablis compte tenu des facteurs stationnels, des variantes de traitement et de l'abroustissement. Cette modélisation s'appuie en particulier sur les facteurs « répartition des semences », « développement de la végétation », « germination » et « croissance et mortalité. » Elle servira à développer un instrument d'aide à la décision qui permettra d'évaluer les nouvelles surfaces de chablis sous l'angle de leur potentiel pour le reboisement naturel. On pourra alors déterminer si des mesures de soutien ou d'incitation se révèlent nécessaires et lesquelles.

Conséquences pour la limitation préventive des risques et la réussite du reboisement

Evolution des facteurs de risque externes

événements climatiques
pollutions de
l'environnement

Les principaux facteurs de risque externes pour la forêt sont les **événements climatiques** et les **pollutions de l'environnement**. Les risques climatiques vont probablement s'accroître avec le réchauffement du climat, surtout si celui-ci s'accompagne **d'événements extrêmes** comme les tempêtes ou les sécheresses. Les effets des polluants se font plutôt ressentir petit à petit. Les mesures de protection de l'air au plan national et international sont donc aussi importantes pour les risques à venir.

Concernant l'évolution des événements climatiques à risque, voici ce que l'on peut retenir en l'état actuel des connaissances :

- On ne peut émettre aucune affirmation certaine sur la fréquence des tempêtes.
- La probabilité qu'une tempête hivernale agressive touche la forêt lorsque les sols sont saturés d'eau augmente, ce qui devrait réduire la stabilité des arbres. Comme les sols mettent beaucoup de temps à sécher en hiver, les conditions se prêtent mal à l'utilisation de machines pour le déblaiement des surfaces touchées.
- En raison du réchauffement climatique, il y a une plus forte probabilité que le bostryche trouve des conditions favorables à sa prolifération après une tempête.
- Compte tenu de ces influences, on peut s'attendre à ce que l'étendue des dégâts lors de tempêtes tende à augmenter.

charges critiques

mesures de protection
de l'air

Les recherches sur Lothar ont montré que l'**acidification** et l'**azote** avaient une influence sur la nature et l'étendue des dégâts et devaient être considérés comme des facteurs de risque. Même si l'on n'a pas pu établir de lien direct avec les apports anthropiques d'azote, il est incontestable que ceux-ci contribuent à l'acidification des sols et à l'approvisionnement excessif en azote. Des cartographies établies dans les années 90 ont montré que les **charges critiques** pour l'acidification, les dépôts d'azote et l'ozone étaient dépassées dans une grande partie de l'aire forestière suisse. Il est vrai que les **mesures de protection de l'air** prises dans les années 80 ont pu stopper la tendance à la hausse. Mais malgré les efforts en cours, il ne faut pas s'attendre à une amélioration rapide des facteurs de risque « acidification » et « dépôts d'azote » ni à un rétablissement des sols forestiers.

Recommandations

Les recommandations qui peuvent être faites à partir des résultats des projets concernent principalement la **sylviculture**, la **protection des sols**, la **politique environnementale** et la **mise en pratique**. Si les propriétaires et les exploitants de forêts peuvent intervenir directement au niveau de la sylviculture et de la protection des sols, pour les questions environnementales et de mise en œuvre, ce sont les politiques, les autorités, les associations et les centres de formation qui sont appelés à agir.

planification forestière	La relation évidente entre les facteurs « mélange des essences », « essence », « hauteur du peuplement » et la sensibilité aux tempêtes montre que la planification forestière et le travail du sylviculteur revêtent une grande importance. A cet égard, les choix opérés durant la phase de régénération et de jeune forêt sont déterminants. Par des méthodes de régénération différenciées et une régulation précoce du mélange , on s'efforcera de favoriser tout le spectre des essences adaptées à la station, de conserver une proportion minimale de feuillus, et d'encourager le développement d'une structure étagée. Les peuplements purs d'épicéas étrangers à la station sont à éviter. Une faible proportion (>10% dans la strate supérieure) de feuillus ou d'essences hôtes stables compatibles avec la station (Douglas ou mélèze par exemple), suffit déjà à réduire considérablement la sensibilité aux tempêtes. Les premières éclaircies doivent être fortes et intervenir à un stade précoce. Elles seront suivies d' éclaircies régulières et modérées. Si les conditions de station le permettent, les peuplements étagés ou jardinés représentent une bonne solution pour réduire la sensibilité aux tempêtes. Il faut accorder une priorité absolue au rajeunissement ou à la conversion des vieux peuplements uniformes présentant un importante volume sur pied et une forte proportion de résineux, qui sont particulièrement exposés aux tempêtes. Et l'on accordera une attention particulière aux travaux sylvicoles dans les stations acides et humides.
méthodes de régénération régulation du mélange	
éclaircies	
conversion des peuplements	
conditions pour le reboisement	Les mesures sylvicoles destinées à renforcer la stabilité des peuplements ont également des effets positifs sur les conditions initiales pour le reboisement après une tempête. En raison de la sélection d'essences adaptées à la station, il y a plus de chances que des semenciers appropriés au reboisement subsistent sur ou dans les environs de la surface touchée. Après une tempête, les peuplements mixtes riches en structures, dont une grande partie de la surface connaît des processus de régénération, présentent souvent déjà des zones de rajeunissement différenciées.
semenciers	
zones des rajeunissements	
compactations du sol	Lors du déblaiement de surfaces touchées par une tempête, la mesure préventive la plus importante est la lutte contre les compactations du sol . On doit éviter de rouler sur de grandes surfaces. Pour cela, il est très important de planifier soigneusement les opérations de déblaiement, en incluant la possibilité de laisser le bois sur place. Les décisions seront prises en tenant compte de la sensibilité de la station, de l'humidité du sol, du choix de la méthode la mieux adaptée, et des mesures envisageables pour limiter les dégâts aux sols. Une nouvelle aide à la décision permettra aux acteurs de terrain d'évaluer les possibilités et les risques pour chaque surface.
aide à la décision	

régénération

Ils pourront ainsi décider de déblayer ou non le terrain et choisir le cas échéant une méthode aussi douce que possible. Pour les sols déjà dégradés, des mesures telles que la stimulation de l'activité biologique ou la plantation d'essences à enracinement profond et vigoureux peuvent soutenir ponctuellement les processus de **régénération** naturelle.

réduction des dépôts de polluants

On a constaté que les excès d'azote à disposition des arbres et l'acidité du sol sont des facteurs de risque pour la sensibilité aux tempêtes. Il importe donc de soutenir les efforts de **réduction des dépôts d'azote atmosphérique et de substances acidifiantes**, même si de nombreux points restent à clarifier quant aux relations causales entre ces facteurs et les dépôts d'azote ou de substances acidifiantes.

mise en œuvre

Si l'on passe en revue ces recommandations, on s'aperçoit que leur **mise en œuvre** exige beaucoup de connaissances techniques et pratiques de la part de nombreux acteurs. Il faudra donc prévoir à tous les niveaux des offres spécifiques de **formation initiale et continue** dans les domaines de la sylviculture, de la récolte des bois et de la protection des sols. Elles permettront de présenter ces recommandations et ces outils et de s'assurer que les connaissances acquises soient mises en pratique de façon judicieuse et efficace. On accordera une importance particulière à l'évaluation du risque, à la prévention ainsi qu'à une bonne planification des mesures.

Perspectives

Les résultats du programme partiel 6 portent sur les liens entre l'état de la biocénose forestière et sa résistance aux tempêtes. La question à laquelle l'analyse des résultats a tenté de répondre peut se résumer ainsi : sur la base des connaissances acquises, quelles recommandations peut-on formuler pour aider les sylviculteurs et les exploitants de forêts à renforcer la résistance des forêts face aux tempêtes et à améliorer le potentiel de régénération de ces dernières après des tempêtes ?

sylviculture naturelle

La sylviculture joue à cet égard un rôle central, et beaucoup d'éléments connus de longue date ont été confirmés dans un nouveau contexte. Il apparaît ainsi qu'une **sylviculture naturelle** adaptée à la station constitue le **meilleur moyen de prévenir** les dégâts aux forêts, quels que soient leurs origines. Avec le réchauffement climatique, cet aspect est appelé à devenir un défi majeur. Comme les mesures sylvicoles ne déploient généralement leurs effets qu'à long terme, les interventions durant la phase de régénération et de jeune forêt sont décisives. Par ailleurs, leur efficacité est limitée dans la mesure où même une forêt en parfait état ne peut résister à un ouragan très violent.

station et choix des essences

En choisissant des essences bien adaptées à la **station**, en privilégiant les feuillus et les résineux stables, en évitant les peuplements purs d'épicéa étrangers à la station et en effectuant des éclaircies précoces, on améliore non seulement la stabilité des forêts contre le vent mais on limite aussi à long terme les risques économiques liés à la production de bois. Une même stratégie permet ainsi d'assurer durablement à la fois la conservation des forêts et la production de bois.

sol Les sylviculteurs n'ont pratiquement aucune possibilité d'agir sur les gaz à effet de serre responsables du **réchauffement climatique** ni surtout sur les **dépôts d'azote atmosphérique** en forêt. Le **sol** est le point d'intersection entre ces dépôts et la forêt. L'acidification croissante des sols se répercute sur la physiologie et l'état nutritionnel des arbres, et donc sur leur stabilité. L'étroite corrélation entre l'acidité du sol et les dégâts occasionnés par les tempêtes l'indique clairement, même si la recherche ne peut pas encore expliquer dans tous les détails ce mécanisme complexe.

recherche et prévention D'importants **efforts de recherche** sont encore nécessaires pour améliorer nos connaissances sur les liens entre les émissions anthropiques et les modifications climatiques d'une part, entre les modifications climatiques, les immissions et la biocénose forestière d'autre part. C'est en améliorant nos connaissances sur ces corrélations ainsi que leur vulgarisation que nous pourrons passer d'une stratégie de réparation des dégâts à une **stratégie préventive** durable.

1 Ausgangslage und Auftrag

Philippe Raetz

La connaissance des effets d'un ouragan sur le milieu forestier, la compréhension des facteurs influant sur l'étendue des dégâts forestiers et l'appréciation du risque d'occurrence sont déterminantes pour le choix d'une stratégie à même de maîtriser ou minimiser les conséquences de ces événements. S'ils ne sont pas nouveaux, les ouragans sont devenus depuis quelques décennies un facteur majeur de la gestion des forêts suisses. Une meilleure connaissance des causalités liées à ces événements et une mise en valeur des expériences acquises lors d'événements antérieurs devient une nécessité. L'ouragan Lothar représente ainsi un champ d'observation unique qu'il s'agit de mettre à profit.

programme

Cette constatation est à l'origine de la formulation du programme partiel 6 « Risques et causalités » du Programme de recherche et d'évaluation Lothar 2000–2003. Ce programme, lancé par la direction fédérale des forêts (D+F/BUWAL) dans le courant 2000, se propose d'améliorer la gestion de la crise et de ses suites dans une perspective politique, économique et sociale en tenant compte des aspects naturels. C'est précisément les causalités des aspects naturels de l'événement lothar qui sont au centre de la recherche en sciences naturelles appliquées du programme partiel 6 « risques et causalités ».

Le programme partiel arrive à sa fin et le texte proposé dans cette synthèse rassemble les résultats de différents projets qui éclairent des aspects précis dans un système complexe. Le champ d'investigation est très large : il concerne la végétation et les arbres, les sols, l'atmosphère, le climat mais aussi les interactions entre ces divers systèmes. Cette synthèse n'est pas une simple juxtaposition de résultats de recherche : les résultats sont organisés dans une structure permettant d'apporter des éléments de réponse aux questions plus pratiques du programme Lothar.

synthèse

La structure de la synthèse résulte d'un cheminement dont les questions de recherche des divers projets ont donné le point de départ. Ces questions de départ ont été ensuite ordonnées selon 3 niveaux de réflexion portant respectivement sur

- i) les facteurs internes et forestiers de risques,
- ii) la prévention (sur quels facteurs est-il raisonnablement possible de prendre influence) et, finalement,
- iii) la question des facteurs externes sur lesquelles la politique forestière n'a que peu ou pas de prise et qui pourraient contribuer à faire évoluer défavorablement les facteurs de risque. La structure proposée dans cette synthèse s'efforce de distinguer ces 3 niveaux de réflexion.

questions à répondre

Dans un deuxième temps et dans le but de rassembler les résultats dans un tout cohérent et de répondre aux besoins pratiques de la gestion des dégâts forestiers, les résultats et recommandations de 8 projets sont organisés de manière à répondre à 3 questions simples :

- Quels sont les facteurs prédisposants, quelle est la vulnérabilité de la forêt aux ouragans ? Il s'agit ici tant des aspects liés au vent, aux peuplements forestiers, à leurs caractéristiques dendrométriques individuelles et collectives, leur compo-

tion et structure, leur agencement spatial et leur localisation topographique que des aspects relatifs aux sols forestiers (chapitre 2).

- Quels sont les facteurs qui sont en mesure de favoriser la régénération sur les surfaces Lothar ? Il s'agit là de la perspective à long terme. La capacité de rajeunissement naturel de la forêt se trouve au centre des réflexions. Ce n'est plus tant les dégâts aux peuplements qui sont importants mais la faculté de la forêt à assurer sa propre régénération (chapitre 3).
- Enfin, quels sont les facteurs qu'il est possible d'influencer positivement pour améliorer la prévention des dégâts initiaux et renforcer la capacité de la forêt à assurer sa propre régénération ? Dans la perspective d'une meilleure gestion des dégâts dus aux ouragans du futur, le chapitre 4 aborde les implications et recommandations pratiques et représente le premier pas de la vulgarisation des résultats du programme partiel. Sont également abordés les facteurs climatiques susceptibles d'influer sur l'évolution des facteurs de risques (chapitre 4.1).

Ce cheminement a demandé un effort particulier de la part des chefs de projets impliqués dans le programme partiel 6 « risques et causalités » : 4 séances réunissant tous les intervenants et un consultant externe ont permis de rassembler les résultats importants de la recherche et les ordonner de telle manière à ce qu'ils satisfassent aux objectifs pratiques du programme partiel.

2 Einfluss verschiedener Faktoren auf Art und Ausmass der Sturmschäden

Jean-Philippe Schütz

2.1 Windcharakteristik und Sturmschäden im Raum Reusstal-Limmattal

2.1.1 Variation des Windfeldes und Schäden

Stürme in Ausmass und Stärke von Lothar fegen mit einer recht heterogenen Windstruktur über grossräumige Regionen wie zum Beispiel das schweizerische Mittelland hinweg. Das Windfeld zeigt dabei nicht nur eine grosse Variation der Windgeschwindigkeiten, sondern auch eine auffallende Bänderstruktur, das heisst Streifen mit hohen Windgeschwindigkeiten liegen neben Streifen mit tieferen Windgeschwindigkeiten. Je nach Windgeschwindigkeit sind dann auch die Auswirkungen eines Sturmes verschieden. Eine Analyse von Stürmen in Niedersachsen (OTTO, 2000) zeigte:

- Bei Windstärken bis 30 ms^{-1} (108 kmh^{-1}) lassen sich Streuschäden bzw. kleine Lücken konstatieren.
- Bei Windstärken zw. $30\text{--}45 \text{ ms}^{-1}$ ($108\text{--}162 \text{ kmh}^{-1}$) kann die Bildung etwas grösserer Lücken festgestellt werden, aber nicht immer.
- Überschreitet die Windgeschwindigkeit 45 ms^{-1} (162 kmh^{-1}), resultiert ein grossflächiger Zerfall der Bestände. Hier spielt der Zufall eine grosse Rolle, wenn bestimmte Landesteile bzw. bestimmte Bestände mehr betroffen sind als andere.

Eine Varianzanalyse in Windklassen (VKL) bestätigt den losen Zusammenhang zwischen der Windstärke und den Schäden (IL) (Abb. 1). Nur für die Buchenbestände (Abb. 1, rechts) lässt sich ein statistisch gesicherter Unterschied zwischen der Windklasse 4 und den Klassen 2 und 3 feststellen.

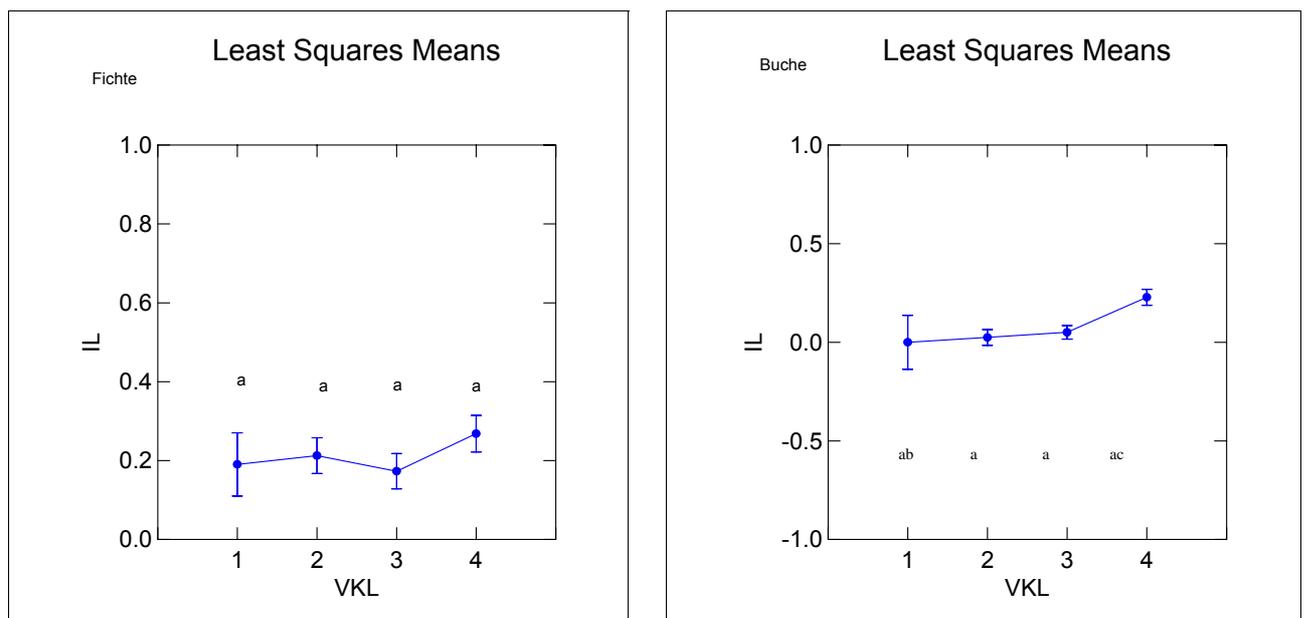


Abb. 1: Ergebnisse der Varianzanalyse des Schadenindex IL (prozentualer Lochflächenanteil) und der Windgeschwindigkeitsklassen (VKL) für Fichten- (links) und Buchenbestände (rechts). Klassen mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant von einander. VKL: 1=31–36 ms^{-1} , 2=37–42 ms^{-1} , 3=43–48 ms^{-1} , 4=49–54 ms^{-1} .

Die Analyse von Lothar mit statistisch faktoriellen Modellen ergibt, dass die Windparameter zur Charakterisierung der Schäden bei Fichte nur schwach beitragen.

Dieses Ergebnis legt den Schluss nahe, dass Zufälligkeiten sowohl in der Windstruktur wie auch in den Einzelheiten der Baumeigenschaften und der Vernetzung im Bestand dazu führen, dass gewisse Bestände sehr stark betroffen werden und andere vergleichsweise wenig Schäden aufweisen. Es wäre aber unkorrekt, daraus zu schliessen, dass die Schäden nur ein Ausdruck einer zufälligen höheren Gewalt darstellen. Es erklärt jedoch, warum Bestände in bestimmten Pflegezuständen und Strukturen nicht jedes mal gleich betroffen werden.

Dieser Zufälligkeitscharakter ist bei starken Stürmen meist derart gross, dass er die prädisponierenden Standorts- und Bestandesfaktoren oft mehr oder weniger zu überdecken vermag. Daher können auch schwach ausgeprägte, im statistischen Sinne nicht hochsignifikante Risikofaktoren, wichtige Hinweise für die Waldbehandlung geben.

Die Konsequenz aus dieser Zufälligkeit der Schäden ist, dass die Auswirkungen heftiger Stürme schlecht prognostizierbar sind. Dies ist bei der Beurteilung der Wiederkehrzeit solcher Stürme entscheidend. Mit Methoden der Extremstatistik lässt sich der Wiederkehrwert eines Sturms wie Lothar auf etwa 15 Jahre ermitteln (BUWAL 2001). Das Risiko, dass der Sturm Bestände am gleichen Ort trifft und Schaden anrichtet, ist jedoch um ein Mehrfaches geringer. Betrachtet man die Tatsache, dass nur ein Viertel der Fichtenprobestflächen schwerwiegend betroffen wurden, lässt sich für den untersuchten Perimeter das Risiko der Wiederkehr auf $4 \times 15 \times 2 = 120$ Jahre für die Fichte schätzen. Für die Buche ergibt sich unter Berücksichtigung, dass nur ein Zehntel der Probestflächen betroffen wurden, sogar eine Wiederkehrzeit von $10 \times 15 \times 2 = 300$ Jahren. Dabei ist mit dem Faktor 2 berücksichtigt, dass in der ersten Hälfte der Umtriebszeit, also in jungen Beständen, kaum Schäden auftreten.

2.1.2 Bestandaufbau

Unsere Ergebnisse, geltend für gleichförmige, mehr oder weniger reine Fichten- und Buchen-Baumhölzer, ergeben, dass keiner der klassischen Indikatoren der individuellen Bestandesstruktur die Empfindlichkeit gegenüber starken Stürmen massgeblich beeinflussen. Im beobachteten Altersbereich von immerhin 60–120 Jahren stehen weder Alter (bzw. Entwicklungsstufe) noch die erreichten Baumhöhen (Oberhöhe) oder Durchmesser (Oberdurchmesser) in Korrelation mit den Schäden. Wohlverstanden sind im Allgemeinen die Baumhölzer viel mehr betroffen als Jungbestände. Es scheint aber, dass die Zufälligkeit der Windstruktur eine viel grössere Rolle spielt als die Bestandeseigenschaften. Die Eigenschaften der kollektiven Stabilität, namentlich das Bestehen von Unterbrechungen des oberen Kronendaches (Lücken, starke Eingriffe in die Oberschicht) bzw. einer Schwächung (starker Borkenkäferbefall) scheinen relevanter zu sein als die individuellen Stabilitätseigenschaften.

Interessant ist z.B., dass der Schlankheitsgrad (Ho:Do-Quotient) im Gegensatz zur weitverbreiteten Auffassung in keinem statistisch gesicherten Zusammenhang mit den Schäden steht. Die Tendenzen zwischen H:D und Schäden sind äusserst schwach erkenntlich und (zumindest für die Fichte) im Sinne eines negativen Zusammenhangs mit der Schadensanfälligkeit. Das heisst, dass die Anfälligkeit mit niedrigeren H:D-Werten tendenziell zunimmt (siehe Abb. 2).

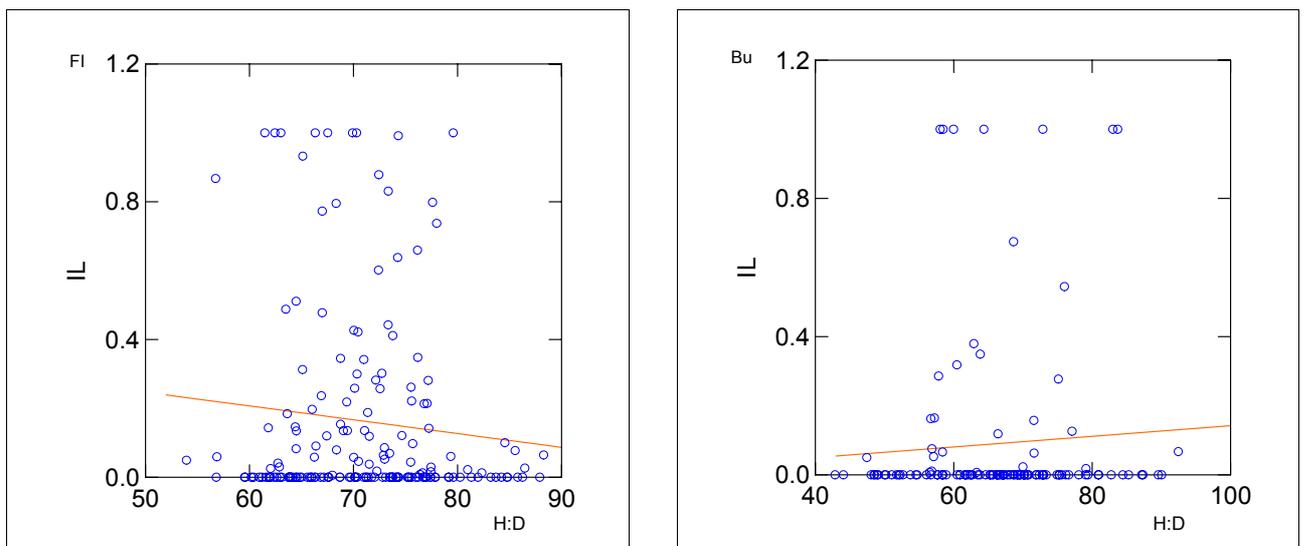


Abb. 2: Schadenindex IL (Prozentualer Lochflächenanteil) und Schlankheitsgrade der Oberschichtbäume (HD) für Fichten- (links) und Buchenbestände (rechts).

Verschiedene neuere Untersuchungen von Sturmschäden bestätigen, dass der H:D kaum statistisch nachweisbar ist (REDDE 2002, DURNHAM und CAMERON 2000), und somit kaum als Indikator der Bestandesempfindlichkeit gewertet werden darf, weil er generell mit zunehmender Bestandesentwicklung abnimmt. Der H:D-Quotient ist viel mehr für die Schneedruckschäden verantwortlich.

Das auf den ersten Blick unerwartete Ergebnis des (leicht) negativen Zusammenhangs zwischen H:D und Schaden, lässt sich folgendermassen erklären: Der H:D stellt wohl das Ergebnis der früheren Durchforstungstätigkeit dar. Diese ist in der Schweiz, mit unserer langjährigen Praxis der Auslesedurchforstung im Wesentlichen überdurchschnittlich gut, im Vergleich zu Nachbarländern. Die beobachteten H:D-Werte (der Bäume der Oberschicht, wohlverstanden) variieren in der Tat zw. 55 und 88, was auf eine recht günstige, ja gute Stabilität hinweist. Die Folge von wiederholten Auslesedurchforstungen auch in höherem Alter führt aber zu einer grösseren Auflichtung der Bestände. Somit haben die Bäume mehr Bewegungsamplitude, um unter Windeinfluss zu schwingen, was unter Umständen das Risiko der Bestandesauflösung erhöhen könnte.

Zw. Deckungsgrad vor dem Sturm und den Schäden lassen sich für Fichtenreinbestände keine signifikanten Zusammenhänge erkennen, aber immerhin den gleichen

Trend wie für die H:D-Werte (Abb. 3). Dies scheint den günstigen Einfluss des Bestandesschlusses (der kollektiven Stabilität) zu bestätigen.

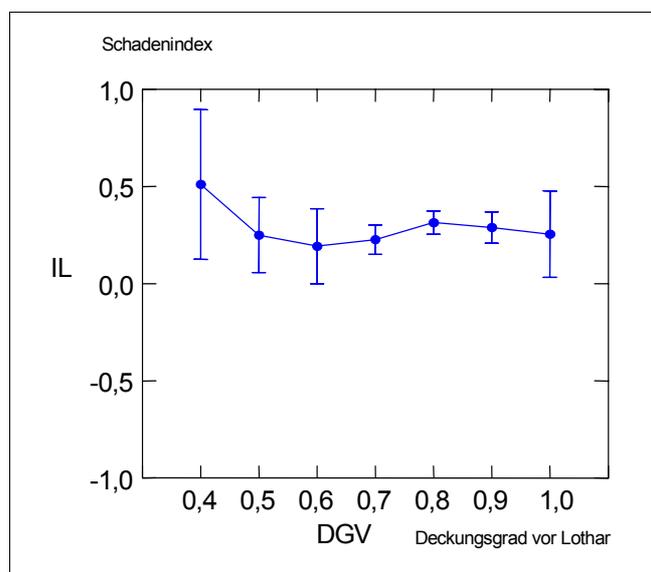


Abb. 3:
Zusammenhang zwischen Bestandesschluss vor Lothar und Schäden in Fichtenreinbeständen.

2.1.3 Präventive Massnahmen

Daraus zu schliessen, dass die erwachsenen Fichtenbestände möglichst dicht zu halten seien, wäre verfehlt. Die positive Wirkung der Durchforstung führt mittelfristig zu einer Verbesserung der individuellen Stabilität (gute H:D und Bekronungsgrade) und gewährt somit eine günstige Prädisposition zur Sturmsicherheit. Sicher ist, dass sich sowohl die Durchforstung umso günstiger auswirkt bzw. das Risiko der Verletzbarkeit infolge Durchforstung umso geringer wird wie die Eingriffe rechtzeitig erfolgen (d.h. im Stangenholz oder schwachen Baumholz). Andererseits deutet die statistisch schwache Prägung der direkten (Jahre nach der Durchforstung) wie indirekten Indikatoren (H:D) darauf hin, dass die Auflichtung im Kronenraum nicht generell zu einer Destabilisierung führt. Dies gilt, wenn der Kronenraum regelmässig aufgelichtet wird. So dürfte die bisherige Praxis der Durchforstung in keiner Weise in Frage gestellt werden, ausser die einer Zielstärkennutzung. Einzig die Gefahr von Folgeschäden der Ernte (Rotfäule) spricht eher für die Reduktion der Durchforstungstätigkeit in älteren Bestockungen. Andererseits sind geschlossene Bestände nicht besonders gefährdet, zumindest solange man sie nicht unregelmässig auflöst, wenn es darum geht, die Verjüngung einzuleiten.

Das grösste auslösende Moment bezüglich Risiken ist eine bestehende unregelmässige Auflösung des Kronenraumes, wie nach der Schaffung von Femellöchern, Eingriffen im herrschenden Bestandesgerüst (Bsp. Zielstärkennutzung) sowie der Bildung von Fronten. Bei der Festlegung von sinnvollen waldbaulichen Verhaltensregeln gilt es primär, die Verletzbarkeit der Bestände gegenüber einem Bestandeskollabieren zu vermindern, das heisst, das Phänomen der Bestandesauflösung

möglichst zu minimieren. Die Verjüngung von Fichtenbeständen sollte daher eher in Saumhieben oder eventuell Schirmhieben als in Lochhieben erfolgen.

Auf der Ebene der Prädispositionen kann zuerst festgehalten werden, dass die Baumarten sehr unterschiedliche Empfindlichkeiten gegen Sturm aufweisen. Bei der Durchforstung kann auch die Mischungsregulierung eine sehr effiziente Massnahme zur Verbesserung der Stabilität sein, insbesondere bei empfindlichen Baumarten (Fichte). Schon eine Beimischung von 10–20% von stabileren Baumarten verbessert auf äusserst wirksame Weise die Stabilität. Dies gilt sowohl für beigemischte Laubbäume wie auch stabile Nadelhölzer wie Douglasie oder Lärche, allenfalls Föhre.

2.1.4 Muster der Bestandsauflösung erkennbar (Massnahmen)

Wir gehen von der Hypothese aus, dass die Verletzung des Stabilitätsgefüges eines Bestandes das Ergebnis einer sogenannten dynamischen Störungskette ist. Das heisst, dass ein Bestand nicht durch eine einzelne extreme Böe, sondern vielmehr durch sukzessive Einwirkungen zerstört wird. Erst wenn ein Bestand schwerwiegend aufgelöst ist, besteht die Gefahr des Kollabierens. Es scheint daher wichtig, das Phänomen des Auslösungsprozesses zu verstehen. Untersuchungen im Windkanal lassen annehmen, dass die Schaffung von Lücken grösser als eine Baumlänge entscheidend wirken könnten.

Es scheint, dass Spitzenböen für die Schäden entscheidend wirken, zumindest am Anfang, wenn der Bestand noch kompakt und die Kollektivstabilität noch voll wirksam ist. Felduntersuchungen von GARDINER (1994) während Stürmen in Schottland zeigen, dass der Windstrom auch im Falle von starken Stürmen über den Kronenraum fegt, ohne in das Bestandesinnere einzudringen. Dies führt zu einer mehr oder minder synchronen Bewegung der Kronen (Honami-Effekt), wobei die Kronen wie ein weitgehend undurchlässiger Filter wirken. Erst Extremböen ab Windgeschwindigkeiten von 45 ms⁻¹ können in den Kronenraum und in das Bestandesinnere wirklich eindringen. Punktuell können dann einzelne schwache Bäume versagen. Die Filmaufnahmen zeigen (RITTER 1999; PFLÜGER 1999; COSANDEY 1999), dass in diesem Stadium die betroffenen Fichten ohne Dominowirkung zu Boden fallen. Später vorkommende Extremböen verursachen weitere Einzelschäden. Der Bestand löst sich so sukzessiv weiter auf. Dank grösseren Zwischenräumen in den Kronen steigt die Bewegungsamplitude der verbleibenden Bäume; der Dominoeffekt wird dann offensichtlicher. Sind einmal einzelne Lücken gebildet, tritt der Wind mehr in die Lücken ein und bildet Turbulenzen, welche den Lückenrand in Windrichtung destabilisieren (GARDINER et al. 1997). Ab einer bestimmten Auflösung des Bestandes kann die Netzwerkwirkung der Gerüstbäume nicht mehr funktionieren und die Kohärenz der Struktur hält nicht mehr Stand. So genügen bei fortgeschrittener Auflösung des Bestandes wenige starke Böen, um flächige Schäden zu verursachen.

In unserem Fall lassen sich die Konsequenzen des Sturms Lothar auf Bestandesebene wie folgt zusammenfassen (Tab. 1):

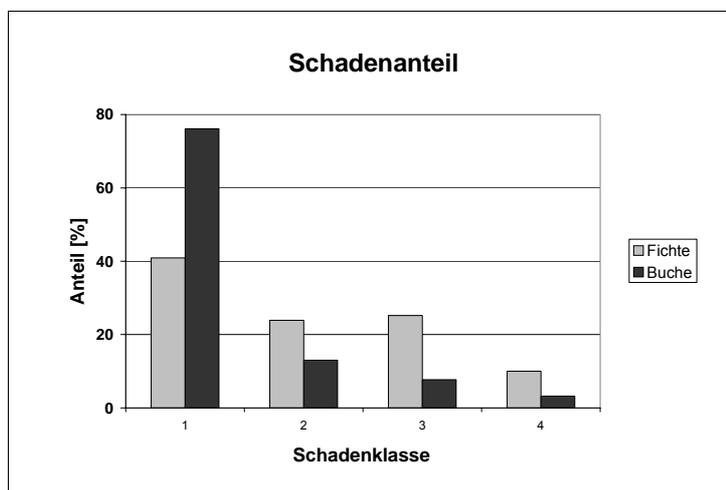
Tabelle 1: Geschädigte Fichten- und Buchenbestände infolge des Sturmes Lothar. Definitionen:
 Flächenschäden mit Totalschaden = ganze Bestandesfläche geschädigt (DGN <= 0.2);
 Flächenschäden mit starker Auflösung = (DGN <0.4).

Bestände:	Fichten		Buchen	
	Anzahl [%]	Flächen [%]	Anzahl [%]	Flächen [%]
ohne Schäden	40,9	35,7	76,1	72,9
nur mit Streuschäden	23,9	29,1	13,0	9,8
Flächenschäden	35,2	35,2	10,9	17,3
<i>davon mit starker Auflösung</i>	<i>25,3</i>	<i>35,0</i>	<i>10,9</i>	<i>17,3</i>
<i>davon mit Totalschaden</i>	<i>11,4</i>	<i>8,5</i>	<i>6,2</i>	<i>6,5</i>

Tabelle 1 zeigt zunächst, dass die Buchenbestände flächenmässig 2,3 mal weniger betroffen sind als die Fichtenbestände. Mischbestände zeigen auch bei geringem Laubholzanteil eine ähnliche Verletzungsempfindlichkeit wie reine Buchenbestände (1:2,1) und erweisen sich damit als wesentlich stabiler als Fichtenreinbestände. Für die walbauliche Praxis ist dies eines der wichtigsten Ergebnisse.

Es zeigt sich, dass die Fichtenbestände in allen Schadenklassen deutlich häufiger geschädigt sind als die Buchenbestände (Abb. 4). So sind zum Beispiel die Fichtenbestände, im Bezug auf Total- oder Lochschäden, anzahlmässig beinahe doppelt so gefährdet wie die Buchenbestände. Konsequenterweise ist der Anteil an ungeschädigten Buchenbeständen deutlich höher als für Fichtenbestände.

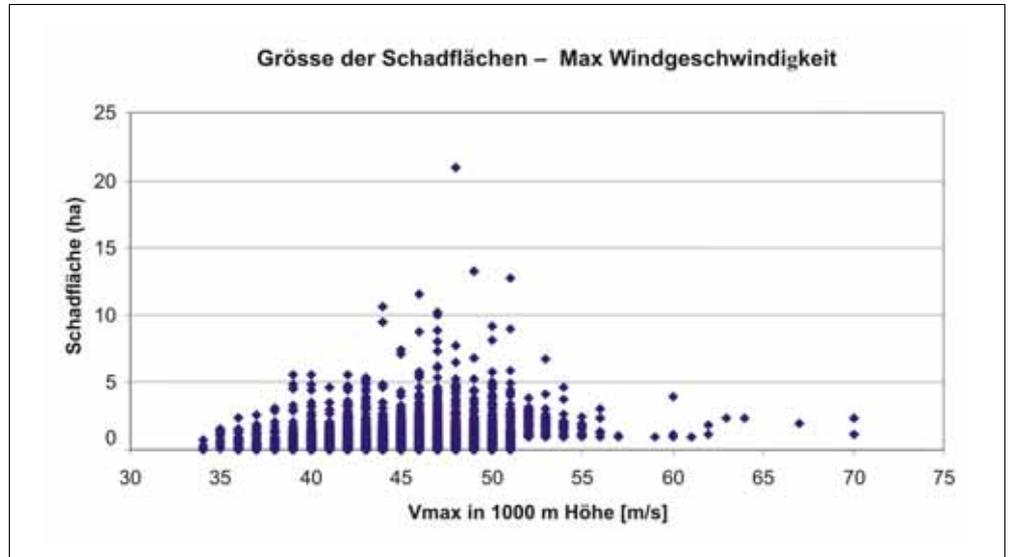
Abb. 4:
 Schadenanteil (Anzahl Bestände) nach Schadenklassen für Fichten- und Buchenbestände.



Wider Erwarten liess sich sowohl absolut als auch prozentual kein Zusammenhang zwischen den **geschädigten Flächen** und den maximalen **Windgeschwindigkeiten** nachweisen.

Im Bezug auf ihre Flächengrösse liess sich zwischen den Schadenflächen (Streu- und Flächenschäden) und der maximalen Windgeschwindigkeit kein Zusammenhang ermitteln (Abb. 5).

Abb. 5:
Geschädigte Flächen [ha]
in Abhängigkeit der max.
Windgeschwindigkeit (VT).



Auch bei differenzierterer Betrachtung, getrennt nach Streu- und Flächenschäden, konnte kein Zusammenhang ermittelt werden. Die maximale Windgeschwindigkeit hat demzufolge auf die Dimension der Schadfläche keinen direkten Einfluss, zumindest nicht auf Flächen dieser Grössenordnung (>1 ha). Ob dies für kleinere Flächen der Fall ist, wird sich auf der Ebene der Bestände zeigen.

Untersuchungen im Windkanal auf die Reaktion von Modellbeständen mit unterschiedlichen Formen der Unterbrechung des Kronendaches zeigen, dass weniger regelmässige Unterbrechungen, sondern vielmehr Lücken für die Auflösung des Bestandesgefüges bzw. für den Zusammenbruch desselben verantwortlich sind. Sogar ungleichförmige Strukturen reagieren besser als Lücken (MORSE et al. 2003; GARDINER und MARSHALL 1997; FRASER 1964). Lücken ab einer Baumlänge lassen eine erhebliche Steigerung der Biegemomente an der windexponierten Lückenwand erkennen (STACEY et al. 1994; GARDINER et al. 1997). So darf man annehmen, dass Fronten bzw. die Bildung von grösseren Femellücken wichtige Ansätze für die Auflösung der Bestandesstabilität darstellen.

In unseren Untersuchungen zeigen Fichtenbestände, in denen vor Lothar mit Femellücken die Verjüngung eingeleitet wurde, alle sehr hohe Schäden auf und unterscheiden sich mit hoher statistischer Signifikanz von den übrigen Flächen mit regelmässigen Eingriffen (Durchforstung). Dies wäre an sich ein wichtiges Ergebnis, die untersuchte Anzahl Bestände mit Femellücken ist aber so gering (n=3), dass dieses Ergebnis weiterer Bestätigungen bedarf. Dasselbe gilt für starke Sanitäreingriffe infolge Käferbefalls (KAE \geq 15 Bäume).

Bei Buchen sieht es bei Beständen, in welchen vor Lothar Verjüngungsfronten (Saumhieb) angelegt oder (in einem Fall) Überhälter entfernt wurden, ähnlich aus. Die Anzahl solcher Sondereingriffe in den Beständen ist jedoch so klein, dass sich die Ergebnisse regressionsanalytisch nicht gleich behandeln lassen wie die anderen

Bestände. Diese Flächen wurden deshalb für die weiteren statistischen Analysen eliminiert.

2.1.5 Baumart

Buchenbestände sind flächenmässig 2,3 mal weniger betroffen als die Fichtenbestände. Mischbestände zeigen auch bei geringem Laubholzanteil eine ähnliche Empfindlichkeit wie reine Buchenbestände (1:2,1) und erweisen sich damit als wesentlich stabiler als Fichtenreinbestände. Für die waldbauliche Praxis ist dies eines der wichtigsten Ergebnisse.

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Studie ist die günstige Wirkung der Mischungen. Schon eine Beimischung von 10–20% von stabileren Baumarten kann die Bestände in eine günstige Stabilität versetzen. Dabei sind nicht nur Laubbäume wirksam, sondern auch beigemischte Nadelbäume mit guten Holzeigenschaften wie die Douglasie, wahrscheinlich auch die Lärche.

Nadelholzreinbestände (>90%) unterscheiden sich im Schadensgrad signifikant von Laubholzreinbeständen (>90%), und dies um einen Faktor 3. Die Auswirkung von unterschiedlich hohen Laubholzanteilen zeigt die folgende Abbildung 25. Äusserst interessant ist, dass schon eine Beimischung von 10% Laubholz zu einer deutlichen Reduzierung der Schadensanfälligkeit führt (um einen Faktor 2,4). Bei einer weiteren Beimischung von bis zu 80 oder 90% Laubholz ist keine bedeutende Änderung der Schadenanfälligkeit IL mehr feststellbar (Faktor 2,6). Wegen der kleinen Zahl von Proben in den Klassen 2 und 3 (n=33 und 18) sind die Ergebnisse statistisch nur als schwache Tendenz erkennbar (p=23% bzw. 70%).

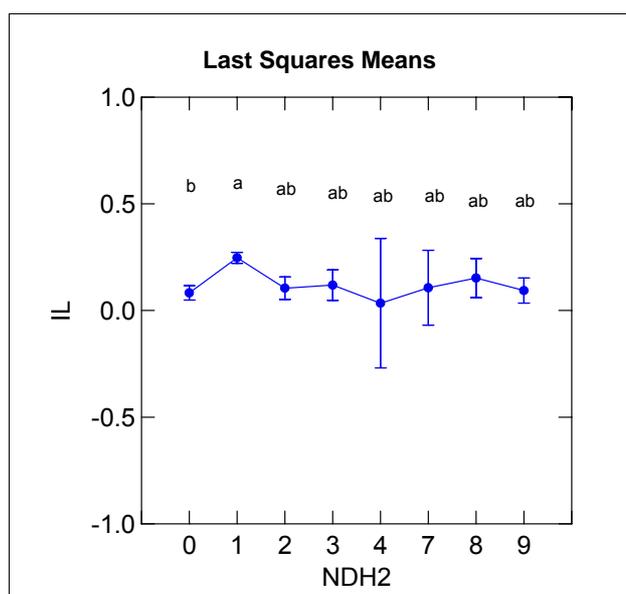


Abb. 25:

Varianzanalyse: Einfluss der Mischungsanteile (NDH2) auf die Schadenempfindlichkeit (Schadenindex IL).

0 Laubholz (Lbh) rein	n= 81
1 Nadelholzanteil (Ndh) >90%	n=139
2 Ndh 80–89%	n= 33
3 Ndh 70–79%	n= 18
4 Ndh 60–69%	n= 1
7 Ndh 30–39%	n= 3
8 Ndh 20–29%	n= 11
9 Ndh 10–19%	n= 27

Ein statistisch signifikanter Unterschied (ungleiche Buchstaben) lässt sich zwischen den Klassen 0 und 1 (p=0,3%) und tendenziell zwischen den Klassen 1 und 2 (p=23%) nachweisen.

Nimmt man die Klassen 10–20% und 20–30% Laubholzbeimischung zusammen (Kl. 2 und 3), lässt sich dieser wichtige Einfluss einer Beimischung statistisch signifikant nachweisen (Abb. 26).

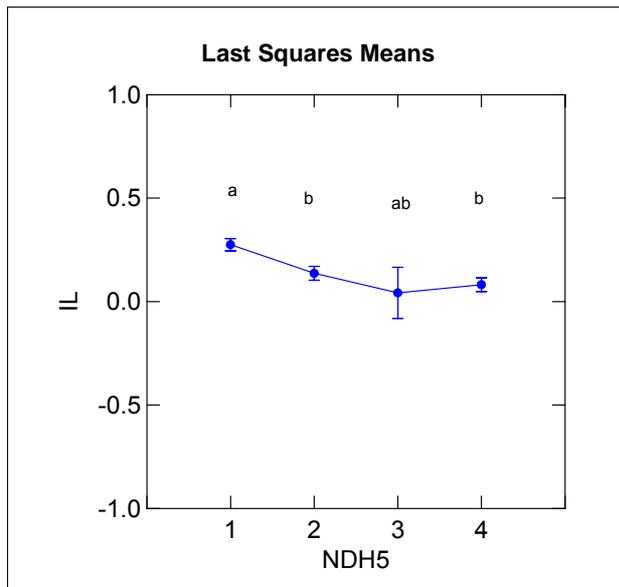


Abb. 26:

Varianzanalyse: Einfluss der Nadelholzklassen (NDH5) auf den Schadenindex IL (prozentualer Lochflächenanteil).

1 Fi/Ta rein >90%	n=102
2 Fi/Ta 70–89%	n= 77
3 Fi/Ta 60–69%	n= 6
4 Bu rein (>90%)	n= 84

Ein statistisch signifikanter Unterschied (ungleiche Buchstaben) lässt sich zwischen den Klassen 1 und 2 sowie 1 und 4 ($p=1\%$) und tendenziell zwischen der Klasse 2 und 4 ($p=10\%$) nachweisen. Klasse 3 mit zu wenigen Werten für gesicherte Aussagen.

Laubhölzer sind weniger anfällig, weil ihre durchlässigen Kronen im laublosen Zustand weniger Kräfte aufnehmen (Winterstürme) und weil ihr Holz auf Zug- und Druckbeanspruchung widerstandsfähiger ist, als das der Koniferen. Die Stammform der Laubhölzer ist in der Regel auch mehr abholzig, als diejenige der Koniferen. Ein Augenzeuge von Lothar, aus einer stark betroffenen Region (Raum Lenzburg), weist darauf hin, dass Laubbäume viel länger hin und her schwingend beansprucht waren, ehe sie entwurzelt wurden, und zwar als die maximale Windstärke schon deutlich nachgelassen hatte (BURGER 2000). Dies mag in Zusammenhang mit Veränderungen im Verankerungssystem stehen. RODGERS et al. (1995) haben bei dynamischen Schwingungsversuchen gezeigt, dass nach lang anhaltender Schwingung (ca. 50 Minuten) die Verankerung der Bäume deutlich nachlässt, möglicherweise weil die Kohärenz des Bodens sich verändert, möglicherweise aber auch wegen Ermüdungserscheinungen im Wurzelsystem bzw. sukzessivem Bruch einzelner Hauptwurzeln.

Für die waldbauliche Praxis von Bedeutung ist, dass schon 10–20% beigemischtes Laubholz in Nadelholzbeständen die Stabilität bezüglich Windschäden um den Faktor 2 erhöht. Die positive Wirkung der Mischung auf die Bestandesstabilität, etwa der Buche in Fichtenbeständen, ist zumindest im süddeutschen Raum und der Schweiz schon seit längerer Zeit bekannt (FLURY 1930; BURGER 1941; KENNEL 1965). Auch OTTO (2000) weist für Niedersachsen auf eine klare positive Wirkung der Mischungen hin. Dem gegenüber zeigen LÜPKE und SPELLMANN (1997, 1999) in Norddeutschland, dass Fichten in Beimischung von Buche instabil sind. Dies lässt sich jedoch so erklären, dass in diesen Regionen die Fichte derart über den Kronenraum herausragt, dass sie präferenziell von Stürmen betroffen wird.

Weiter zu prüfen ist, ob die Beimischung von anderen Koniferen als Fichte oder Tanne, wie etwa Douglasie, Lärche oder sogar Föhre, welche günstigere mechanische Holzeigenschaften gegenüber Biegebeanspruchung aufweisen, die Stabilität zu erhöhen vermögen. In der Literatur ist das gute Verhalten der Douglasie gegenüber Sturm wiederholt ausgewiesen (DROUINEAU et. al. 2000) und gilt als relativ sicher. Die Douglasie zeigt deutlich bessere Holzeigenschaften (37% höheres Elastizitätsmodul) als die Fichte. Das Holz der Lärche (28% höheres E-Modul) ist ähnlich wie das der Douglasie; die Lärche nimmt darüber hinaus wegen des winterlichen Nadelfalls weniger Wind auf. Schliesslich gilt die Föhre (11% höheres E-Modul) ebenfalls als stabiler als Fichte oder Tanne.

Mit unserem Datenmaterial lässt sich, aufgrund der kleinen Anzahl von Beständen mit den jeweiligen Baumarten, diese Frage nicht eindeutig beantworten bzw. statistisch absichern. Der günstige Einfluss einer schon relativ kleinen Beimischung von Douglasie ist als Trend jedoch erkennbar. Der Durchschnitt der fünf Bestände mit Douglasien-Beimischung (15–30%) in Fichten-Tannen-Bestockungen liegt sogar günstiger als bei reinen Buchenbeständen.

Literatur

Die Literaturangaben beziehen sich auf das Literaturverzeichnis im Projektbericht:

SCHÜTZ J.-Ph., GÖTZ M. 2003: *Ursächliche Zusammenhänge zwischen LOTHAR-Sturmschäden und Eigenschaften des Windfeldes sowie Bestandes- und standörtlichen Faktoren, im Perimeter des Doppelradars der ETH Höggerberg am Fallbeispiel von Fichten- und Buchenreinbeständen*. Professur für Waldbau ETH Zürich.

2.2 Erfassung der Bestandesdaten und Schäden auf dem repräsentativen 4x4-km Sanasilva-Netz

2.2.1 Zielsetzung

Ziel dieses Teilprojektes war es, erste landesweite repräsentative Daten zu Lothar-Sturmschäden und Bestandesinformationen zu erheben. Das Projekt sollte zudem eine erste Grundlage für eine Windwurf-Risiko-Abschätzung von Beständen liefern. Eine quantitative Abschätzung des Windwurftrisikos von Beständen zusammen mit der Wiederkehrwahrscheinlichkeit von Starkwinden kann als Entscheidungshilfe bei der waldbaulichen Planung dienen.

2.2.2 Methodik

Aufnahmegebiet

Grundlage für die Erhebung bildete das 4x4 km-Netz der Sanasilva-Inventur. Auf dem 4x4 km-Netz wurden schon 1990 die Schäden durch Vivian erhoben, was einen Vergleich beider Stürme erlaubt. Aufgenommen wurde im Jahr 2000 jedoch nur das Gebiet, welches von den Kantonen für die landesweite Luftbildbefliegung als Lotharschadenperimeter abgesteckt wurde [9]. Zur Kontrolle wurden auch ausserhalb liegende Sanasilva-Flächen auf dem 16x16 km-Netz aufgenommen. Keine von ihnen wies einen Schaden auf. Zusätzlich wurden alle Landesforstinventar-Flächen auf dem 1,4 km-Netz in zwei kleineren Regionen erhoben: ein 36x40 km grosses Gebiet im Umkreis der beiden Wettarradarstationen Höngerberg und Albis (Gebiet Zürich) und ein 30x40 km grosses Gebiet nördlich von Thun bis Langnau (Gebiet Thun-Langnau). Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich die erwähnten Ergebnisse auf das 4x4 km-Netz.

Aufnahmeeinheit

Als Aufnahmeeinheit für die Flächenangaben diente die 50 x 50m grosse Interpretationsfläche, auf welchen im Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) Bestandesdaten erhoben wurden, und für die Einzelbaumaufnahmen der 500 m² grosse LFI-Probekreis. Innerhalb der Interpretationsfläche wurde der Schaden als Anteil der Kronenschirmfläche in 10%-Stufen aufgenommen. Einzelbaumschäden, die weniger als 10% ausmachten wurden ebenfalls angegeben. Zusätzlich wurde die Bestandesoberhöhe auf 5m genau geschätzt, nach Westen vorgelagerte Nachbarbestände oder Waldränder erfasst und etwaige Nutzungen seit dem letzten LFI (im Durchschnitt 5 Jahre zuvor) erhoben. Falls der Zeitpunkt der letzten Nutzung nicht eindeutig bestimmt werden konnte (zum Beispiel Nutzung «ja», aber nicht klar ob innerhalb der letzten 5 Jahre), durfte «unsicher» eingegeben werden.

Schadenerfassung

Neben der Erfassung der Schäden auf der Interpretationsfläche in 10%-Stufen, wurden innerhalb des Probekreises alle Bäume, welche schon bei den letzten Inventuren des LFIs oder der Sanasilva-Inventur aufgenommen wurden, auf ihren Schaden hin erfasst. Dabei wurde zwischen Stammbruch, Stockbruch (unter 1,3 m Höhe) und Wurf (Wurzelbruch oder Wurf) unterschieden. Die Aufnahme erfolgte zwischen Ende Mai und Ende November durch zwei Feldgruppen, bestehend aus je 2 Mitarbeitern. An frischen Stöcken wurde ermittelt, ob es sich um einen Lothar-

Schaden handelte, indem aufgenommen wurde, ob der Wurzelteller abgehoben oder wieder zurückgeklappt war und ob noch Stammbruchreste vorhanden waren.

Statistische Auswertung Einfache grafische Darstellungen oder univariate Auswertungen. Die Auswertungen beschränken sich meist auf das repräsentative 4x4 km-Netz. Die zusätzlichen LFI-II Flächen lagen in Gebieten mit leicht überdurchschnittlichen Schäden. Für die Einzelbaumauswertungen wurden jedoch alle Daten verwendet, da es sonst zu wenig geschädigte Bäume gab. Dabei ging es besonders um den Vergleich zwischen Baumarten.

Multi-variate Auswertung durch Klassifikations- und Regressionsbäume Eine genaue Beschreibung zu Klassifikationsbäumen findet sich in DOBBERTIN und BIGING (1998) und DOBBERTIN (2002). Vorteil der Klassifikationsbäume ist, dass sie auch kategorische Variablen wie etwa Stufigkeit der Bestände beinhalten können und dass sie keine Normalverteilung der Werte voraussetzen. Nachteil ist, dass Klassifikationsbäume oft schnell sehr komplex werden und schwer interpretierbar werden können. Die Ergebnisse wurden jedoch durch Regressionsanalysen bestätigt. Diese sind in diesem Synthesebericht jedoch nicht dargestellt

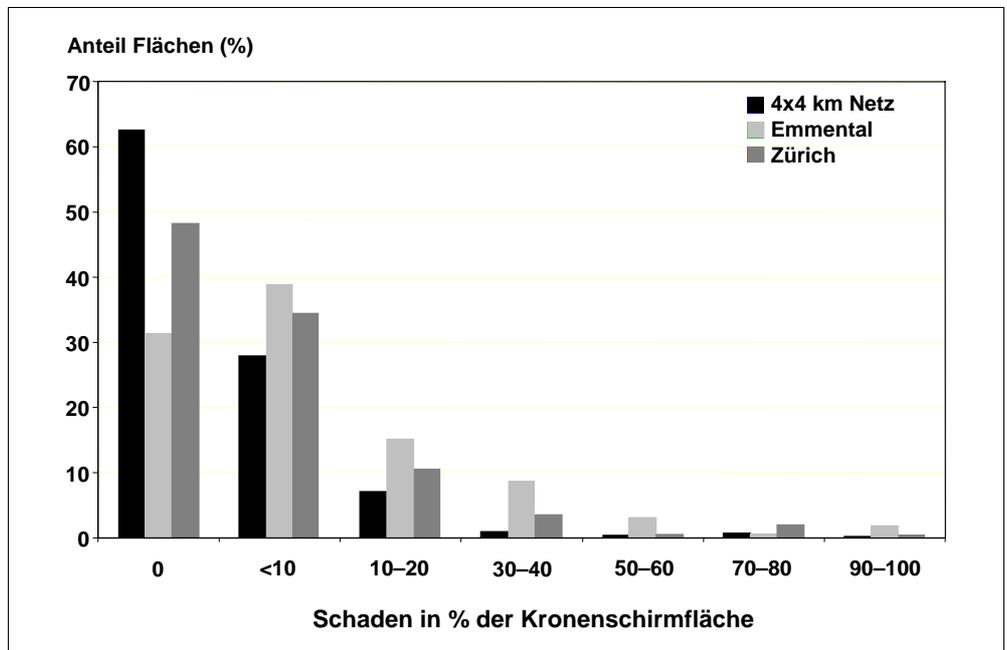
2.2.3 Ergebnisse

Anzahl Flächen und Schadverteilung Insgesamt sind im Jahr 2000 762 LFI- und Sanasilva-Flächen mit Hilfe des Lothar-Sturmschaden-Aufnahmeprotokolls erfasst worden. Davon wurden über 600 Flächen durch das Projekt aufgenommen. Ausserhalb des Lothar-Perimeters wurden 23 Flächen auf dem 16x16-km Netz erfasst. Keine von ihnen wies einen Schaden auf.

Auf dem 4x4-km Netz im Lothar Perimeter wurden 423 Flächen erfasst. Von diesen waren 63% ohne Schaden, 27% hatten einen Streuschaden, und auf knapp 10% der Flächen war 10% der Fläche und mehr von Lothar zerstört. Auf einigen Flächen an den Grenzen des Befliegungsperimeters wurden Schäden festgestellt, so dass nicht mit hundertprozentiger Sicherheit ausgeschlossen werden kann, dass nicht auch Flächen ausserhalb des Perimeters Schäden aufweisen. Jedoch sollte der Anteil dieser Flächen gering sein.

Innerhalb des Perimeters Beatenberg-Emmental (zwischen $x=600000$ und 631000 und zwischen $y=170000$ und $y=210000$) wurden zusätzlich 136 Flächen aufgenommen; zwei Flächen waren nicht oder mit nur mit unverhältnismässig hohem Aufwand erreichbar und wurden ausgelassen. Hier war der Anteil geschädigter Flächen fast doppelt so hoch wie auf dem gesamtschweizerischen Netz, der Anteil Flächen mit mindestens 10% Schaden war sogar dreimal so hoch. Im Raum Zürich-Bremgarten (zwischen $x=660000$ und 700000 und zwischen $y=230000$ und $y=266000$) wurden zusätzlich 180 Flächen aufgenommen. Auch im Raum Zürich wurden überdurchschnittlich viele Flächen geschädigt. Hier waren 54% ohne Schaden, 30% mit Streuschäden und 15% mit einem Flächenschaden erfasst worden. Erste Vergleiche mit den Windgeschwindigkeitskarten der SMA legen nahe, dass in beiden Teilregionen die Geschwindigkeiten überdurchschnittlich hoch waren und deshalb vermutlich auch die Schäden höher sind.

Abb. 1:
Schaden in Prozent der
Kronenschirmfläche.



Die Auswertung der 0,25 ha grossen Flächen erlaubt es natürlich nicht Angaben zur Grössenverteilung der Schadflächen zu machen. Die Verteilung der Schäden in Prozent der Kronenschirmfläche der Stichproben zeigt jedoch, dass die meisten geschädigten Flächen nur Einzelwürfe oder geringe Schäden aufwiesen (Abb. 1). Dies kann daran liegen, dass zufällig auf den systematischen Flächen die grossen Schadengebiete nicht getroffen wurden. Es ist aber auch möglich, dass der Anteil der Flächenschäden an den Gesamtschäden überschätzt wird und der Anteil der kleinere Streuschäden unterschätzt wird.

Der Anteil geschädigter Flächen nahm jeweils exponentiell mit dem Schadprozent ab. Summiert man die Streuschäden (Schäden bis 30% der Kronenschirmfläche), so machen sie mehr als die Hälfte des Gesamtschadens aus. Auf dem 4x4 km-Netz war es sogar mehr als 60%.

**Räumliche Verteilung
der Schäden**

Auch auf dem 4 x 4 km-Netz gab es regional unterschiedliche Häufigkeiten von geschädigten Flächen. Im westlichen Jura und Waadtland gab es kaum Schäden, das selbe gilt für das westliche Wallis. Der Voralpenraum der Kantone Freiburg und Bern wies überdurchschnittlich viele Schäden auf, aber auch das Mittelland im östlichen Aargau und westlichen Zürich war relative häufig geschädigt

Ergebnisse der Aufnahme

Ohne den Einfluss der Windgeschwindigkeit berücksichtigen zu können, müssen alle Auswertungen mit Vorsicht und unter der Annahme, dass die Windgeschwindigkeiten Bestände zufällig getroffen haben, gemacht werden. Im Folgenden wird erst eine univariate Auswertung vorgenommen. Das heisst, Wechselbeziehungen zwischen Faktoren werden vernachlässigt. Ergebnisse wurden aber auf ihre Plausibilität basierend auf Literaturangaben getestet.

Schäden Höhe über Meer und Hangneigung

Der Anteil geschädigter Flächen nahm auf dem 4 x 4 km-Netz mit der Hangneigung ab (Abb. 2). Dies ist zum Teil auf die geringeren Schäden an steilen dem Wind abgewandten Hängen zurückzuführen. Es gab nur sehr geringe Unterschiede in der Schadverteilung mit der Meereshöhe.

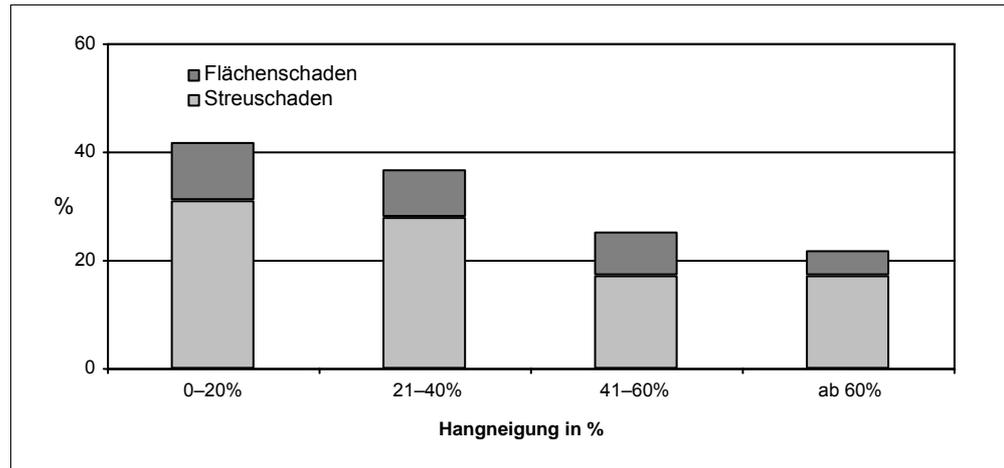


Abb. 2: Schäden nach Hangneigung.

Zusammenhang mit der Bestandeshöhe

Die Streu- und Flächenschäden nehmen mit der Bestandeshöhe zu (Abb. 3). Dies gilt für die Gesamtschweiz als auch für die zwei Teilgebiete. Bestände mit einer Bestandesoberhöhe von mindestens 35 m wurden mehr als doppelt so häufig geschädigt wie Bestände mit 20 m und weniger Oberhöhe. Auch für Bestände mit verschieden hohem Nadelholzanteil steigt jeweils der Schaden mit der Höhe. Für Laubhölzer war diese Beziehung allerdings etwas schwächer als für Nadelhölzer.

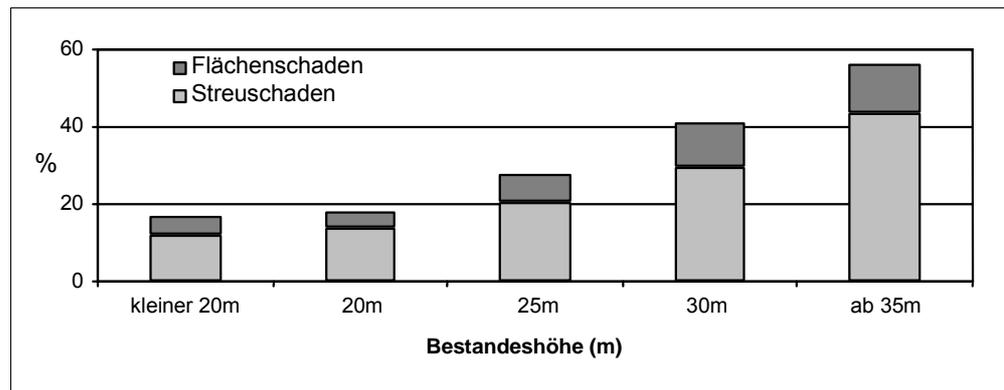


Abb. 3: Zusammenhang mit der Bestandeshöhe.

Bestandesalter

Mit dem Alter nahmen die Schadenanteile zu (Abb. 4). Dies ist vor allem jedoch auf die gleichzeitige Höhenzunahme der Bestände zurückzuführen.

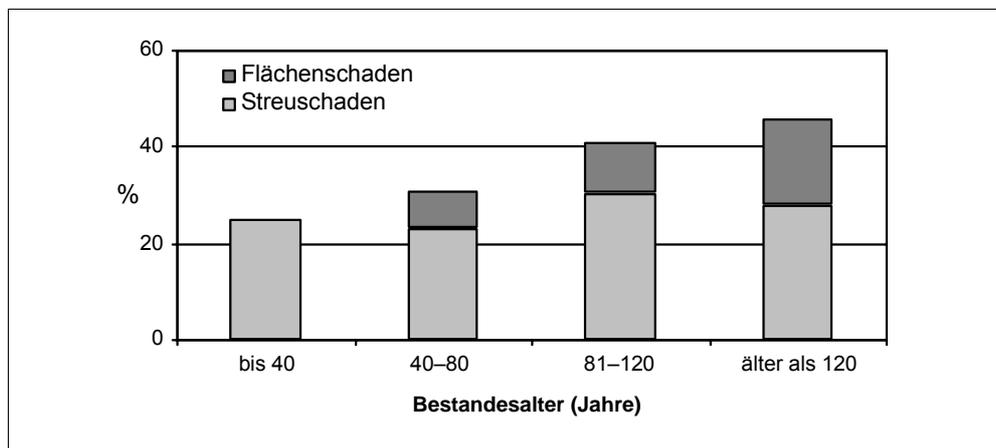


Abb. 4:
Bestandesalter.

Einfluss der vorangegangenen Nutzung

Flächen, auf welchen in den vorangegangenen fünf Jahren eine Nutzung statt fand, sind überdurchschnittlich häufig von Lothar geschädigt worden (Abb. 5). Rund die Hälfte der Bestände, in denen eine Nutzung bestimmt wurde, wiesen einen Schaden auf. In den nicht genutzten Beständen waren es dagegen nur 30 Prozent. Damit bestätigte sich die Erkenntnis, dass die Bestandesstabilität kurz nach einem Eingriff reduziert ist. Vor allem Streuschäden waren auf vorher genutzten Flächen deutlich höher.

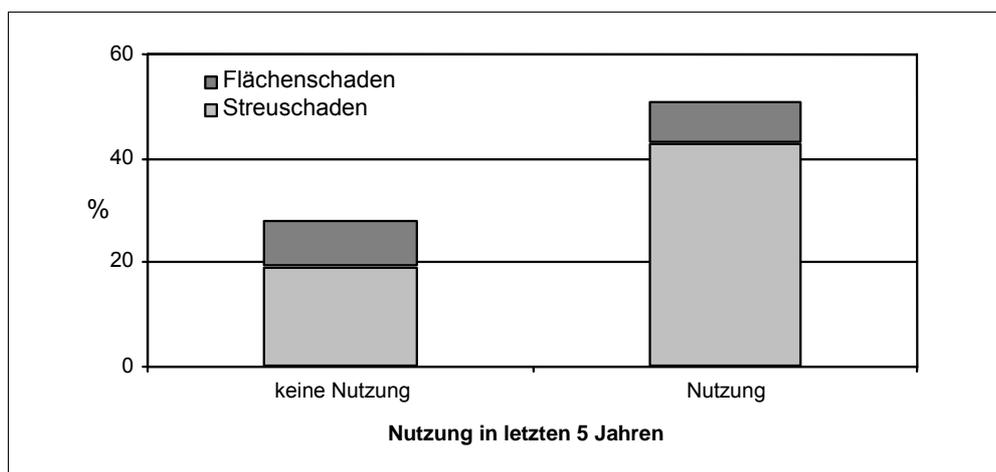


Abb. 5:
Einfluss der vorangegangenen Nutzung.

Einfluss des Bestandesschutzes Vivian-Schaden

Innerhalb des Lotharperimeters wurden Flächen auf dem 4 x 4 km Netz, welche schon 1990 bei Vivian geschädigt wurden, zweimal häufiger auch von Lothar geschädigt als andere Flächen (Abb. 6). Ob dies an der Vorschädigung durch Vivian oder einer generell höheren Sturmgefährdung, kann nicht gesagt werden.

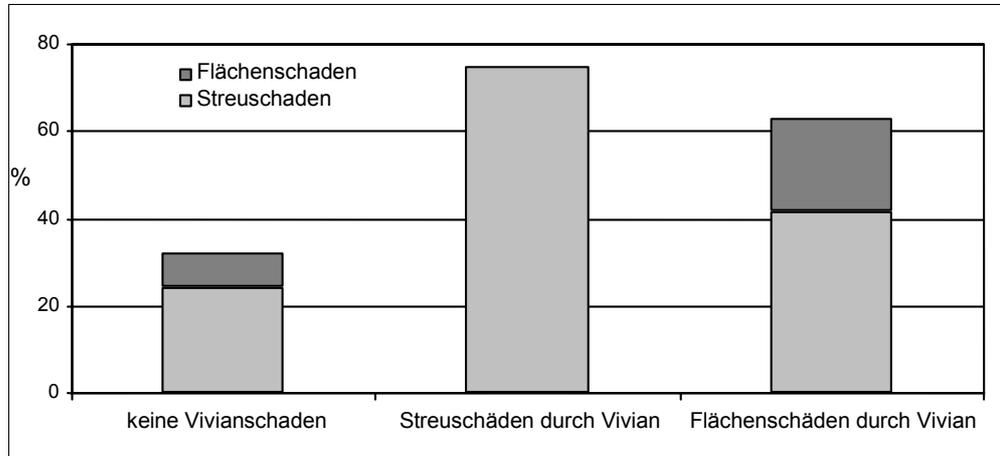


Abb. 6:
Vivian-Schaden.

Nadelbaumanteil

Reine Nadelholzbestände (mehr als 90% Nadelbaumanteil) waren häufiger geschädigt als reine Laubholzbestände. Bei den Mischbeständen ist die Beziehung nicht immer so eindeutig (Abb. 7). Insgesamt war der Nadelholzeffekt geringer als erwartet. Es ist jedoch möglich, dass auch in einem Laubholzmischwald die Nadelbäume geschädigt wurden, dies jedoch jetzt dem Laubholzanteil zugerechnet wird. Auch wird bei der LFI-Angabe nicht zwischen den Nadelholzarten unterschieden. Ein Lärchenbestand und ein Fichtenbestand können somit nicht unterschieden werden.

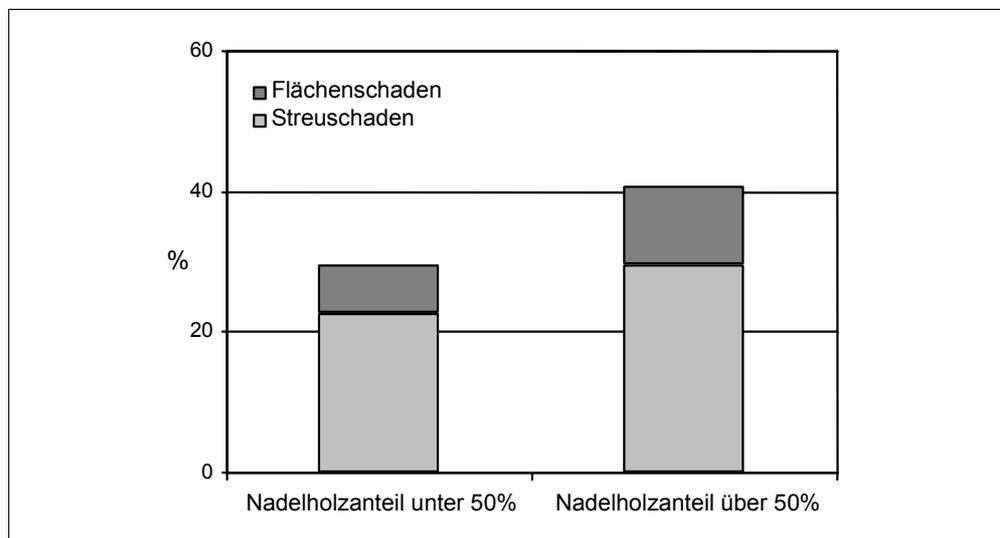
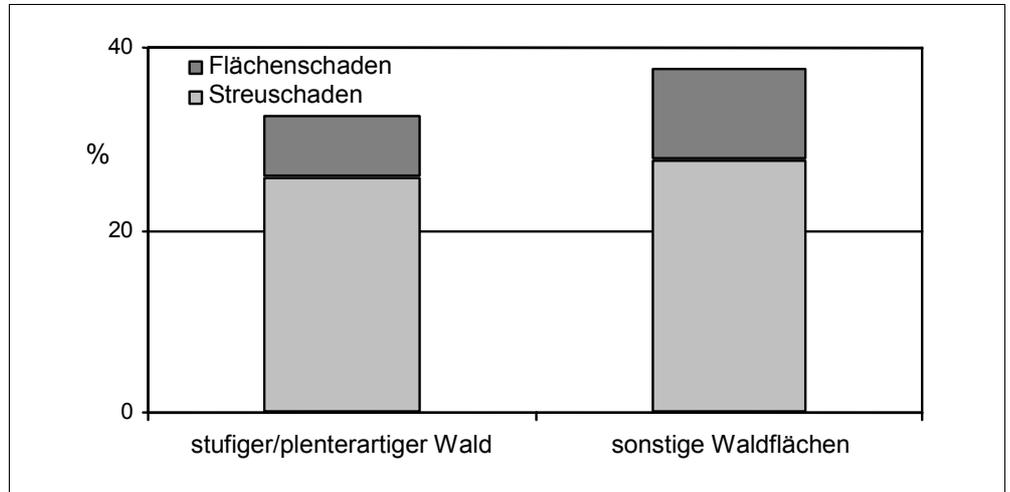


Abb. 7:
Nadelbaumanteil.

Bestandesstruktur

Bestände mit unterschiedlicher Bestandesstruktur zeigten nur geringe Unterschiede im Schadaufreten. Es gab praktisch keinen Unterschied zwischen einschichtigen und mehrschichtigen Beständen. Mehrschichtige Bestände mit unterschiedlichen Durchmessern (Plenterwälder) waren relativ selten und hatten fast so hohe Schäden wie einschichtige Bestände. Selbst bei einer Gruppierung nach Bestandeshöhe gab es kaum Unterschiede. Allenfalls scheinen Plenterwälder eher Streuschäden als Flächenschäden zu erleiden (Abb. 8).

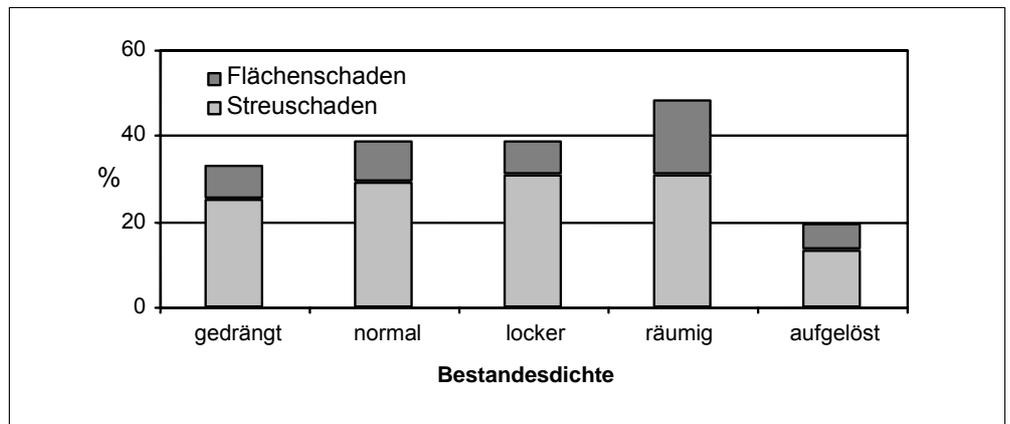
Abb. 8:
Bestandesstruktur.



Schlussgrad

Es gibt eine leicht Tendenz, dass offener Bestände mehr Schäden aufweisen. Jedoch ist diese Beziehung ziemlich schwach ausgeprägt (Abb. 9).

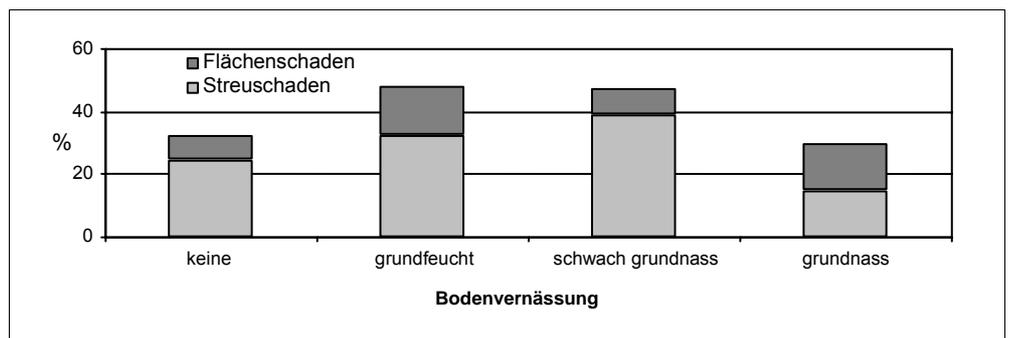
Abb. 9:
Schlussgrad.



Bodenvernässung

Stark vernässte Böden gab es nur sehr wenige, jedoch gilt je stärker ein Boden vernässt war, desto häufiger wurden die Schäden (Abb. 10). Nur die ganz stark vernässten Böden passten nicht ins Bild, jedoch waren hier zu wenige Flächen vorhanden, um eine ausreichende statistische Auswertung zu ermöglichen.

Abb. 10:
Bodenvernässung.



Bodengründigkeit

Mit der Bodentiefe stiegen die Schadenanteile an (Abb. 11). Zwar steigt auch die durchschnittliche Bestandesoberhöhe mit der Bodentiefe, doch scheint dies die ansteigenden Schäden nicht ausreichend zu erklären. Die Bodentiefe hängt auch mit der Neigung und Durchlässigkeit zusammen und kann nicht mit Durchwurzelungstiefe gleich gesetzt werden. Festzuhalten bleibt, dass vor Lothar der anhaltende Regen zu einer vollständigen Bodenwassersättigung geführt hatte. Eine grössere Bodengründigkeit führte demzufolge nicht zu einer besseren Verankerung.

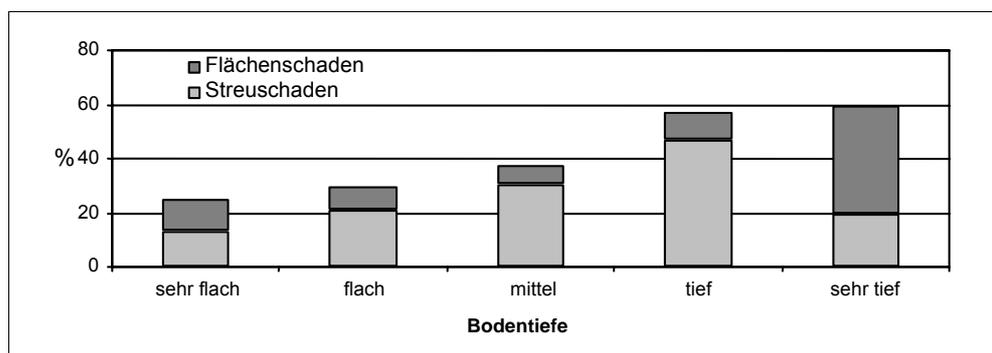


Abb. 11:
Bodengründigkeit.

2.2.4 Fichten und Tannen mehr als doppelt so häufig geschädigt wie Laubhölzer

Da die Einzelbaumergebnisse in den Teilgebieten und auf dem 4x4 km-Netz sich nicht unterschieden, wurden sie wegen der geringen Anzahl geschädigter Bäume zusammen ausgewertet. Fichten und Tannen waren deutlich häufiger geschädigt als andere Baumarten (Tabelle 1). Die Reihenfolge für die relative Schadhäufigkeit der Baumarten entspricht der, welche in den Stürmen von 1967 festgestellt wurde. Die Fichte wurde am häufigsten geschädigt, dicht gefolgt von der Tanne. Buchen und andere Laubhölzer waren weniger als halb so anfällig wie diese beiden Baumarten, was auch mit dem Schadholzvorkommen für die gesamte Schweiz übereinstimmt. Die Gründe dafür liegen zum einen an der im Vergleich zu Laubhölzern im Winter höheren Angriffsfläche der Nadelbäume, zum anderen an der geringeren Wurf- und Bruchfestigkeit dieser Baumarten. Daneben muss auch berücksichtigt werden, dass die beiden Arten im Durchschnitt grössere Baumhöhen aufweisen und insbesondere die Fichte zum Teil häufiger auf gefährdeten Standorten stockt als Laubbäume.

Tabelle 1: Relativer Schadenanteil (grösser 1 ist überdurchschnittlich, kleiner 1 unterdurchschnittlich) und Schadenart für die wichtigsten Baumarten.

Baumart	Anzahl geschädigter Bäume	Relativer Schadenanteil	Schadenart (%)			
			Wurf	Stockbruch*	Stammbruch	unbestimmt
Fichte	233	1,38	53	4	31	12
Tanne	82	1,22	56	4	24	16
sonst. Nadelholz	16	0,70	50	0	44	6
Buche	53	0,55	68	2	11	19
sonst. Laubholz	36	0,55	69	3	19	8

* Stockbruch wurde leicht unterschätzt, da er an genutzten Bäumen nicht separat erfasst wurde.

Bezüglich der Verteilung von Sturmwurf und Bruch unterschieden sich die Fichte und die Tanne nicht (Tabelle 1). An rund 10% der geschädigten Bäume (allesamt genutzt) konnte die genaue Schadenart nicht ermittelt werden. Es ist davon auszugehen, dass es sich hier um genutzte gebrochene Bäume handelt und Wurf als Ursache auszuschliessen war. Der minimale Anteil der Bäume mit Stammbrüchen (also ohne die unbestimmten Schäden) lag demnach bei den Fichten und Tannen bei über einem Drittel. Zählt man die unbestimmten Fälle zu den Stammbrüchen so erhöhte sich der Anteil dementsprechend auf ca. 45%. Von den Laubhölzern hingegen wurden ca. 70% geworfen. Ähnliche Ergebnisse wurden für den Sturm Vivian gefunden, während für die Stürme 1967 deutlich geringere Bruchprozente ermittelt wurden.

2.2.5 Multi-variate Auswertung

Klassifikationsbäume

Der Einfluss von Bestandesstruktur und Standort auf die Sturmschäden, welche die Stürme Vivian 1990 und Lothar 1999 verursachten, wurde durch die statistische Methode der Klassifikationsbäume untersucht. Mehr als 400 Flächen auf dem systematischen 4x4 km-Netz des Landesforstinventars und der Sanasilva Inventur wurden in der Region untersucht, welche von beiden Stürmen getroffen wurden.

Insgesamt wiesen 17% aller Flächen Schäden durch Vivian und 37% der Flächen Schäden durch Lothar auf. Mit Hilfe der binären Klassifikationsbäume wurden die Daten so unterteilt, dass möglichst viele Flächen korrekt als geschädigt oder ungeschädigt eingeteilt wurden. Nahm man 90% der Daten um das Model zu entwickeln und an den verbleibenden 10% zu testen und wiederholte diese Auswahl entsprechend 10 mal, so konnten für Vivian 80% und für Lothar 65% der Fälle korrekt vorhergesagt werden.

Für beide Stürme nahmen die Schäden mit der Bestandeshöhe, der Entwicklungsstufe der Bestände, dem Nadelholzanteil, der Bodenvernässung und der Bodentiefe zu (Abb. 12). Schäden waren höher auf Kuppen, in der Ebene oder schwach geneigten Hängen. Demgegenüber wiesen ungleich strukturierte Bestände weniger Schäden auf. Bei Vivian waren starke und mittlere Baumholzbestände etwa 3 mal so häufig geschädigt wie andere Bestände; reine Nadelholzbestände waren 2,5 mal so häufig geschädigt wie Mischbestände oder Laubwälder und Bestände auf vernässtem Standort doppelt so häufig als auf anderen Standorten. Für Lothar hatten Bestände mit vorherigen Vivianschäden und Nutzung innerhalb der letzten 5 Jahre vor dem Sturm deutlich höhere Schäden (Abb. 13).

Für beide Stürme waren die durch die Klassifikationsbäume gewählten Schadfaktoren sehr ähnlich. Mit den Vivianklassifikationsbäumen konnten 65% der Flächen nach Lothar und mit den Lotharklassifikationsbäumen 75% der Fälle nach Vivian korrekt bestimmt werden. Allerdings konnte der Unterschied in der Häufigkeit der Schäden zwischen Vivian und Lothar durch die Standortfaktoren nicht erklärt werden. Hier könnten eventuell Information zu Windgeschwindigkeit und Böigkeit Erklärungen liefern.

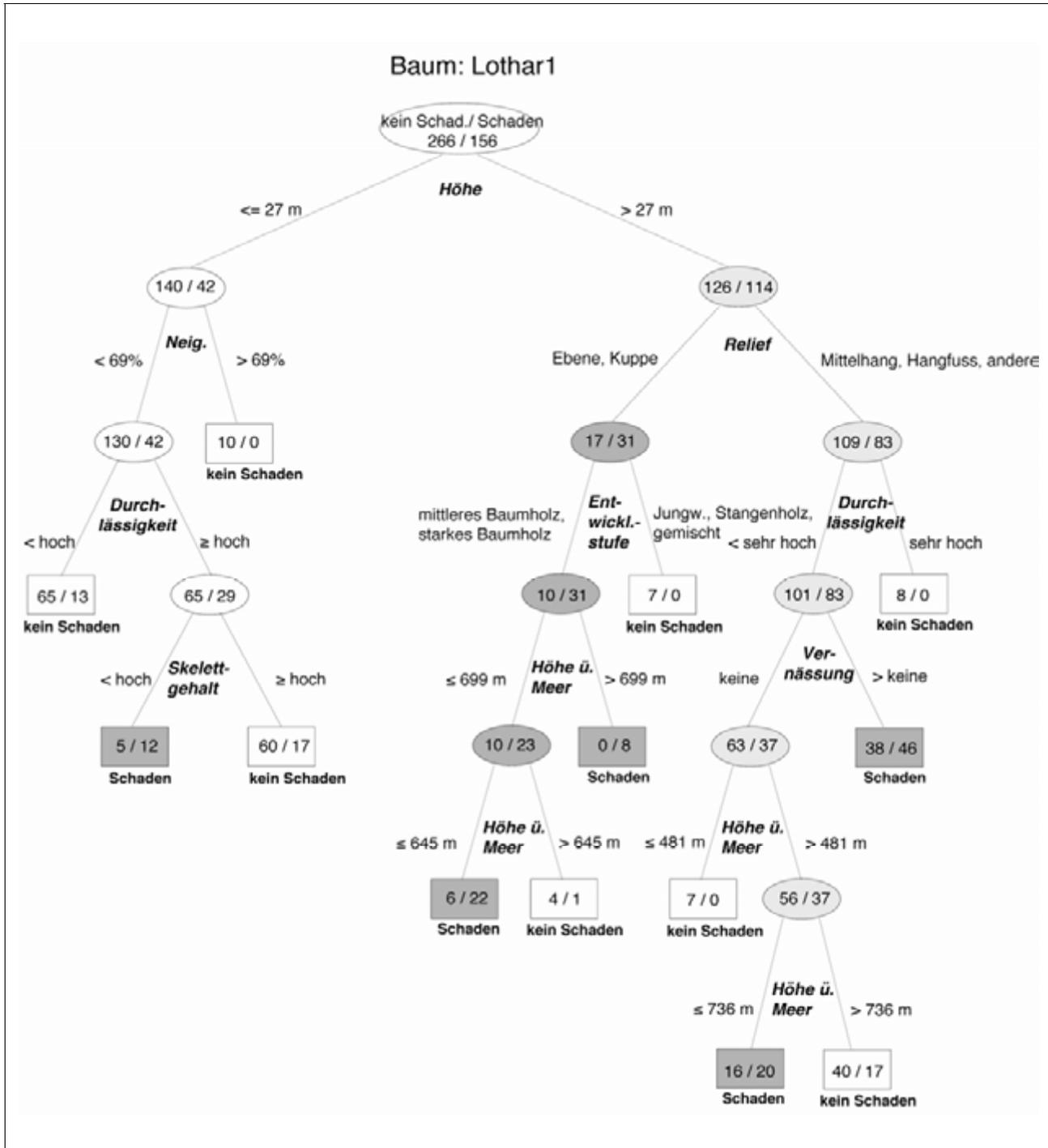


Abb. 12: Dichotomer Klassifikationsbaum für Lotharschäden (ohne die Variablen Nutzung und Vivian Schaden) mit Anzahl geschädigter und ungeschädigter Flächen, Variablen, an denen der Datensatz geteilt wurde, und der Stelle, an welcher der Datensatz geteilt wurde. Je höher die Verzweigung umso wichtiger ist sie. Verzweigungsknoten (oval): weiss = unterdurchschnittlicher Schaden, hell grau = überdurchschnittlicher Schaden, dunkel grau = mehrheitlich Schaden. Endblätter (eckig): weiss unterdurchschnittlicher Schaden.

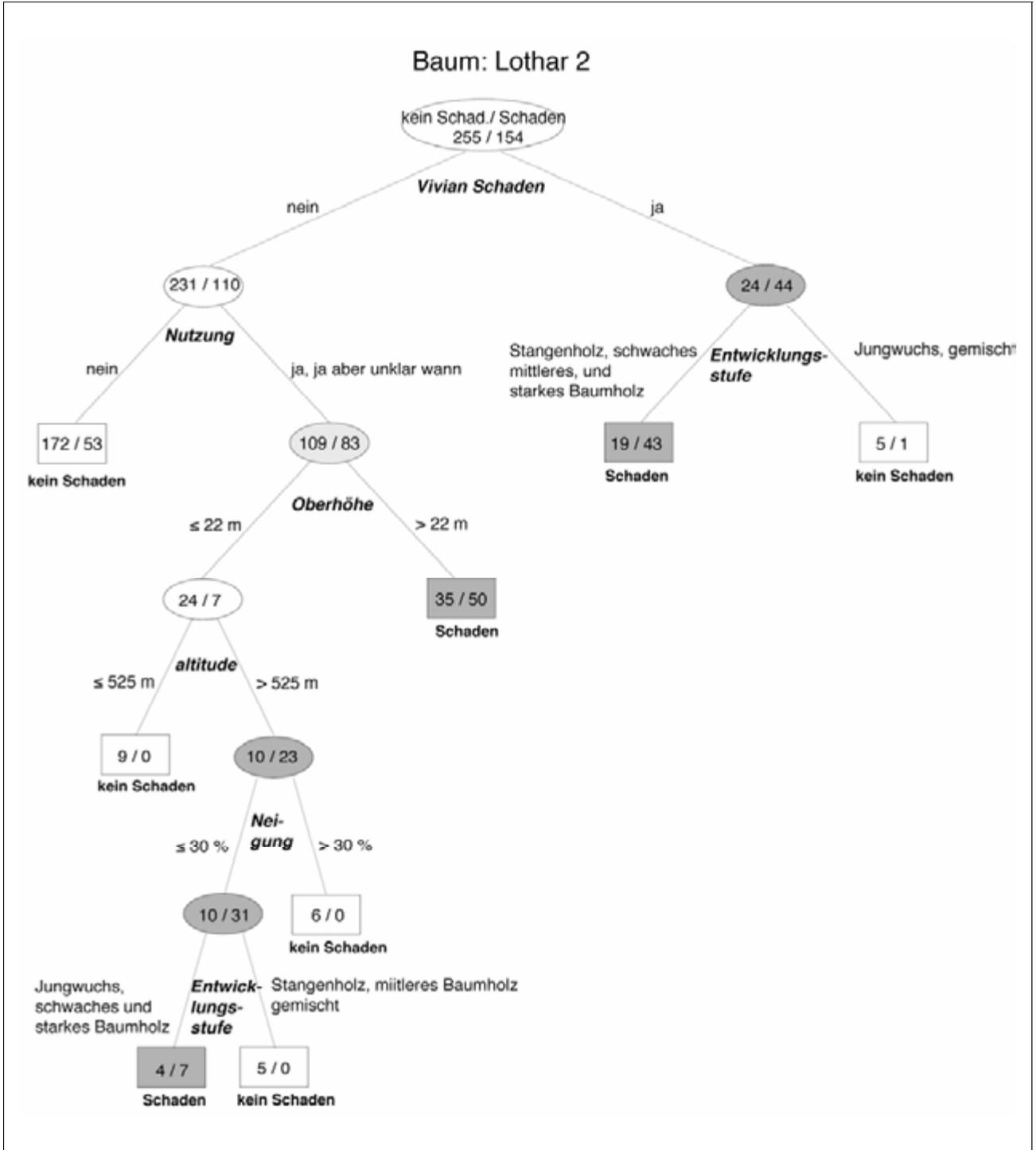


Abb. 13: Dichotomer Klassifikationsbaum für Lotharschäden (alle Variablen) mit Anzahl geschädigter und ungeschädigter Flächen, Variablen, an denen der Datensatz geteilt wurde, und der Stelle, an welcher der Datensatz geteilt wurde. Je höher die Verzweigung umso wichtiger ist sie. Verzweigungsknoten (oval): weiss = unterdurchschnittlicher Schaden, hell grau = überdurchschnittlicher Schaden, dunkel grau = mehrheitlich Schaden. Endblätter (eckig): weiss unterdurchschnittlicher Schaden.

2.2.6 Schlussfolgerungen

Auf den ersten Blick schien es, als war den stärksten Windgeschwindigkeiten kein Bestand gewachsen. Das mit steigender Windgeschwindigkeit die Schäden an allen Beständen steigen, ist sicherlich unbestritten. Doch zeigen die Auswertungen der Schäden auf den Sanasilva- und LFI-Flächen gleichwohl deutliche Unterschiede im Schadenausmass je nach Standort und Bestandesaufbau. So stieg der Anteil geschädigter Flächen mit der Bestandesoberhöhe und dem Nadelbaumanteil. Bestände mit vorangegangener Nutzung, mit früheren Vivian-Schäden, auf Kuppen, flach geneigten Hänge und in ebenen Lagen sowie auf tiefgründigen Standorten wurden häufiger geschädigt, stufige Bestände und Bestände mit nach Westen vorgelagertem Bestandesschutz dagegen weniger häufig.

Die terrestrisch erhobenen Daten eignen sich, um Beziehungen zwischen Bestandesparametern, Standort und Schäden zu untersuchen. Auf dem 4 x 4 km-Netz und den zwei Teilgebieten gab es ausreichend viele geschädigt und ungeschädigte Flächen, um grobe Zusammenhänge zu testen. Die meisten der gefundenen Korrelationen passen mit den in der Literatur beschriebenen überein.

Literatur

- BAZZIGHER G., SCHMID P. 1969: *Sturmschaden und Fäule*. Schweiz. Z. Forstwes. 120: 521–535.
- BOSSHARD W. 1967: *Erhebungen über die Schäden der Winterstürme 1967*. Schweiz. Z. Forstwes. 118: 806–820.
- DOBBERTIN M. 2001: *Erste Ergebnisse einer terrestrischen Erhebung von «Lothar»-Schäden*. Inf.Bl. Forsch.ber. Wald WSL 5: 6–7.
- DOBBERTIN M., KAENNEL DOBBERTIN M. 2001: *Inventaire des dommages de Lothar: Premières estimations*. La Forêt 4: 9.
- DOBBERTIN M. 2002: *Influence of stand structure and site factors on wind damage – Comparing the storms «Vivian» and «Lothar»*. Forest Snow and Landscape (Schoenenberger W., Fischer A., Innes J.L. (eds), Vivian's Legacy - impact of windthrow on forest dynamics) 77(1/2).
- DOBBERTIN M., SEIFERT H., SCHWYZER A. 2002: *Ausmass der Sturmschäden*. Wald und Holz 83 (1): 39–42.
- KÖNIG A. 1995: *Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald. Ein Erklärungs- und Prognosemodell*. Diss. Univ. München, Sauerländer's Verl., Frankfurt am Main.
- MAYER P., BRANG P., DOBBERTIN M., ZIMMERMANN S. 2003: *The relative importance of soil acidification and nitrogen deposition for storm damage in forests – methodological considerations and presentation of a broad scale study*. In RUCK B., KOTTMEIER C., MATTHECK C., QUINE C., WILHELM G. (eds.) 2003. Wind Effects on Trees. Proceedings, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 207–213.
- ROTTMANN M. 1986: *Wind- und Sturmschäden im Wald*. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. Main.
- SCHMID-HAAS P., BACHOFEN H. 1991: *Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen*. Schweiz. Z. Forstwes. 142: 477–504.
- SCHÖNENBERGER W., ANGST C., BRÜNDL M., DOBBERTIN M., DUELLI P., EGLI S., FREY W., GERBER W., KUPFERSCHMID ALBISETTI A.D., LÜSCHER P., SENN J., WERMELINGER B., WOHLGEMUTH T. 2003: *Vivians Erbe. Waldentwicklung nach Windwurf im Gebirge*. Merkbl. Prax. 36: 12 S.

2.3 Sturmschäden in Abhängigkeit vom Bestandesaufbau in einem Plenterwaldgebiet

2.3.1 Einfluss des Bestandes

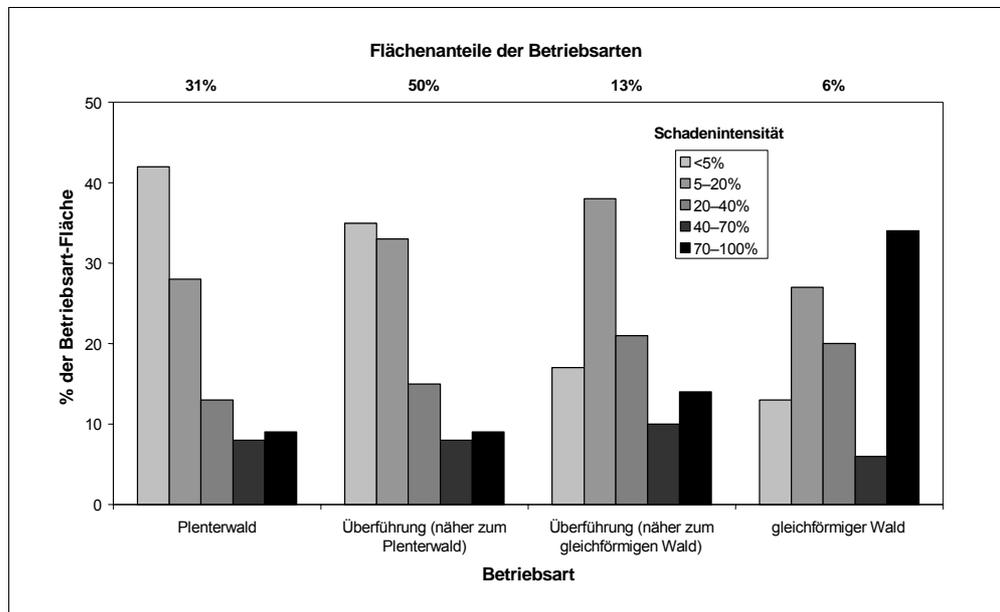
Der Orkan Lothar vom 26. Dezember 1999 hat auch in den ungleichförmigen Wäldern des Emmentals gewaltige Schäden verursacht. Diese wurden im rund 500 ha grossen Untersuchungsgebiet Schwarzenegg kleinflächig analysiert. Vor dem Sturm betrug der Vorrat 544 sv/ha mit 56% Tanne, 41% Fichte und 2% Buche. Der jährliche Zuwachs wird auf 12 sv/ha geschätzt. Der Zustand vor dem Sturm ist durch Standorts- und Bestandeskartierungen (Gliederung nach Plenterziffern) sowie durch eine erstmalige Kontrollstichprobeninventur aus der zweiten Hälfte der 90er Jahre gut dokumentiert. Die Sturmschäden wurden flächenbezogen durch Kartierungen und in den Kontrollstichprobenflächen baumweise in je fünf Schadenkategorien erfasst.

Je nach **Betriebsart** haben sich im Untersuchungsgebiet Schwarzenegg die Sturmschäden unterschiedlich ausgewirkt. Am stärksten sind gleichförmige Wälder betroffen, die allerdings in der ausgewerteten Waldfläche mit 30 ha oder 6% der Fläche nur schwach vertreten sind. Die Resultate der flächenbezogenen Erhebungen sind in Abb. 16 dargestellt. In den gleichförmigen Wäldern gibt es nur auf 13% ihrer Fläche keine Schäden (Schadenintensität unter 5% des Vorrates). Dagegen heben sie sich bei den Totalschäden (über 70% des Vorrates) mit 34% der Fläche von den anderen Betriebsarten ab.

Plenterwälder haben mit 42% den grössten Flächenanteil aller Betriebsarten in der Gruppe ohne Schäden. Bei den anderen Schadenintensitäten weisen sie gleiche oder niedrigere Werte auf als die Überführungsbestände und sind damit die stabilste Betriebsart.

Überführungsbestände mit plenterwaldähnlicher Struktur sind mehr von Schäden betroffen als Plenterwälder, aber weniger als Überführungsbestände mit dem gleichförmigen Wald ähnlicher Struktur. Die Unterschiede zwischen den beiden Überführungstypen sind besonders deutlich bei der Schadenintensität unter 5%, wo die plenterwaldähnlichen Bestände einen zweimal höheren Flächenanteil haben. Bei anderen Schadenintensitäten ist ihr Flächenanteil dagegen immer kleiner.

Abb. 16:
Flächenanteile der
Schadenintensität
(in % des Vorrats) nach
Betriebsarten.



Auch gemäss den Erhebungen in den Kontrollstichprobenflächen sind gleichförmige Bestände stärker beschädigt als plenterartige. Fast 40% des Vorrates bzw. 31% der Stammzahl ist in ihnen vernichtet oder sichtbar beschädigt. Überführungsbestände und Plenterwaldbestände sind volumenmässig mit nur 23% bzw. 22% und stammzahlmässig mit nur 18% bzw. 16% Beschädigung wesentlich weniger betroffen (Abb. 17).

Auch die Art der Schäden ist in gleichförmigen und plenterartigen Beständen verschieden. Während beim Plenterwald und beim Überführungswald 26 bzw. 22% der Stammzahl (17 bzw. 18% des Volumens) der Schäden durch Bruch entstanden sind, lag dieser Wert bei gleichförmigen Beständen mit 36% der Stammzahl bzw. 31% des Volumens deutlich höher (Abb. 18). Dieser Unterschied wirkt sich auf den Anteil geworfener Bäume aus. Dieser liegt im Plenterwald bei 53% der Stammzahl, in Überführungsbeständen bei 57% und in gleichförmigen Beständen bei 58% (nach Volumen 81%, 78% und 66%).

Der Anteil beschädigter Bäume, die weiter stehen bleiben können, ist in plenterartigen Beständen höher als in gleichförmigen Beständen. Volumenmässig ist er mit etwa 2% bei Überführungsbeständen am grössten. Stammzahlmässig ist ihr Anteil dagegen mit 8% in Plenterwäldern am höchsten.

Ein signifikanter Unterschied zwischen plenterartigen und gleichförmigen Beständen besteht beim Anteil der umgedrückten Bäume. Gleichförmige Bestände haben deutlich weniger solche Bäume. Allerdings sind die umgedrückten Bäume volumenmässig unbedeutend mit Anteilen um 1%. Stammzahlmässig haben umgedrückte Bäume grössere Anteile und der Unterschied zwischen plenterartigen und gleichförmigen Beständen wird deutlicher. Die Werte liegen im Plenterwald bei 12%, in Überführungsbeständen bei 13% und in gleichförmigen Beständen nur bei 3%.

Abb. 17:
Beschädigungsgrad nach Betriebsart. Die Fehleranzeige entspricht dem 95%-Vertrauensbereich.

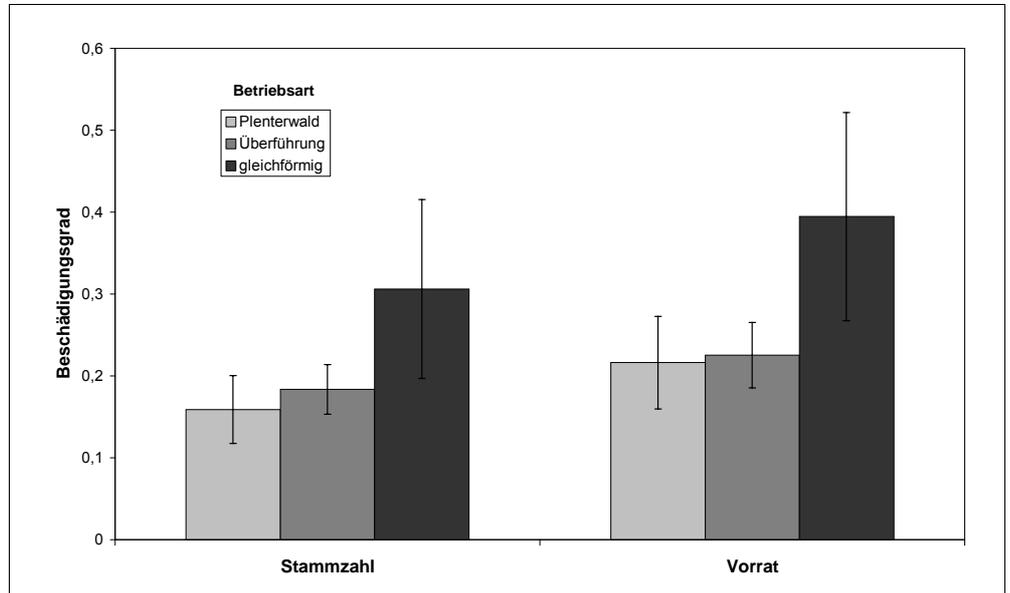
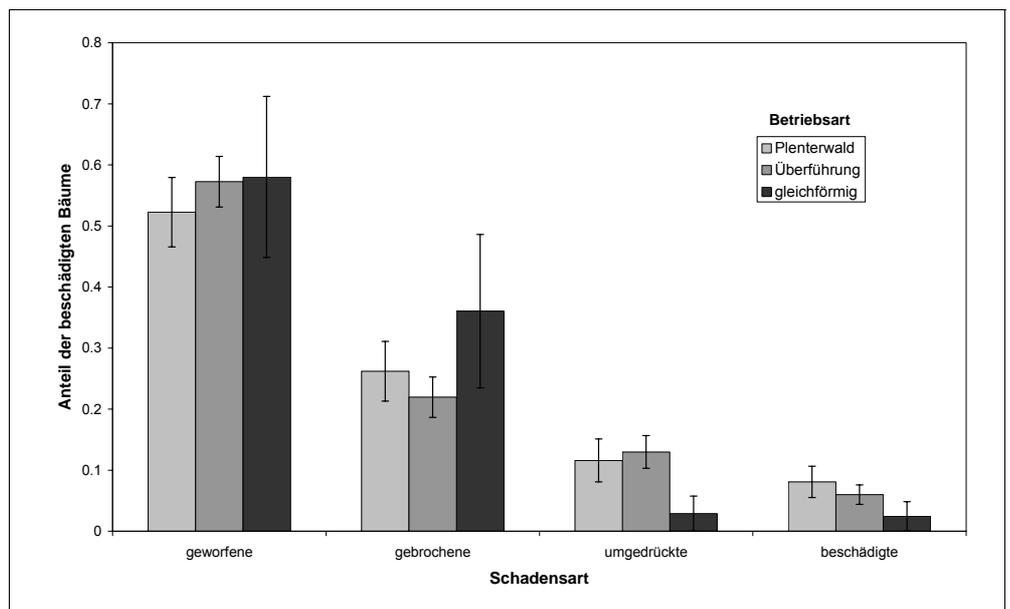


Abb. 18:
Anteil der beschädigten Bäume nach Schadensart und Betriebsart. Beispiel Stammzahl. Die Fehleranzeige entspricht dem 95%-Vertrauensbereich.



Die flächenbezogenen Erhebungen zeigen die Abhängigkeit der Schadenintensität von der **Plenterstruktur**. Im Untersuchungsgebiet ist eine neue Bestandeskartierung angewandt worden. Sie charakterisiert mit Hilfe von Plenterziffern die Verhältnisse in den plenterartigen Beständen. Die Plenterziffer ist aus vier Plenterzahlen zusammengesetzt. Jede Plenterzahl umschreibt die Verhältnisse in einer Bestandesschicht (Ober-, Mittel-, Unterschicht und Jungwuchs).

Entscheidend ist die Plenterzahl der Oberschicht (Abb. 19). Bei optimaler Vertretung der Oberschicht (Plenterzahl 2) scheinen die Sturmschäden am kleinsten zu sein. Dies zeigt sich besonders im hohen Flächenanteil der nicht geschädigten

Fläche und in kleineren Flächenanteilen bei kleinen bis mittleren Streuschäden (5–40%). Dagegen spielt bei starken Schäden (40–70%) die Vertretung der Oberschicht keine Rolle. Bestände mit übervertreter Oberschicht (Plenterzahl 3) sind durch den Sturm am meisten betroffen. Sie haben den kleinsten Flächenanteil nicht beschädigter Fläche und den grössten Anteil Totalschadenflächen. Eine Zwischenstellung haben Bestände mit der Plenterzahl 1 (Oberschicht untervertreten). Resultate für Beständen mit der Plenterzahl 0 (= nicht vorhanden) sind wegen zu kleiner Fläche (1,2 ha) nicht aussagekräftig. Gleiche Resultate zeigen die Erhebungen in den Kontrollstichprobenflächen (Abb. 20).

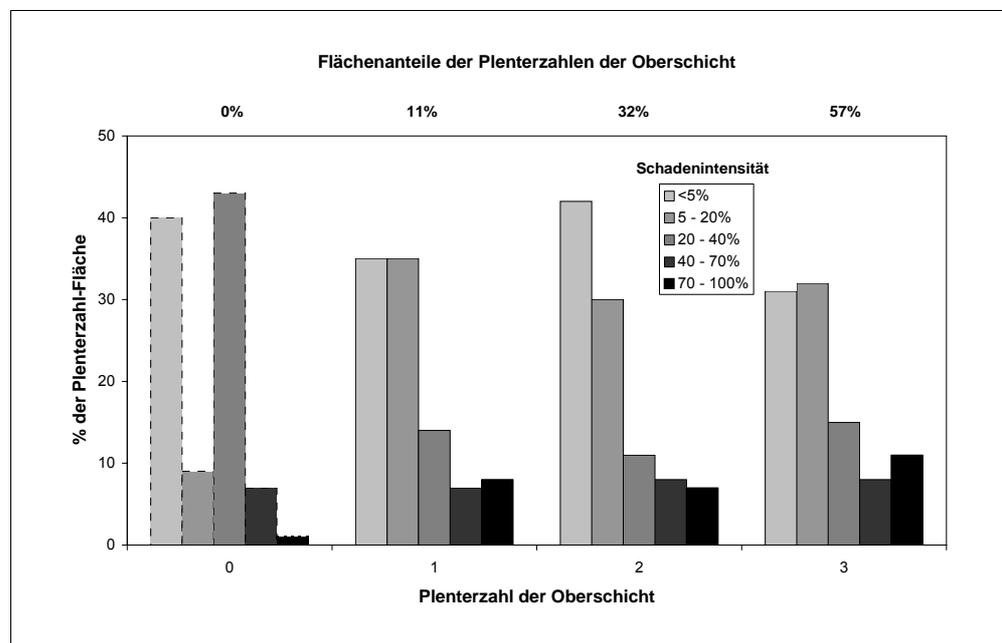


Abb. 19: Flächenanteile der Schadenintensität in Abhängigkeit von der Plenterzahl der Oberschicht. Nur plenterartige Bestände.

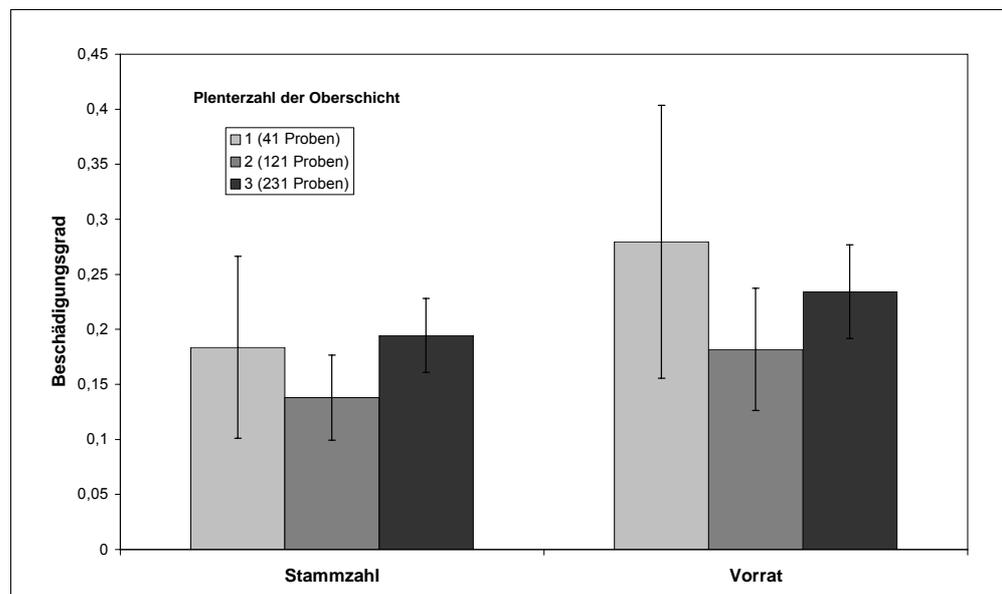


Abb. 20: Beschädigungsgrad in Abhängigkeit von der Plenterzahl der Oberschicht. Nur plenterartige Bestände. Die Fehleranzeige entspricht dem 95%-Vertrauensbereich.

Auch die Vorratshöhe hat einen Einfluss auf die Schäden in den plenterartigen Beständen. Wenn die Resultate in den einzelnen Kontrollstichprobenflächen gestützt auf die Bestandeskarte den drei Vorratsklassen niedrig, mittel oder hoch zugeordnet werden, so zeigen sich Abhängigkeiten gemäss Abbildungen 21 und 22. Den kleinsten Beschädigungsgrad haben Beständen mit mittlerem Vorrat (Abb. 21). Er liegt bei der Stammzahl bei 12% und beim Vorrat bei 19%. Bestände mit hohem Vorrat werden stärker betroffen und der Beschädigungsgrad liegt bei 19% bzw. 23%. Am grössten ist der Beschädigungsgrad bei Beständen mit niedrigem Vorrat. Er erreicht 25% bzw. 29%. Allerdings ist diese Schätzung unsicher, weil sie nur aus 16 Proben stammt und sich von den anderen Bestandestypen nicht signifikant unterscheidet. Auch die Unterschiede zwischen Beständen mit mittlerem und mit hohem Vorrat sind nicht signifikant.

In der Schadensart unterscheiden sich Bestände mit mittlerem und mit hohem Vorrat kaum (Abb. 22). Nur der Anteil der umgedrückten Bäume ist bei hohem Vorrat grösser und bei den beschädigten Bäumen, die weiter im Bestand stehen bleiben können, kleiner. Bei Beständen mit niedrigem Vorrat ist der Anteil gebrochener Bäume höher als bei den anderen Vorratsklassen. Die Unterschiede sind alle nicht signifikant.

Bei einer Stratifizierung nach der Vorratshöhe vor dem Sturm in den Stichprobenflächen zeigt sich ein anderes Bild. Die höchsten Schäden nach Stammzahl und Vorrat haben Probeflächen mit Vorräten um 300–600 sv/ha. Bei Vorräten unter 300 sv/ha und über 600 sv/ha ist der Beschädigungsgrad kleiner (abgesehen von den sehr hohen Werten bei den 19 Proben in der Vorratsklasse 100–200 sv/ha). Diese abweichenden Ergebnisse dürften auf die unterschiedliche Klassenbildung zurückzuführen sein. Zudem brauchen die Verhältnisse in den Probeflächen nicht jenen des umgebenden, meist inhomogenen Bestandes zu entsprechen.

Abb. 21:
Beschädigungsgrad in
Abhängigkeit von der
Vorratshöhe. Nur plente-
artige Bestände. Die
Fehleranzeige entspricht
dem 95%-Vertrauens-
bereich.

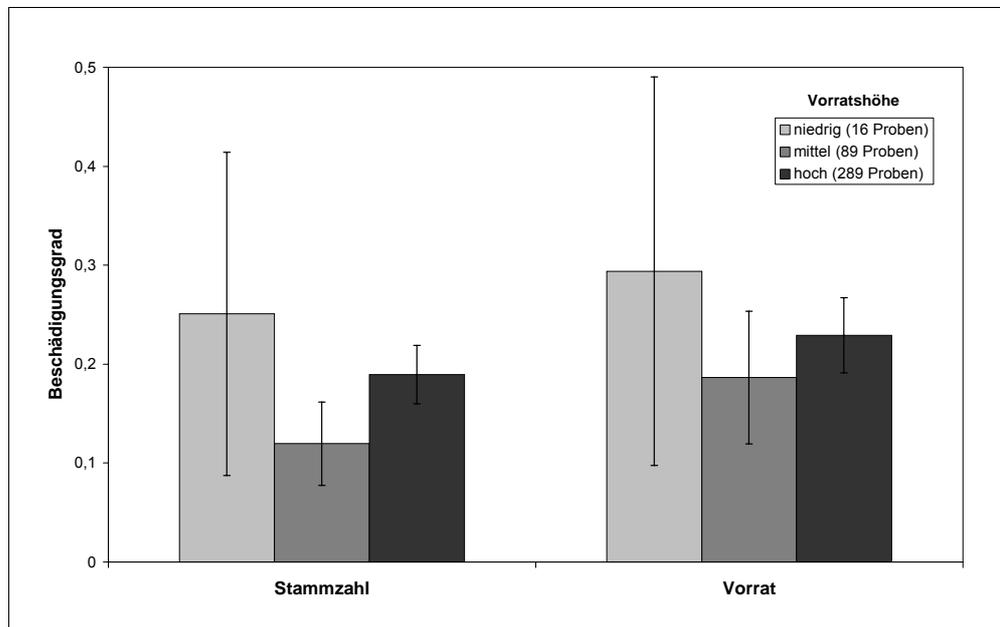
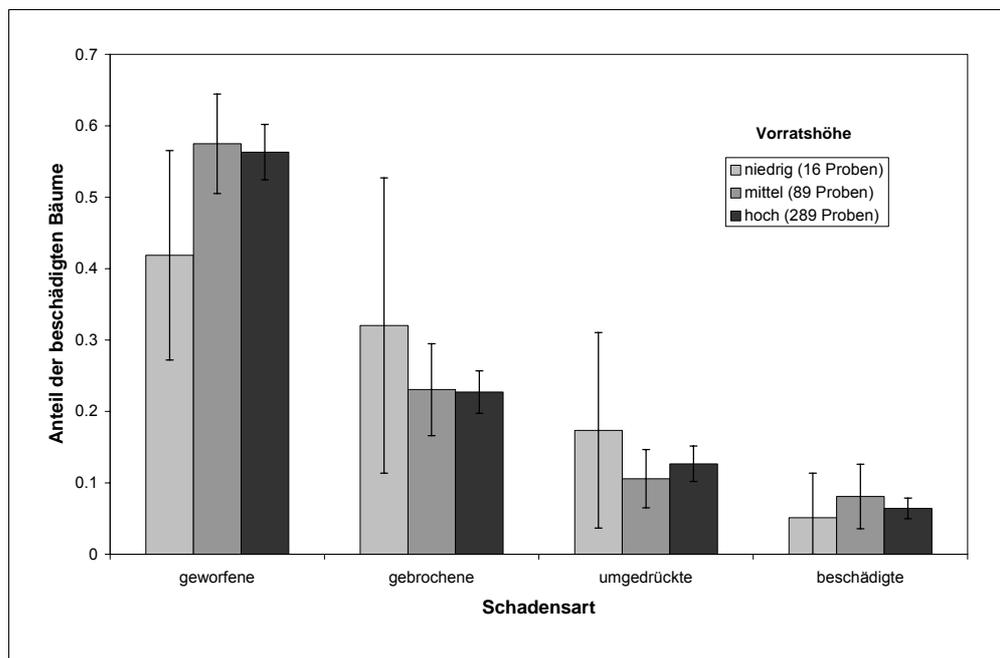


Abb. 22:
Anteil der beschädigten
Bäume in Abhängigkeit
von der Schadensart und
der Vorratshöhe. Beispiel
Stammzahl. Nur plente-
artige Bestände. Die
Fehleranzeige entspricht
dem 95%-Vertrauens-
bereich.



Aus der Sicht der **Risikoverminderung** gegenüber Sturmschäden sind Plenterwälder als reich strukturierte Mischwälder den gleichförmigen Wäldern vorzuziehen. Die Plenterwälder weisen allgemein geringere Schäden und kleinere Flächenanteile mit Totalschäden auf. Plenterwälder haben zudem einen kleineren Anteil an gebrochenen Bäumen als der gleichförmige Wald. Zur Risikoverminderung tragen plenterartige Bestände auch bei, weil in ihnen permanent auf der ganzen Fläche Verjüngungsprozesse ablaufen. Im Falle von Totalschäden im Plenterwald bieten

die verbleibenden Stangen aus der Unterschicht und der Jungwuchs wichtige Vorteile. Pflanzungen sind oft nicht notwendig und die differenzierten Jungwuchsgruppen ermöglichen und erleichtern die Bildung von strukturierten Beständen bereits in einem frühen Stadium.

Es zeigt sich, dass auch Überführungswälder stabiler sind als gleichförmige Wälder. Schon in einem frühen Stadium der Überführung, wo die Bestände dem gleichförmigen Wald noch sehr ähnlich sind, lässt sich ein Stabilisierungseffekt beobachten. Die Angst vor länger andauernden labilen Zuständen bei sachgerechter Überführung ist gestützt auf diese Untersuchung unbegründet.

Für das Schadensausmass sind das Plentergefüge und besonders die Verhältnisse in der Ober- und Mittelschicht wichtig. Die Ober- und Mittelschicht sollten möglichst den idealen Vorstellungen entsprechen. Je weiter sie davon entfernt sind, desto grössere Beschädigungsgrade sind zu erwarten.

Etwas weniger klar ist, bei welchen Vorratshöhen die Sturmempfindlichkeit am geringsten ist. Einerseits zeigen die Resultate dieser Untersuchung eine grössere Stabilität von Beständen mit mittlerer Vorratshöhe. Andererseits ist auf den guten Standorten im Untersuchungsgebiet je nach Auswertungsmethode auch bei Vorräten über 500 sv/ha nicht zwingend eine Destabilisierung festzustellen.

2.3.2 Einfluss der Baumarten

Im Untersuchungsgebiet Schwarzenegg ist die Baumartenzusammensetzung je nach Betriebsart unterschiedlich. In gleichförmigen Wäldern ist die Fichte mit etwa 60% der Stammzahl die Hauptbaumart. Die Tanne erreicht hier lediglich 35% und die Buche nur 2% der Stammzahl. Plenterartige Bestände weisen einen sehr hohen Tannenanteil auf, der sich um 60% der Stammzahl bewegt. Auch die Vertretung der Buche ist in ihnen mit 5% deutlich höher als in gleichförmigen Beständen. Überführungswälder unterscheiden sich von Plenterwäldern durch einen tieferen Tannen- und Buchenanteil.

In den plenterartigen Beständen ist die Baumartenzusammensetzung auch je nach Standort unterschiedlich. Der Fichtenanteil ist besonders auf Hochmooren und auf nassen Standorten gegenüber den anderen Standorten relativ hoch. Die Standortgruppen der mittleren und der reichen, frischen Standorte unterscheiden sich von den anderen Standortgruppen durch einen höheren Buchenanteil und den kleinsten Fichtenanteil.

Die Schäden betreffen in plenterartigen Beständen vor allem die Fichte. Etwa 22% der Stammzahl, die 29% des Volumens entsprechen, sind beschädigt oder zerstört. Signifikant kleinere Beschädigungsgrade als bei der Fichte lassen sich bei der Tanne mit 16% bzw. 18% und bei der Buche mit 12% bzw. 9% feststellen (Abbildung 23). Mit grösserem Durchmesser steigt bei allen drei Baumarten der Beschädigungsgrad an. Bei Fichte und bei Buchen mit kleinen Durchmessern ist diese

Zunahme grösser als bei der Tanne (Abbildung 24). Buchen der Oberschicht sind praktisch nie beschädigt.

Abb. 23:
Beschädigungsgrad der einzelnen Baumarten in plenterartigen Beständen. Die Fehleranzeige entspricht dem 95%-Vertrauensbereich.

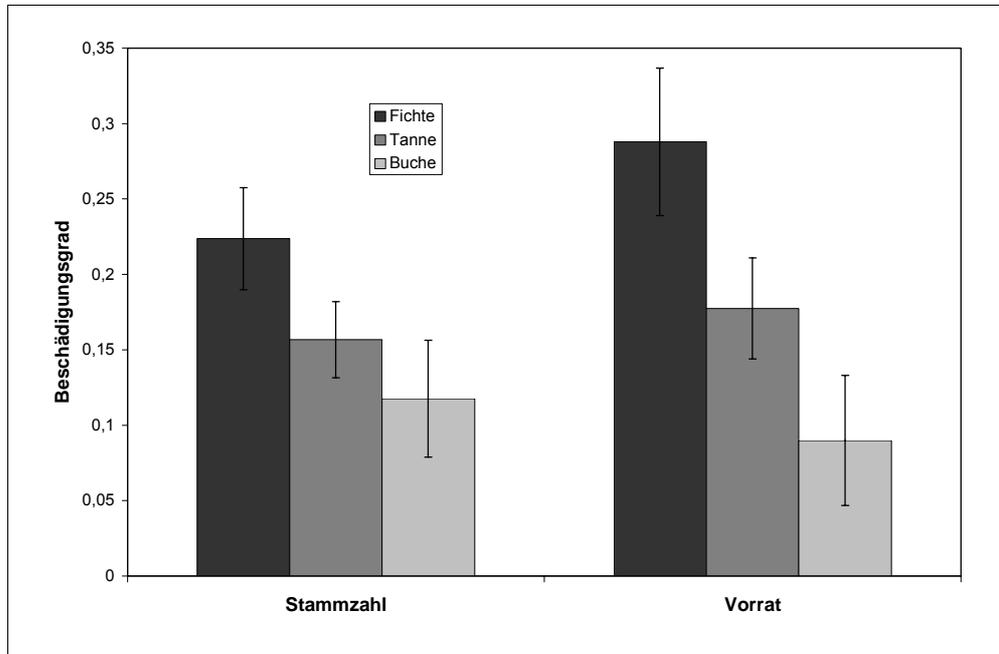
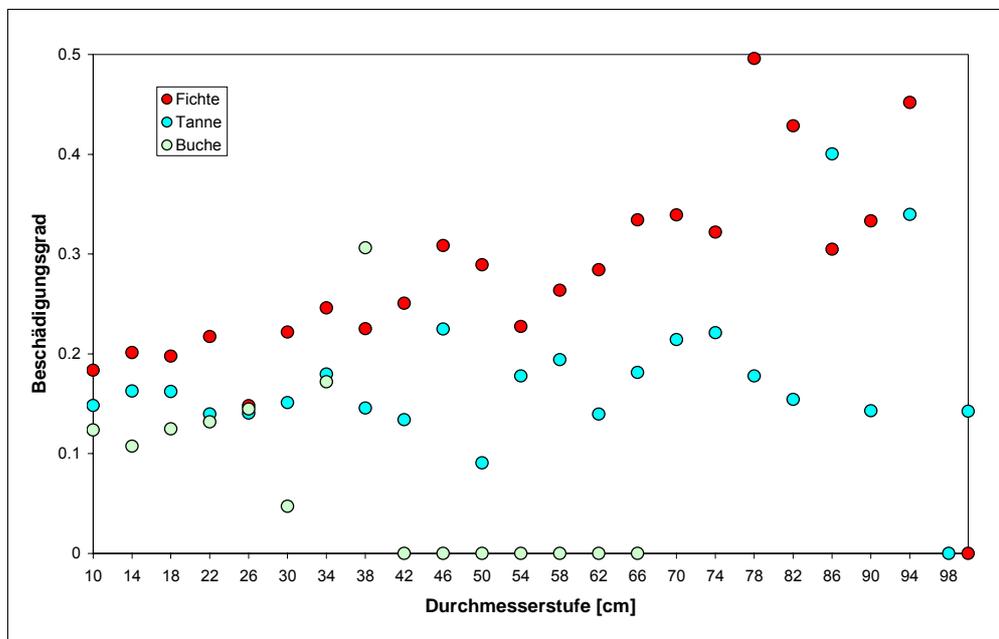


Abb. 24:
Beschädigungsgrad nach Baumart in den einzelnen Durchmesserstufen. Nur plenterartige Bestände.



In der Schadensart unterscheiden sich Fichte und Tanne kaum. Der stammzahlmässige Anteil der geworfenen Bäume bewegt sich um 58%, jener der gebrochenen Bäume um 24% und jener der umgedrückten um 12%. Dagegen sind bei der Buche die Schäden nur zu 18% durch Windwurf und zu 16% durch Windbruch entstanden. Die beschädigten Buchen (32% der Stammzahl) können meistens im Bestand stehen bleiben.

Buche in der Oberschicht erhöht die Stabilität des Bestandes gegen Sturmschäden. Ein Buchenanteil von mindestens 10% wäre im Untersuchungsgebiet auf nicht vernässten Standorten erwünscht. Auf feuchteren Standorten kann der Bergahorn diese Stabilisierungsfunktion übernehmen, sowie auf nassen Standorten in tieferen Lagen die Esche. Die Tanne ist in plenterartigen Beständen sturmfester als die Fichte. Deshalb sollte sie mindestens die gleiche oder noch besser eine höhere Vertretung haben als die Fichte (ausgenommen auf Hochmooren).

2.4 Wie wirken sich Fäulebefall an Stamm- und Wurzeln auf die Sturmempfindlichkeit aus und welche Erreger sind beteiligt?

Durch einen systematischen Vergleich des Fäulebefalls zwischen geschädigten und nicht geschädigten Fichten wurden die Zusammenhänge zwischen der Sturmwirkung und dem Fäulebefall untersucht. Die Resultate zeigen, dass die von Lothar geworfenen und gebrochenen Bäume grundsätzlich fauler waren als benachbarte, stehengebliebene Bäume. Bei Stockbrüchen wiesen 100% der Bäume Wurzel- oder Stockfäulen auf, bei Wurzelbrüchen waren dies 60%, bei Stammbrüchen 55% und bei den stehengebliebenen Fichten 48%. Dieser Befund lässt vermuten, dass die Fäulen die Sturmempfindlichkeit der Bäume erhöhten. Das Odds ratio zeigt, dass bei faulen Fichten das Schadrisiko 1,5 mal erhöht war. Der Anteil fäulebedingter Lotharschäden bei Fichte wird bei Streuschäden, die mehr als die Hälfte aller Schäden ausmachten, auf 22% geschätzt. Der Hallimasch (*Armillaria* sp.), der Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*) und der Nordische Porling (*Climacocystis borealis*) waren die häufigsten Erregerpilze.

2.4.1 Problemstellung

Krankheiten sind wichtige Störfaktoren im Ökosystem Wald, welche die Waldfunktionen und Waldentwicklung vielfältig beeinflussen können. Zu den ökonomisch und ökologisch bedeutendsten Krankheiten in unseren Wäldern gehören Stamm- und Wurzelfäulen (GRABER 1994). Neben der Holzqualität beeinträchtigen diese Krankheiten auch die Stabilität der Bäume. Untersuchungen, die nach den Winterstürmen 1967 und 1990 (Vivian) durchgeführt wurden, zeigten, dass ein grosser Anteil der sturmgeschädigten Bäume Stamm- und/oder Wurzelfäulen aufwiesen (BAZZIGHER und SCHMID 1969; SCHMID-HAAS und BACHHOFEN 1991). Beide Untersuchungen deuten darauf hin, dass Fäulen das Ausmass der Sturmschäden bei der Fichte wesentlich mitbestimmt haben. Bei beiden Arbeiten fehlte jedoch ein Vergleich mit stehengebliebenen Bäumen. Zudem wurden die Fäulen nicht näher charakterisiert, insbesondere wurde die Rolle der verschiedenen Fäuleerreger nicht beachtet.

Die, durch den Sturm Lothar verursachten Waldschäden, boten uns eine einmalige Gelegenheit diese Forschungslücken zu schliessen und Zusammenhänge zwischen Stamm- und Wurzelgesundheit und der Sturmempfindlichkeit aufzuzeigen.

2.4.2 Methodik

In diesem Forschungsprojekt sind wir von folgender Annahme ausgegangen: Falls Fäulen die Sturmempfindlichkeit erhöht haben, so sollten geschädigte Bäume mehr Stamm- und Wurzelfäulen aufweisen als vergleichbare, stehengebliebene Bäume. Um diese Hypothese zu prüfen, wurden vom Sturm Lothar geschädigte Fichten (Wurzelbrüche, Stockbrüche und Stammbrüche) mit benachbarten stehenden Bäumen bezüglich Fäulebefall verglichen.

Die Untersuchung wurde auf 47 Probeflächen mit Streuschäden im ganzen Bereich des Lothar-Schadengebiets durchgeführt. Dabei handelte es sich um Flächen, die auch im Projekt «BRANG et al.: *Zusammenhänge zwischen Bodenversauerung und Wurzelsysteme*» untersucht wurden. Geschädigte Fichten wurden in vier Schadarten (BAZZIGHER und SCHMID 1969; SCHMID-HAAS und BACHHOFEN 1991) eingeteilt (Abb. 1): (1) Stammbruch mit Bruchstelle höher als 0,5 m, (2) Stockbruch mit Bruchstelle tiefer als 0,5 m, (3) Geworfene Fichten mit Wurzelbruch (Hauptwurzeln) und (4) Wurf ohne Wurzelbrüche, wobei der ganze Wurzelteller ausgehoben wurde. Auf jeder Fläche wurden maximal drei Bäume von jeder Schadart und fünf stehengebliebene Kontrollbäume untersucht. Die Kontrollbäume wurden möglichst in unmittelbarer Nachbarschaft von den geschädigten Bäumen ausgewählt. Von den Bäumen wurden BHD, Baumlänge und astfreie Stammlänge bestimmt.

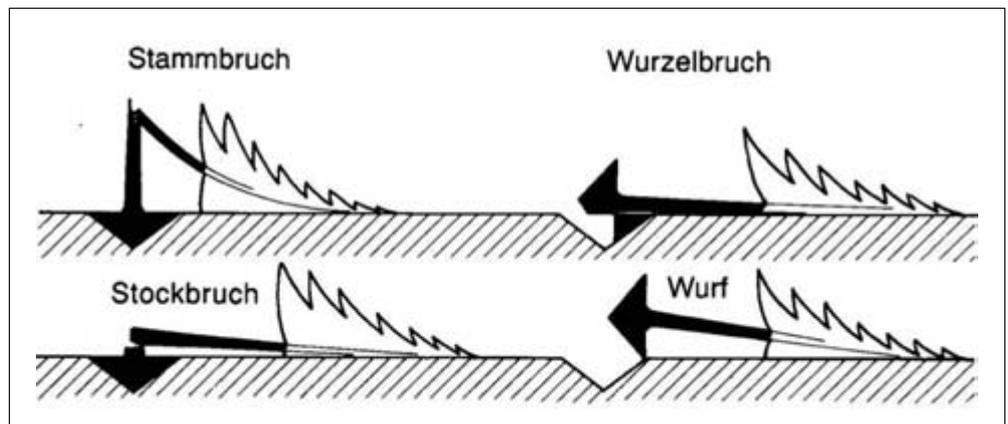


Abb. 1:
Schematische Darstellung der Schadarten.

Von jedem Baum wurden Bohrkern aus dem Stock und aus drei Hauptwurzeln entnommen und der Fäulebefall okular bestimmt (Schmid-Haas et al. 1997). Dabei wurden die Bohrkern in drei Klassen eingeteilt:

- gesund: Ganzer Bohrkern ohne Abweichungen in Farbe und Struktur.
- verfärbt: Teile des Bohrkerns zeigen gelbe bis dunkelbraune oder dunkelgraue bis fast schwarze Verfärbungen.
- faul: Teile des Bohrkerns zeigen deutlich veränderte Oberflächenstruktur oder sind schon aufgelöst.

Bei der Auswertung wurden die Klassen faul und verfärbt zusammengefasst und die Proben als faul klassiert. Holverfärbungen gehen häufig dem eigentlichen Fäulebefall voran und gelten als zuverlässiges Symptom für das Vorhandensein von Fäulen. Ein Baum wurde als faul klassiert, falls mindestens eine Bohrkernprobe faul oder verfärbt war.

Von faulen oder verfärbten Bohrkernen wurden Erregerpilze isoliert und die häufigsten Arten identifiziert.

2.4.3 Resultate

Fäulebefall und Sturmwirkung

Insgesamt wurden 211 geschädigte (Stammbruch 67; Wurzelbruch 112; Stockbruch 32) und 240 nichtgeschädigte Fichten auf 47 Probeflächen untersucht. Es zeigte sich, dass reine Würfe wie in Abb. 1 dargestellt, sehr selten waren (total 4), so dass diese Schadart in der Auswertung nicht berücksichtigt wurde. Die Fäuleansprache mit Hilfe von Bohrkernentnahmen ergab z.T. beträchtliche Unterschiede zwischen den Schadkategorien. Es zeigte sich ein klarer Trend zu mehr Fäulen oder Verfärbungen bei geschädigten Bäumen (Abb. 2). Der Anteil fauler/verfärbter Bohrkernproben resp. Bäume war am kleinsten bei den stehen gebliebenen Kontrollbäumen, gefolgt von Bäumen mit Stamm- und Wurzelbrüchen. Der höchste Fäuleanteil wurde bei Stockbrüchen (Bruchstelle tiefer als 0,5m) festgestellt.

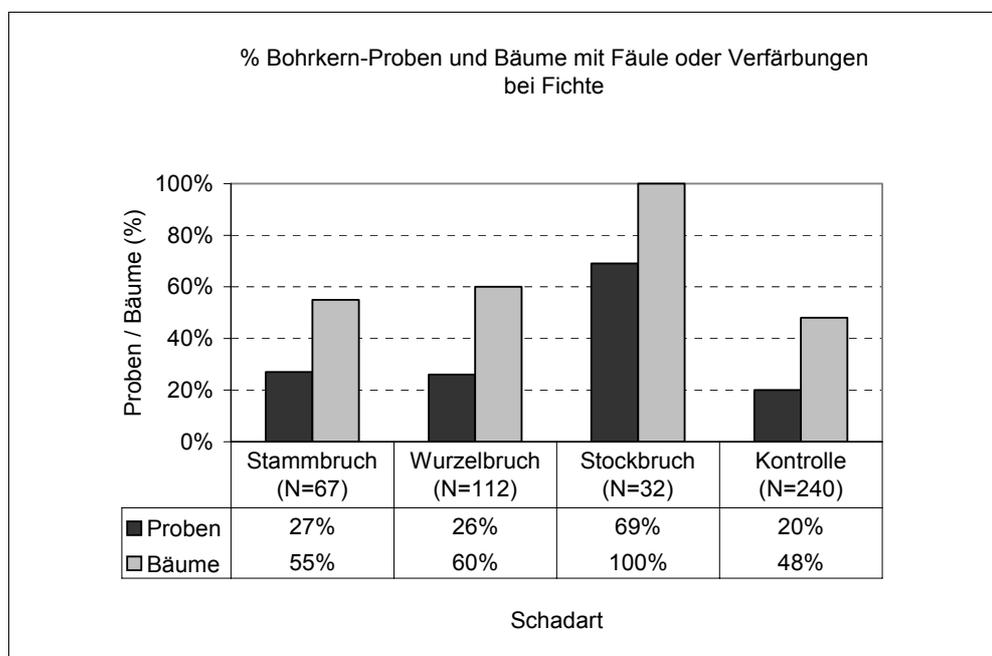


Abb. 2:
Prozentsatz der Bohrkern-
Proben resp. Bäume mit
Fäule oder Verfärbung.

Der Zusammenhang zwischen Fäulebefall und Sturmwirkung wurde mit logistischer Regression abgeklärt (Tab. 1). Diese Analyse zeigt hoch signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) im Fäulebefall zwischen Stockbrüchen und allen anderen Schadkategorien inkl. Kontrollen. Die Wurzelbrüche sind signifikant fauler ($p < 0,05$) als die Kontrollbäume. Keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) bezüglich Fäulebefall wurden zwischen Stammbrüchen und Kontrollen bzw. Wurzelbrüchen gefunden.

Tabelle 1: Vergleich des Fäulebefalls der Bohrkernproben zwischen verschiedenen geschädigten Bäumen mit logistischer Regression.

Scheffe Post Hoc Test	P-Wert
Stammbruch – Kontrolle	0,075
Stockbruch – Kontrolle	<0,001
Stockbruch – Stammbruch	<0,001
Wurzelbruch – Kontrolle	0,038
Wurzelbruch – Stammbruch	0,999
Wurzelbruch – Stockbruch	<0,001

Baumparameter

Bei den Felduntersuchungen sollten bezüglich Baumdimensionen möglichst vergleichbare Probestämme ausgewählt werden. Tabelle 2 zeigt, dass diese Vorgabe erreicht wurde. Die Mittelwerte des BHD und der Baumhöhe zeigten, mit einer Ausnahme keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schadarten. Einzig die Bäume mit Stockbrüchen wiesen signifikant kleinere Baumhöhen auf.

Tabelle 2: Mittelwerte der Baumparametern von geschädigten und nicht geschädigten Fichten.

Schadart	BHD (cm)	Höhe (m)
Stammbruch	53,0 a ¹	33,4 a
Wurzelbruch	52,5 a	34,9 a
Stockbruch	51,4 a	32,0 b
Kontrolle	53,5 a	35,2 a

¹ Mittelwerte, die mit dem gleichen Buchstaben versehen sind, sind statistisch nicht signifikant verschieden (ANOVA).

Fäulebefall und Schadrisiko

Als Mass für den Einfluss der Fäulen auf das Schadrisiko wurde für jede Schadart das Odds ratio aus einer 2 x 2 Tabelle (faul / nicht faul; Schaden / kein Schaden) berechnet (Tab. 3). Bei der Berechnung des Odds ratio für alle Schäden wurden die Daten der einzelnen Schadarten gemäss ihrem relativen Anteil am Gesamtschaden gewichtet. Die Odds ratios liegen bei allen Schadarten höher als 1. d.h. bei allen Schadarten besteht eine Risikoerhöhung durch Fäulen. Ausser bei den Stammbrüchen (95% Konfidenzintervall 0,77–2,27) sind diese erhöhten Werte statistisch gesichert. Insgesamt sind die Odds (Chancen) auf Sturmschaden bei faulen Fichten 1,5 mal höher als bei nicht faulen Fichten.

Tabelle 3: Odds ratio (Chancenverhältnis) auf Sturmschaden für faule im Vergleich zu nicht faulen Fichten bei den verschiedenen Schadarten.

Schadart	Relativer Anteil (%) ¹	Odds ratio	95% Konfidenzintervall
Stammbruch	35	1,32	0,77–2,27
Wurzelbruch	60	1,59	1,01–2,51
Stockbruch	5	∞	>>1 – ∞
Alle Schadarten	100	1,56	1,07–2,26

¹ Gemäss den Erhebungen von DOBBERTIN et al. 2002 ohne Berücksichtigung der unbestimmten Schadarten.

Fäulebedingter Schaden

Der Anteil fäulebedingten Schäden lässt sich wie folgt abschätzen: Aus den Erhebungen von DOBBERTIN et al. 2002 wird der absolute Anteil der Sturmschäden bei Fichte im Bereich des Lothar-Schadenperimeters auf 7,3% geschätzt (DOBBERTIN, pers. Mitteilung). Davon fallen 2,6% auf Stammbrüche, 4,4% auf Wurzelbrüche/Würfe und 0,3% auf Stockbrüche. Ohne Schaden sind 92,7% der Fichten. Unter Berücksichtigung der gefundenen Fäuleanteile bei jeder Schadart und bei den nicht-geschädigten Bäumen ergibt sich ein hypothetischer Sturmschaden ohne Fäulen von 5,7%. Der absolute Anteil fäulebedingter Schäden bei Fichten wäre demnach 1,6% (7,3%–5,7%) und der relative Anteil 22% (7,3/100*1,6). Diese Schätzung gilt in erster Linie für die in dieser Arbeit untersuchten Streuschäden, die jedoch häufig unterschätzt werden. Nach DOBBERTIN et al. 2002 machten Streuschäden mehr als die Hälfte aller Lotharschäden aus.

Erregerpilze

Von allen faulen oder verfärbten Bohrkernen wurde versucht, die Erregerpilze zu isolieren und zu bestimmen. Der Hallimasch (*Armillaria sp.*), der Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*) und der Nordische Porling (*Climacocystis borealis*) waren die häufigsten Erregerpilze (Tab. 4). Der Hallimasch dominierte bei den Wurzel- und Stockbrüchen und der Wurzelschwamm bei den Kontrollbäumen. Von den drei Erregerpilzen trat *C. borealis* am häufigsten bei Stammbrüchen auf.

Tabelle 4: Erregerpilze von Stamm- und Wurzelfäulen bei geschädigten und nicht geschädigten Fichten.

Schadart	Anzahl Fichten				Total
	Faul/verfärbt ¹	<i>Armillaria sp.</i> (Hallimasch)	<i>H. annosum</i> (Wurzelschwamm)	<i>C. borealis</i> (Nord. Porling)	
Stammbruch	37	1 (03%)	3 (08%)	6 (16%)	9 (24%)
Wurzelbruch	67	13 (19%)	9 (13%)	4 (06%)	24 (36%)
Stockbruch	32	16 (50%)	7 (22%)	8 (25%)	26 (81%)
Kontrolle	116	9 (08%)	15 (13%)	3 (03%)	27 (23%)
Total	182	39 (15%)	34 (13%)	21 (8%)	86 (34%)

¹ Bäume mit mindestens einem faulen oder verfärbten Bohrkern.

2.4.4 Schlussfolgerungen

In diesem Projekt wurde ein systematischer Vergleich des Fäulebefalls zwischen Sturm geschädigten und nicht geschädigten Fichten durchgeführt. Dies erlaubt Zusammenhänge zwischen Sturmempfindlichkeit und Fäulebefall bei Fichte abzuklären. Die Resultate zeigen, dass Fäulen die Schäden des Sturms Lothar erhöht haben. Dies zeigte sich deutlich bei Stockbrüchen, die praktisch nur bei faulen Fichten auftraten. Aber auch bei den häufigeren Wurzelbrüchen scheinen Fäulen eine Rolle zu spielen. Geworfene Bäume mit Wurzelbrüchen wiesen mehr Stock- und Wurzelfäulen auf als stehengebliebene Bäume, was vermuten lässt, dass die Fäulen die Stabilität der Bäume verminderten. Insgesamt ist das Risiko auf Sturm-schaden bei faulen Fichten 1,5 mal erhöht. Der Anteil fäulebedingter Streuschäden, die mehr als die Hälfte aller Sturmschäden ausmachten, wird auf 22% geschätzt. Stamm- und Wurzelfäulen stellen somit einen von mehreren Faktoren dar, der die Sturmempfindlichkeit von Bäumen beeinflusst.

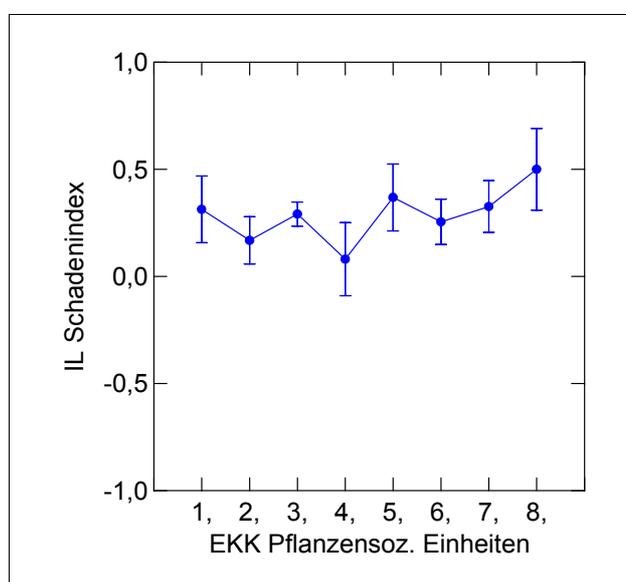
Literatur

- BAZZIGHER G., SCHMID-HAAS P. 1969: *Sturmschaden und Fäule*. Schweiz. Z. Forstwes. 120: 521–535.
- BAZZIGHER G., KANZLER E., FERLIN P., ZÜRCHER S. 1985: *Fäulebefall in Fichten- und Lärchenbeständen im Goms (Kt. Wallis)*. Schweiz. Z. Forstwes. 136: 493–497.
- DOBBERTIN M., SEIFERT H., SCHWYZER A. 2002: *Standort und Bestandesaufbau waren mitentscheidend für das Ausmass der Sturmschäden*. – Wald Holz 83, 1: 39–42.
- GRABER 1994: *Die Fichtenkernfäule in der Nordschweiz: Schadenausmass, ökologische Zusammenhänge und waldbauliche Massnahmen*. Schweiz. Z. Forstwes. 145: 905–925.
- SCHMID-HAAS P., BACHHOFEN H.-H. 1991: *Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen*. Schweiz. Z. Forstwes. 142: 477–504.
- SCHMID-HAAS P., BAUMANN E., HOLDENRIEDER O., KELLER W., RAMP B., STEPIEN E. 1997: *Infektionen der Stützwurzeln, Kronenverlichtung und Zuwachs bei Fichten und Tannen*. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 72: 129–244.

2.5 Standortseinflüsse

2.5.1 Standortseinfluss in der Studie im Reusstal-Limmattal

Der Standort scheint generell kein guter Indikator für die Sturmempfindlichkeit zu sein. Eine Ausnahme bilden nasse Standorte, wo aber empfindliche Baumarten wie die Fichte sowieso fehl am Platz sind. Auf nassen Standorten sind deshalb Fichten und, wahrscheinlich in ähnlichem Ausmass auch Weisstannen, zumindest in reiner Form, zu meiden.



Legende EKK:

1 saure, trockene VE (EK 1, 6a, 7c)	n= 14
2 mittl. saure/trockene Standorte (7/8 d und 7/8 aa)	n= 35
3 Typische GO-Fageten (EK 7/8 a)	n= 72
4 GO-Fageten auf pseudovergleyten Böden (7/8 aS)	n= 14
5 Eschenwälder (EK 26, 29,30)	n= 8
6 leicht basisch – zentral – leicht trocken (EK 7/8 ef)	n= 24
7 leicht basisch – leicht feucht (EK 7/8 g)	n= 19
8 basisch (EK 9,11,12)	n= 5

Abb. 3:

Varianzanalyse zw. dem Schadensindex IL (prozentualer Lochflächenanteil) und den Klassen der pflanzensoziologischen Einheiten (EKK) nach Ellenberg und Klötzli (EK) für die Fichtenbestände.

Sehr merkwürdig sind die Ergebnisse der Empfindlichkeit für die zwei pflanzensoziologischen Einheiten nach Ellenberg und Klötzli 7a (*Galio odorati-Fagetum typicum*) und 7aS (*Galio odorati-Fagetum typicum* mit Waldziest). Die *Stachys sylvatica* Variante gilt als Indikator für staufeuchte Böden mit Hang zu Pseudovergleyung und somit als ungünstig für den Fichtenanbau. Unsere Ergebnisse zeigen, dass sich die Einheit 7aS tendenziell ($p < 23\%$) als weniger anfällig erweist als die 7a. Eine Braunerde mit Tendenz zu Pseudovergleyung scheint noch nicht zur Verminderung der Stabilität der Fichte führen.

Bodeneigenschaften

Es lassen sich keine klare Aussagen machen. Die Analyse der Bodeneigenschaften beschränkt sich auf die Variablen Wasserhaushalt und Gründigkeit gemäss Bodenkarte 1:25'000 (FAL 1996). Bei den Fichtenbeständen ist kein eindeutiger Trend zwischen dem Schadenindex (IL) und dem Wasserhaushalt (WH) zu erkennen (Abb. 3). Die grosse Mehrheit der Standorte weist eine normale Wasserführung auf. Für die Buchenbestände ist eine gewisse Tendenz zu zunehmenden Schäden bei gestörtem Wasserregime festzustellen, allerdings mit recht wenig Werten in diesen Klassen.

Von der Prädisposition her sind Bestände in bestimmten Lagen mehr gefährdet als andere. Das gilt in etwa für quer zur Windrichtung stehende Hänge, wahrscheinlich auch für Plateaulagen.

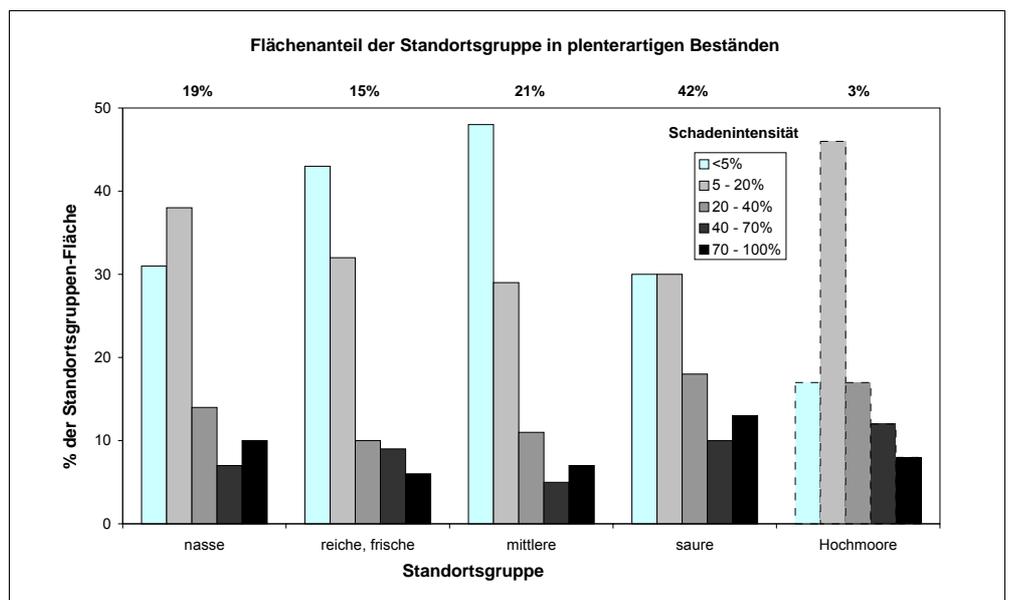
Die Unterschiede nach Standortgruppen sind relativ klein. Am stärksten betroffen sind die sauren und die nassen Standorte, am wenigsten die mittleren und die reichen, frischen Standorte

Peter Bachmann
Lubor Dvorak

2.5.2 Standortseinfluss im Plenterwald

Gemäss den flächenbezogenen Erhebungen sind in den plenterartigen Beständen im Untersuchungsgebiet die Unterschiede zwischen den einzelnen Standortgruppen entgegen den Erwartungen relativ klein. Am stärksten ist die Standortgruppe der sauren Standorte, die meistens in Plateaulagen vorkommt, betroffen. Von den mittleren Streuschäden (20–40%) bis zu Totalschäden ist sie die relativ am meisten geschädigte Standortgruppe. Stark betroffen ist auch die Standortgruppe der nassen Standorte. Im Gegensatz zu den sauren Standorten ist ihr Flächenanteil bei den kleinen Streuschäden (5–20% Schadenintensität nach Vorrat) grösser, bzw. bei mittleren Streuschäden bis Totalschäden (20–100%) kleiner. Die Standortgruppe der Hochmoore weist den kleinsten Flächenanteil bei den nicht geschädigten Flächen (0–5%) auf. Sie ist aber sehr stark durch kleine bis starke Streuschäden (5–70%) betroffen. Am wenigsten durch die Sturmschäden betroffen sind die Standortgruppen der mittleren und der reichen, frischen Standorten. Der Unterschied zwischen diesen zwei Gruppen liegt hauptsächlich beim höherem Flächenanteil nicht beschädigter Fläche und beim kleineren Flächenanteil starker Streuschäden (40–70%) für mittlere Standorte. Bei anderen Schadenintensitäten sind diese beiden Standortgruppen ungefähr gleich betroffen (Abbildung 9).

Abb. 9:
Flächenanteile der
Schadenintensität
(in % des Vorrats) nach
Standortgruppen. Nur
plenterartige Bestände.



Es lässt sich auch kein grosser Einfluss des Standortes auf die Schadensart nachweisen. Der Anteil der gebrochenen Stämme ist bei allen Standortsgruppen etwa gleich und liegt zwischen 20 und 25% der beschädigten Bäume. In der Standortsgruppe der mittleren Standorte kann ein relativ grosser Anteil (13% in der Stammzahl) der beschädigten Bäume weiter im Bestand stehen bleiben. Dies drückt den Anteil der geworfenen Bäume in dieser Standortsgruppe nach unten. Bei den Hochmooren ist ein relativ kleiner Anteil von umgedrückten Bäumen festzustellen. Dies ist wahrscheinlich durch eine geringe Vertretung der Unterschicht in dieser Standortsgruppe bedingt.

Im Untersuchungsgebiet Schwarzenegg spielt das Relief für das Schadensausmass eine entscheidende Rolle. Jede Kontrollstichprobenfläche wurde einer von vier Reliefkategorien zugeordnet. Den grössten Beschädigungsgrad (fast 25% der Stammzahl) haben Proben auf der Ebene. Danach folgen mit 18% Beschädigungsgrad Proben in Luv-Lage. Die kleinsten Beschädigungsgrade haben mit 15% bzw. 14% Proben in Lee-Lage oder auf den übrigen Seitenhängen. Für den Beschädigungsgrad nach Vorrat gilt die gleiche Reihenfolge, aber alle Werte sind höher (Abbildung 10).

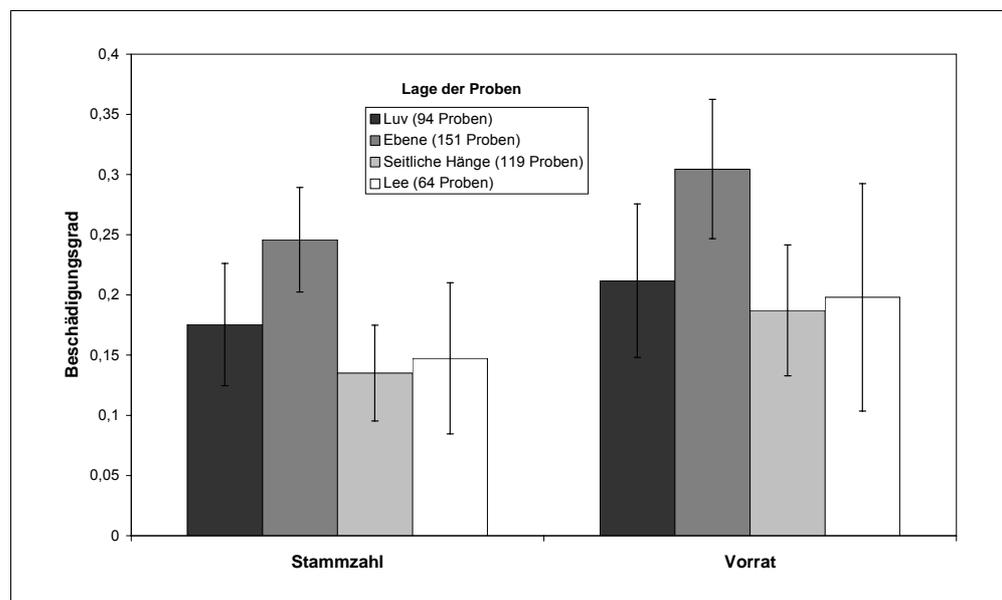
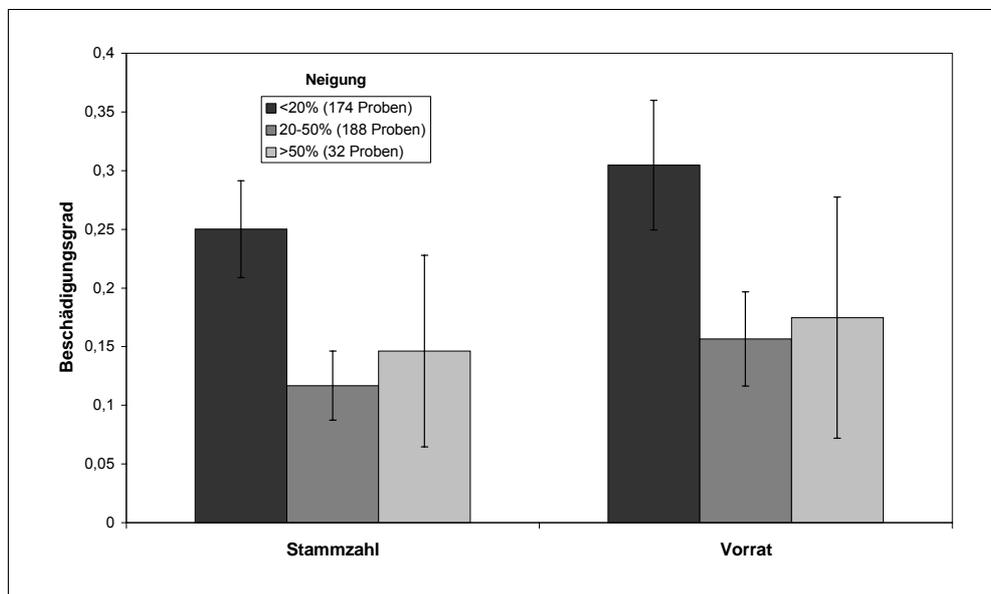


Abb. 10:
Beschädigungsgrad in
Abhängigkeit von der
Lage der Proben. Gesam-
tes Untersuchungsgebiet.
Die Fehleranzeige
entspricht dem 95%-
Vertrauensbereich.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Hangneigung für die Auswirkung von Sturmschäden eine wichtige Rolle spielt. Als Beispiel werden in Abbildung 11, die Ergebnisse aus den plenterartigen Beständen dargestellt. Die Resultate für das gesamte Untersuchungsgebiet sind fast identisch. Zwischen Proben in flachen Lagen (unter 20% der Neigung) und Proben in geneigten Lagen (Neigung 20–50%) sind grosse signifikante Unterschiede festzustellen. Flache Lagen sind deutlich stärker betroffen als geneigte Lagen. In steilen Lagen ist der Beschädigungsgrad etwas höher als in geneigten Lagen, wobei die Unterschiede nicht signifikant sind.

Auf die Schadensart hat die Lage der Proben keinen grossen Einfluss.

Abb. 11:
Beschädigungsgrad in
Abhängigkeit von der
Hangneigung auf der
Probe. Nur plenterartige
Bestände. Die Fehleran-
zeige entspricht dem
95%-Vertrauensbereich.



Peter Brang unter Ver-
wendung von Beiträgen
von P. Mayer et al.

2.5.3 Bodenversauerung, Wurzelsystem und Sturmschaden

Vorbemerkung: Bei der Wertung der Ergebnisse ähnlicher Studien ist zu berücksichtigen, auf welche Grundpopulation und Region sich die Ergebnisse beziehen, wie weit sie extrapolierbar sind, und wie robust die Resultate sind. Dies scheint mir besonders wichtig bei Studien, die räumlich nur ein kleines Gebiet abdecken und bei denen einige Straten nur wenig repräsentiert sind.

Welche Bedeutung haben Baumform und Wurzelausbildung für die Sturmresistenz von Bäumen?

Unter der Baumform wird die grobe Gestalt der oberirdischen Teile des Baumes, also von Krone und Stamm, unter Wurzelausbildung die des Wurzelsystems verstanden. Die Kronenform beeinflusst die Angriffsfläche eines Baumes für Wind, die Stammform die Fähigkeit des Baumes, Windbelastungen der Krone ohne dauerhafte Verformung auszuhalten und auf das Wurzelsystem zu übertragen, und die Wurzelausbildung die Festigkeit der Verankerung im Boden. Kronenform, Stammform und Wurzelausbildung sind damit mitbestimmend für die Sturmresistenz von Bäumen. Wie gross ihre relative Bedeutung im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren ist, ist Thema dieses Beitrages.

Dabei wird auf die Resultate des Forschungsprojekts «Bodenversauerung und Wurzelsystem» sowie auf eine Zusatzuntersuchung («Soil acidification, eutrophication, stand structure and site factors: Their impact on storm damage by Lothar and Martin 1999, SESS») und auf die Fachliteratur zurückgegriffen.

Im ersten Projekt wurden unmittelbar nach dem Sturm Lothar 384 geworfene Buchen, Fichten und Tannen der Oberschicht bezüglich Wurzelballen, Baumform und Bodenmorphologie, Wurzel- und Bodenchemismus charakterisiert. Diese

Erhebung fand in der Schweiz auf mittel- bis tiefgründigen Standorten ohne Stau-
nässe statt, mit Schwerpunkt auf bodensauren Standorten. In der Zusatzunter-
suchung wurde das Vorkommen von Sturmschäden auf 969 Standorten in Frankreich,
Süddeutschland und der Schweiz studiert (MAYER et al. im Druck). Dabei wurden
deren Abhängigkeit von bodenchemischen Eigenschaften, Windgeschwindigkeit,
Bestandesstruktur und Standortseigenschaften geprüft. Alle im Folgenden erwähn-
ten Zusammenhänge erwiesen sich in der statistischen Analyse als signifikant.
Nicht signifikante Zusammenhänge sind als solche gekennzeichnet.

**Baumform und
Sturmresistenz**

Messgrößen für die Baumform sind die Kronenlänge und der Schlankheitsgrad des
Stamms (h/d-Verhältnis). Ausser bei Extremwerten (ca. >100 in Altbeständen) ist
der Schlankheitsgrad kein geeigneter Indikator für die Sturmresistenz von Bäumen,
wohl aber für die Schneebruchresistenz (NIELSEN 1990, S. 233), die aber eher in
jüngeren Beständen von Bedeutung ist (ROTTMANN 1985).

Die Baumform ist für die Sturmresistenz im Vergleich zu anderen Einflussgrößen
wie der Baumart, der Baumhöhe, der Verankerung und den Bodeneigenschaften
deutlich weniger wichtig.

**Wurzelausbildung und
Sturmresistenz**

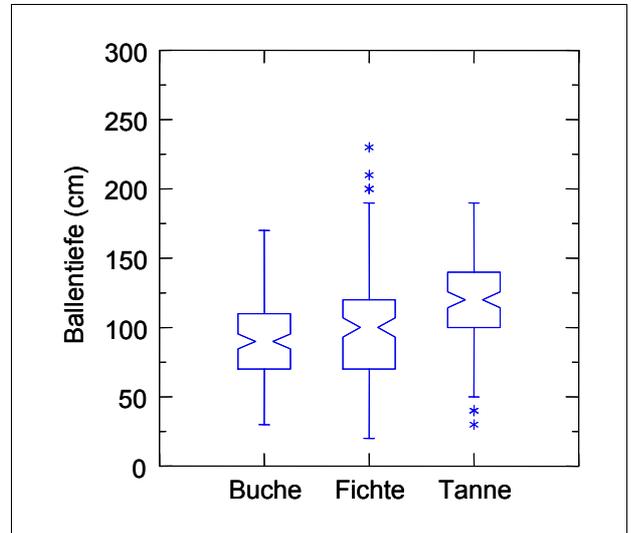
Messgrößen für die Wurzelausbildung sind die Bewurzelungstiefe, die horizontale
Reichweite der Wurzeln und die Ballenform (z.B. Wurzelballendurchmesser: Be-
wurzelungstiefe). Da der Beitrag der Feinwurzeln zur Verankerungsstabilität ver-
mutlich gering ist, beschränkt sich dieser Beitrag auf die Grobwurzeln, bzw. genau-
er auf Wurzelballen. Die Bewurzelungstiefe dürfte aber mit der Wurzelballentiefe
eng korrelieren, die horizontale Reichweite der Wurzeln mit dem Ballendurchmes-
ser. Dies zeigen die Beobachtungen an den 384 untersuchten Wurzelballen, denn
Grobwurzeln wurden nicht oft abgerissen (vgl. EICHHORN 1991 S. 119–130).

Ballentiefe

Die Ballentiefe ist baumartenabhängig: Tannen wurzelten insgesamt tiefer als
Fichten und Buchen (Abb. 1). Werden aber nur Bäume verglichen, die nebeneinan-
der auf dem gleichen Standort wuchsen, wurzelten Fichten bei gleichem Stammvo-
lumen signifikant tiefer (!) als Tannen (BRANG und BACHOFEN 2002).

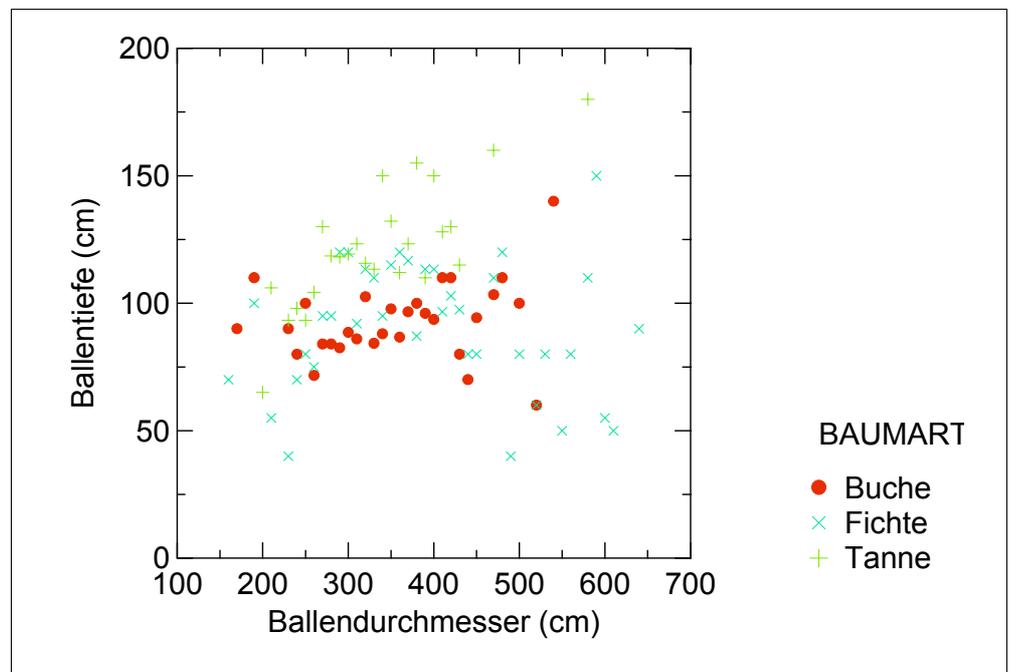
Auf tiefer gelegenen Standorten reichten die Ballen tiefer ($p < 0,0001$). Längere
Bäume hatten, am ausgeprägtesten bei Tanne, tiefer reichende Wurzelballen
($p < 0,0001$). Je schlanker die Stämme von Buchen ($p = 0,0258$) und Tannen
($p < 0,0001$), desto weniger tief reichte ihr Wurzelballen (bei Fichten war dieser
Effekt nicht signifikant, $p = 0,1919$). Das Ca/Al-Verhältnis in den Feinwurzeln, ein
Vitalitätsparameter, war nur in einem Modell, in dem auch der pH-Bereich über 6,5
eingeschlossen war, umso kleiner (die Feinwurzeln weniger vital), je tiefer die
Ballen reichten. Sonst zeigten wurzel- und bodenchemische Parameter keine Zu-
sammenhänge mit der Ballentiefe.

Abb. 1:
Ballentiefe (cm) von Buche,
Fichte und Tanne.



Die gefundenen Zusammenhänge zwischen Ballentiefe und oberirdischen Baumparametern waren, wie in der Untersuchung von EICHHORN (1991, S. 132), eher schwach. Interessanterweise waren Ballendurchmesser und Ballentiefe bei Buche und Fichte kaum korreliert; einzig bei Tanne zeigte sich eine positive Korrelation ($r=0,37$, $p<0,0001$, Abb. 2). Die Ballenform ist also sehr plastisch.

Abb. 2:
Korrelation zwischen
Ballentiefe und Ballen-
durchmesser bei Buche,
Fichte und Tanne.



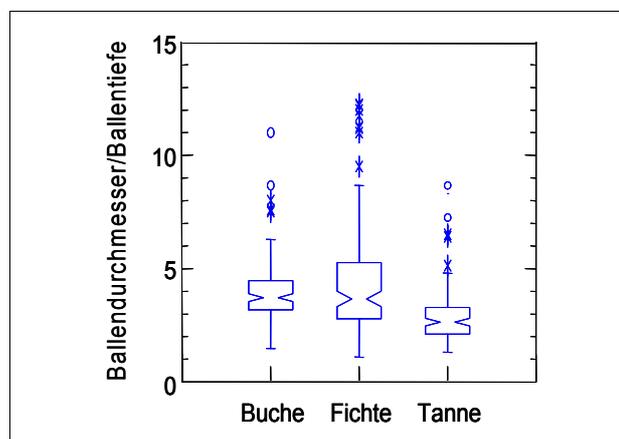
Ballendurchmesser

Der Ballendurchmesser hing je nach Baumart mit anderen Einflussgrößen zusammen. Bei Buchen waren die Ballendurchmesser umso größer, je größer der jährliche Volumenzuwachs ($p < 0,0001$) und je geringer die Porosität ist ($p = 0,0279$, $N = 61^1$, $r^2 = 0,42$). Bei Fichten waren die Durchmesser umso größer, je größer das Holzvolumen ($p < 0,0001$) und je größer der Radialzuwachs des Baumes in den letzten 20 Jahren war ($p = 0,0209$, $N = 96$, $r^2 = 0,22$). Bei Tannen sind die Durchmesser umso größer, je größer das Holzvolumen ist ($p < 0,0001$, $N = 100$, $r^2 = 0,36$). Andere Parameter hatten keinen Einfluss auf den Ballendurchmesser. EICHHORN (1991, S. 137) fand grössere Ballenflächen auf eutrophen als auf mesotrophen Standorten; dies kann nicht bestätigt werden. Es hätte sich z.B. in einem signifikanten Einfluss der Basensättigung zeigen sollen.

Verhältnis Ballendurchmesser zu Ballentiefe («Tellerförmigkeit»)

Tannen hatten deutlich kompaktere Ballen als Buchen und Fichten (Abb. 3). Das Verhältnis von Ballendurchmesser zu Ballentiefe war bei der Buche in einem Modell mit allen beprobten Bäumen umso größer (die Ballen also umso tellerförmiger), je höher ein Standort liegt ($p < 0,0001$), je höher das Ca/Al-Verhältnis in den Feinwurzeln ist ($p = 0,0007$) und je tiefer der pH der Feinerde ist ($p = 0,0020$, $N = 99$, $r^2 = 0,23$). Allerdings war in einem Modell ohne Buchen mit pH der Feinerde $< 6,5$ kein Effekt mehr signifikant. Der Zusammenhang mit dem pH der Feinerde war im ersten Modell also wegen Buchen signifikant, deren Feinerde im Abrissbereich einen pH von über 6,5 aufweist. Dieser Effekt kann somit nichts mit toxischen Aluminiumspezies zu tun haben.

Abb. 3:
Verhältnis Ballendurchmesser/Ballentiefe bei Buche, Fichte und Tanne.



Fichtenballen waren in einem Modell ohne Fichten mit $\text{pH Feinerde} \geq 6,5$ umso tellerförmiger, je dicker ihr BHD war ($p = 0,0005$), je weniger Holzvolumen oberirdisch sie aufweisen ($p < 0,0042$), je tiefer die Kationenaustauschkapazität der Feinerde ist ($p = 0,0275$) und je höher ihr Standort liegt ($p = 0,0001$, $N = 95$, $r^2 = 0,29$). Die ersten zwei Effekte scheinen gegenläufig; anscheinend haben kurz gewachsene Fichten (dicker BHD, geringes Holzvolumen) tellerförmige Wurzelballen. Ein Modell mit der Variablen h/d statt mit BHD und Holzvolumen bestätigt dies.

¹ Die Anzahl Buchen ist in diesem Modell so gering, weil die Porosität nicht für alle Bäume erfasst werden konnte.

Tannenballen waren in einem Modell ohne Tannen mit pH Feinerde $\geq 6,5$ umso tellerförmiger, je dünner ihr BHD war ($p=0,0002$) und je höher ihr Standort liegt ($p=0,0002$, $N=96$, $r^2=0,25$).

Verhältnis Holzvolumen zu Ballenvolumen («Spross-/Wurzelverhältnis») Das Verhältnis von Holzvolumen zu Ballenvolumen ist ein Indikator für das Spross-Wurzelverhältnis. Während das Holzvolumen (=Stammvolumen + Astderbholzvolumen + Reisigvolumen) mit den Eingangsgrößen Baumart, BHD, Baumlänge, Produktionsregion und Höhe ü.M. (Schätzfunktionen LFI) recht gut geschätzt werden kann, ist das Ballenvolumen mit den Eingangsgrößen Ballendurchmesser und Ballentiefe nur ungenau bestimmt (Annahme: $\text{Volumen}=0,7 \cdot \text{Zylinder}$).

Das Verhältnis von Stammvolumen zu Ballenvolumen war (in einem Modell mit allen Baumarten) umso grösser, je grösser die Baumhöhe ($p<0,0001$), je kleiner der Ballendurchmesser ($p<0,0001$) und die Ballentiefe ($p<0,0001$), je geringer die Porosität bei Fichte ($p=0,1016$) (die Wechselwirkung Porosität*Baumart hatte $p<0,0001$) und je grösser die Basensättigung der Feinerde ($p=0,0257$). Bei höherer Basensättigung in der Abrisszone des Ballens war also das Ballenvolumen relativ zum Holzvolumen gering.

Fazit aus den Ballenuntersuchungen Gesamthaft gesehen ergibt sich aus der Untersuchung der Wurzelballen kein Hinweis, dass Dimension und Form des Grobwurzelsystems von Buchen, Fichten und Tannen anders sind als in früheren Untersuchungen (EICHHORN 1991 und 1992, ZOTH und BLOCK 1992) festgestellt. Zudem lässt sich die auch bei Lothar nachgewiesene niedrigere Sturmempfindlichkeit der Buche nicht mit einer besonderen Ballenausbildung dieser Baumart erklären. Das Hauptresultat ist aber: Es ergibt sich kein Hinweis, dass Ballen von Buchen, Fichten und Tannen wesentlich vom Chemismus der Feinerde in der Abrisszone und vom Ca/Al-Verhältnis der Feinwurzeln zusammenhängen. Ein solcher Zusammenhang wäre zu erwarten gewesen, wenn wie anfangs vermutet in stark sauren Böden die Ballen oberflächlicher und/oder weniger tiefreichend wären als in weniger stark sauren Böden. Ein solcher Effekt lässt sich zwar auch mit den gefundenen Resultaten nicht ausschliessen. Doch diese lassen sich wie folgt interpretieren: Wenn in stark sauren Böden die Ballen oberflächlicher und/oder weniger tiefreichend sind, dann ist der Effekt nur schwach.

Die Kausalkette «versauernde Einträge \rightarrow (1) Bodenversauerung \rightarrow (2) Feinwurzelschädigung (v.a. in der Tiefe) \rightarrow (3) Konzentration der Feinwurzeln nahe der Oberfläche \rightarrow (4) Änderung der Ballenform und -grösse» ist zwar plausibel. Die vorliegende Untersuchung weist nun nach, dass zwischen dem zweiten Glied (Säurezustand des Bodens) und dem letzten Glied kaum ein Zusammenhang besteht. Dies könnte darauf beruhen, dass Zusammenhang (4) in der obigen Kette nicht zutrifft, obwohl alle anderen (mehrfach, z.T. auch für die Schweiz belegten) Zusammenhänge zutreffen. Mit anderen Worten: Die Bodenversauerung dürfte sich zwar auf die Feinwurzeln auswirken, aber nicht auf die Wurzelballen.

Es ist einschränkend anzumerken, dass diese Resultate für vernässte Böden nicht gelten, da diese absichtlich ausgeschlossen wurden; dort dürfte aber ohnehin der

Wasser- und Lufthaushalt für die Tellerförmigkeit von Wurzelballen massgebend sein und nicht der Bodenchemismus.

Erkenntnisse aus der repräsentativen Studie in Frankreich, Süddeutschland und der Schweiz

Mit logistischen Regressionen wurden die wichtigsten Faktoren für das Auftreten von Sturmschäden identifiziert (Tab. 1, MAYER et al. im Druck). Die Zielvariable war das Auftreten von Sturmschäden (ja/nein). Als signifikante Einflussgrössen erwiesen sich (neben dem ‚Land‘) der pH-Wert des Bodens, der Nadelholzanteil, die Hangneigung, die Humusform, die Bestandeshöhe und die Höhe ü.M. Alle anderen Faktoren waren nicht signifikant.

Tabelle 1: Ergebnisse der Logistischen Regressionsanalyse. Die abhängige Variable ist das Auftreten von Sturmschäden (ja/nein). Angegeben ist Pr(Chi). Signifikante Variablen sind mit * markiert.

Variable	p-Wert
Land	0,000*
Topographie	0,465
Höhenlage	0,012*
Exposition	0,063
Hangneigung	0,006*
Geschätzte Windgeschwindigkeit	0,343
Geschätzte N-Deposition	0,387
Geschätzte S-Deposition	0,493
Nadelholzanteil	0,001*
Bestandeshöhe	0,012*
Bodentyp	0,196
Säuregrad des Grundgesteins	0,213
Boden-pH (0–40 cm Tiefe)	0,000*
Bodentextur	0,121
Boden-Wasserhaushalt	0,286
Humustyp	0,007*

Höhere Sturmschäden bei tieferem pH

Das Ergebnis eines niedrigeren mittleren pH-Wertes auf Flächen mit Sturmschaden ist besonders überraschend. Der pH-Wert war bei der multivariaten Regressionsanalyse die Variable mit dem zweithöchsten Erklärungsbeitrag, und auch bei univariater Darstellung wird das Muster deutlich. Das verstärkte Auftreten von Sturmschäden auf Rohhumus stützt die Aussage, dass auf saurem Substrat die Bäume gefährdeter für Sturmschäden sind. Ein ähnliches Ergebnis, aber in noch stärkerem Ausmass, wurde von BRAUN et al. (2003) gefunden, nach denen bei geringer Basensättigung das Ausmass der Lothar-Sturmschäden höher war als bei hoher Basensättigung. In unseren Modellen trug die Basensättigung wesentlich weniger zur Erklärung der Sturmschäden bei als der pH-Wert in 0–40 cm Bodentiefe.

Ob die geringere Sturmresistenz der Waldbestände auf saureren Böden mit einer Feinwurzelschädigung durch Aluminium zusammenhängt, bleibt unklar. Denn auch wenn nur Flächen mit pH-Werten über 5 berücksichtigt werden, auf denen keine toxischen Aluminiumspezies freigesetzt werden, hatten die Flächen mit Sturmschaden einen tieferen pH als die Flächen ohne Schaden. Die Aluminiumtoxizität verursacht also den beobachteten Effekt möglicherweise bei tiefen pH-Werten; bei hohen pH-Werten muss es andere Ursachen geben.

Unwahrscheinlich ist, dass erhöhte Sturmschäden auf sauren Böden mit schlechterer Verankerung der Bäume erklärt werden können. Die Wurzelballenuntersuchung, die vernässte Böden ausschloss, deutet nicht in diese Richtung. Es könnte allerdings sein, dass in der länderübergreifenden Analyse Säurezustand des Bodens, Gründigkeit und Skelettgehalt zusammenhängen. Dann hänge der pH-Effekt zusammen mit dem Grundgestein, und würde durch anthropogene Versauerung allenfalls verstärkt.

Dass häufigere Sturmschäden bei tieferem pH nur eine Folge von Scheinkorrelationen sind, ist unwahrscheinlich. Von einer Scheinkorrelation spricht man dann, wenn die zwei untersuchten Variablen (in unserem Fall pH-Wert und Sturmschaden) gleichzeitig von einer dritten Variable abhängen, welche die eigentliche Ursache darstellt. So wäre es möglich, dass auf vielen Flächen mit niedrigem pH hohe Windgeschwindigkeiten auftraten und dass diese hohen Windgeschwindigkeiten die Ursache der Schäden sind, nicht aber niedrige pH-Werte. Eine andere Scheinkorrelation könnte durch die versauernde Wirkung von Nadelbäumen und ihre höhere Anfälligkeit für Sturmschäden (siehe nächstes Kapitel) verursacht sein. Nicht die beobachteten niedrigeren pH-Werte auf Flächen mit Sturmschaden wären dann die Schadenursache, sondern ein hoher Anteil von Nadelbäumen. Schliesslich könnten in grösserer Höhe die Windgeschwindigkeiten höher und die pH-Werte des Bodens (durch kühl-feuchtes Klima) niedriger sein. Dann wäre die Höhenlage die wichtigere erklärende Variable. Keine dieser möglichen Scheinkorrelationen ist nach unserer statistischen Analyse plausibel: Die Sturmschäden sind unmittelbar vom pH-Wert des Bodens abhängig. Es ist auch sehr unwahrscheinlich, dass die Windgeschwindigkeiten auf sauren Böden höher waren. Dies wäre in kleinen Untersuchungsgebieten denkbar, aber nicht in einer ganzen Region mit kleinräumig wechselnder Geologie.

**Weitere signifikante
Einflussvariablen**

Die anderen erklärenden Variablen für das Auftreten von Sturmschäden sind weniger überraschend wie der pH-Wert. (1) Laubbäume waren deutlich weniger schadenanfällig als Nadelbäume (siehe auch KÖNIG 1995, DOBBERTIN 2002). (2) Bei geringer Hangneigung waren die Schäden erhöht. (3) Mit zunehmender Bestandeshöhe stiegen die Schäden (KÖNIG 1995, DOBBERTIN 2002). (4) In Tieflagen waren die Schäden bei Lothar und Martin höher als in Hochlagen, weil diese v.a. die Tieflagen bestrichen.

Eine klare Antwort auf die Frage nach der Rolle von Schwefel- und Stickstoffeinträgen ist mit dieser Studie nicht möglich. Zwar wurden Sturmschäden besonders häufig auf Flächen mit saureren Böden (niedrigerem pH-Wert) festgestellt und Einträge von Schwefel- und Stickstoffverbindungen führen bekanntlich zu einer Versauerung. Aber Schwefel- und Stickstoffeinträge waren in der Regressionsanalyse ohne Bedeutung, und auf Flächen mit Schaden wurden auch univariat keine höheren Einträge beobachtet.

Zu bedenken ist dabei, dass der pH-Wert des Bodens in erster Linie vom Gesteinsuntergrund abhängt. Je nach Gesteinsuntergrund können Schwefel- und Stickstoffeinträge dann zu einer Versauerung führen, und zwar nur auf schlecht gepuffertem

Substrat mit einem von Natur aus schon relativ niedrigem pH. Auf solchen Standorten könnten Einträge versauernd wirkender Stoffe durchaus das Risiko für Sturmschäden erhöhen. Auf gut gepuffertem basischen Substrat (z.B. über Kalkstein) dagegen ist weder mit einer Bodenversauerung durch Einträge noch mit einer Erhöhung der Sturmschäden durch diese zu rechnen.

Welche präventiven Massnahmen sind möglich, um die Sturmresistenz zu erhöhen?

Aus den Untersuchungen ergibt sich über Baumform und Wurzelbildung nur eine beschränkte Einflussmöglichkeit auf die Sturmresistenz, auf jeden Fall eine wesentlich geringere als über die Baumartenwahl, die Bestandeshöhe und die räumliche Anordnung von Hiebsflächen.

Frühe Durchforstungen dürften die Grobwurzelentwicklung begünstigen (NIELSEN 1990), da diese rasch abgeschlossen ist und Wurzeltiefe und Baumgrösse positiv korrelieren. Nach NIELSEN (1990, S. 209) ist die Elastizität der Verankerungssysteme von Fichten – also deren Fähigkeit, ohne dauerhafte Verformung Windbelastungen zu widerstehen – zu rund 2/3 von Wurzelballenparametern abhängig, hingegen die Plastizität, also die Geschwindigkeit, mit der die Verankerungslösung fortschreitet, v.a. von Wurzelparametern. Der Anteil der Starkwurzeln am gesamten Stamm- und Wurzelvolumen von Fichten nimmt mit der Durchforstungsstärke erheblich zu (NIELSEN 1990, S. 16). Allerdings kann daraus nicht abgeleitet werden, dass stark durchforstete Fichtenbestände vergleichsweise sturmresistent sind; die kollektive Stabilität ist nämlich in locker bestockten Beständen gering, und die Rauigkeit des Kronendaches hoch (NIELSEN 1990, S. 239). Nielsen schlägt vor, früh stark zu durchforsten und die Bestände später nicht mehr zu durchforsten, also dicht zu halten. Dies würde auch Holzernteschäden im Baumholz vermeiden helfen. Allerdings steht diese Forderung teilweise im Widerspruch zur biologischen Rationalisierung, nach der auf Eingriffe in Jungbestände möglichst verzichtet werden soll.

Sturmprävention über eine Reduktion versauernd und eutrophierend wirkender Einträge scheint beim heutigen Kenntnisstand im Vergleich zu waldbaulichen Massnahmen (insbesondere Baumartenwahl) weniger wirksam. Hier ist aber der Kenntnisstand unbefriedigend. Die Ergebnisse lassen sich nur mit Hilfe von unbelegten Annahmen widerspruchsfrei interpretieren.

Literatur

- BRANG P., BACHOFEN H. 2002: *Kleiner Wurzelballen – grosser Lotharschaden?* Informationsblatt Forschungsbereich Wald 11:3.
- BRAUN S., SCHINDLER C., VOLZ R., FLÜCKIGER W. 2003: *Forest damages by the storm 'Lothar' in permanent observation plots in Switzerland: The significance of soil acidification and nitrogen deposition.* Water, Air, and Soil Pollution 142, pp. 327–340.
- DOBBERTIN M. 2002: *Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar.* Forest Snow and Landscape Research 77, 1/2, pp. 187–205
- EICHHORN J. 1991: *Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen der Frühjahrsorkane 1990 in Hessen.* Forschungsberichte der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt, 12: 92–155.
- EICHHORN J. 1992: *Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen in Hessen.* Forst und Holz, 47: 555–559.
- KÖNIG A. 1995: *Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald.* Ein Erklärungs- und Prognosemodell. Diss. Univ. München, Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main
- MAYER P., BRANG P., DOBBERTIN M., HALLENBARTER D., RENAUD J.-P., WALTHERT L., ZIMMERMANN S. (IM DRUCK): *Forest storm damage is more frequent on acidic soils.* Annals of Forest Science.
- NIELSEN C.C.N. 1990: *Einflüsse von Pflanzabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf die Biomassenverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte.* Schriftenreihe der forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, 100: 279 S.
- ROTTMANN M. 1985: *Wind- und Sturmschäden im Wald: Beiträge zur Beurteilung der Bruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung sturmgeschädigter Nadelholzbestände.* J. D. Sauerländers's Verlag, Frankfurt a.M.
- WSL & BUWAL (Eds.) 2001: *Lothar. Der Orkan 1999.* Ereignisanalyse. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Birmensdorf, Bern
- ZOTH R. & BLOCK J. 1992: *Untersuchungen an Wurzelballen sturmgeworfener Bäume in Rheinland-Pfalz.* Forst und Holz, 47: 566–571.

2.5.4 Einfluss der Bodenchemie auf Wurzelsystem und Sturmschäden

Wie beeinflussen die bodenchemischen Eigenschaften die Sturmempfindlichkeit der Bäume über die Veränderungen des Wurzelsystems?

Die Vitalität von Wurzeln und das Wurzelwachstum reagieren empfindlich auf eine zunehmende Bodenacidität bzw. eine erhöhte Konzentration von toxischen Aluminiumionen in der Bodenlösung (GODBOLD 1991, OLEKSYN et al. 1996, FLÜCKIGER & BRAUN 1999). Besonders entscheidend ist das molare Verhältnis der basischen Kationen Kalzium, Magnesium und Kalium zu Aluminium in der Bodenlösung. Unterschreitet dieses Verhältnis den Wert von eins, so nimmt das Risiko von Wachstumshemmungen zu (SVERDRUP und WARFVINGE 1993), besonders bei den Wurzeln (MATZNER und MURACH 1995). Auf versauerten basenarmen Standorten konnte denn auch festgestellt werden, dass sich die Wurzelbildung auf den humusreichen Oberboden verlagert, wo das Aluminium durch organische Säuren komplexiert wird, und die spezifische Wurzellänge abnimmt (PUHE 1994, JENTSCHKE et al. 2001, GODBOLD et al. 2003). Aber auch hohe Stickstoffkonzentrationen in der Bodenlösung hemmen das Wurzelwachstum. Bereits ab einer N-Konzentration in der Bodenlösung von ≥ 2 mg N/l nahm die Feinwurzelbiomasse von Fichten ab (MATZNER und MURACH 1995). Diese N-Konzentration in der Bodenlösung wird bei einer N-Fracht von ca. $25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ erreicht (DE VRIES et al. 2001) (zum Vergleich: in der Schweiz beträgt der mittlere N-Eintrag in Wälder $25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die genannten Befunde aus der Literatur konnten bei Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Sturm Lothar bestätigt werden.

- In 27 Walddauerbeobachtungsflächen wurden die Wurzeln von jungen Buchen komplett ausgegraben, freigewaschen und bildanalytisch untersucht. Die Ergebnisse wurden zusammen mit baumspezifischen Faktoren (Alter, Lichtgenuss, Gesamtbiomasse) sowie Standortfaktoren (Boden, modellierte atmosphärische Belastung) epidemiologisch ausgewertet. Es konnte eine signifikante Beziehung zwischen Basensättigung und dem Längenanteil an Feinstwurzeln ($<0,25 \text{ mm } \varnothing$) festgestellt werden (Abb. 4). Gleichzeitig nahm die Adventivwurzelbildung mit abnehmender Basensättigung zu (Abb. 5).
- Mit zunehmender Stickstoffdeposition wiesen die jungen Buchen in den Beobachtungsflächen einen abnehmenden Längenanteil von Feinstwurzeln ($\leq 0,25 \text{ mm } \varnothing$) auf (Abb. 6). Dieses Ergebnis konnte in einem N-Düngungsversuch experimentell bestätigt werden. In zwei Aufforstungen auf sauren Böden, die im Blocksystem während zehn Jahren mit verschiedenen N-Gaben behandelt worden waren, zeigten junge Buchen ab einer N-Düngung von $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, bei einer zusätzlichen atmosphärischen N-Deposition von $12,5$ bzw. $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, einen signifikant geringeren Längenanteil von Feinstwurzeln ($<0,25 \text{ mm } \varnothing$) (TOMOVA et al. 2003).
- In 35 von «Lothar» betroffenen Walddauerbeobachtungsflächen wiesen Buchen auf Böden mit einer Basensättigung von $\leq 40\%$ (0–40cm) ein 4,8mal höheres Windwurfrisiko auf als auf Böden einer Basensättigung von $>40\%$ (Abb. 7). Buchen mit erhöhten N-Blattspiegelwerten wurden ebenfalls vermehrt von «Lothar» geworfen (Abb. 8). Im Falle von 38 Fichtenbeobachtungsflächen war das

Windwurfisiko auf den basenarmen Böden 3,6mal erhöht. Eine Beziehung zum $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ war ebenfalls festzustellen, jedoch deutlich geringer (BRAUN et al. 2003).

Fazit

Die hohe Stickstoffbelastung aus Landwirtschaft und Verkehr und die erhöhte Bodenversauerung, die in der Schweiz zu 70% durch Stickstoffverbindungen verursacht wird, wirken sich negativ auf die Wurzelbildung aus. Die Folgen können erhöhte Risiken für Windwurf und Trockenstress sein.

Abb. 4:
Längenanteil der Feinstwurzeln an der gesamten Wurzellänge bei jungen Buchen aus 27 Waldbeobachtungsflächen in Beziehung zu der über die obersten 40 cm gemittelten Basensättigung im Boden ($p < 0,001$).

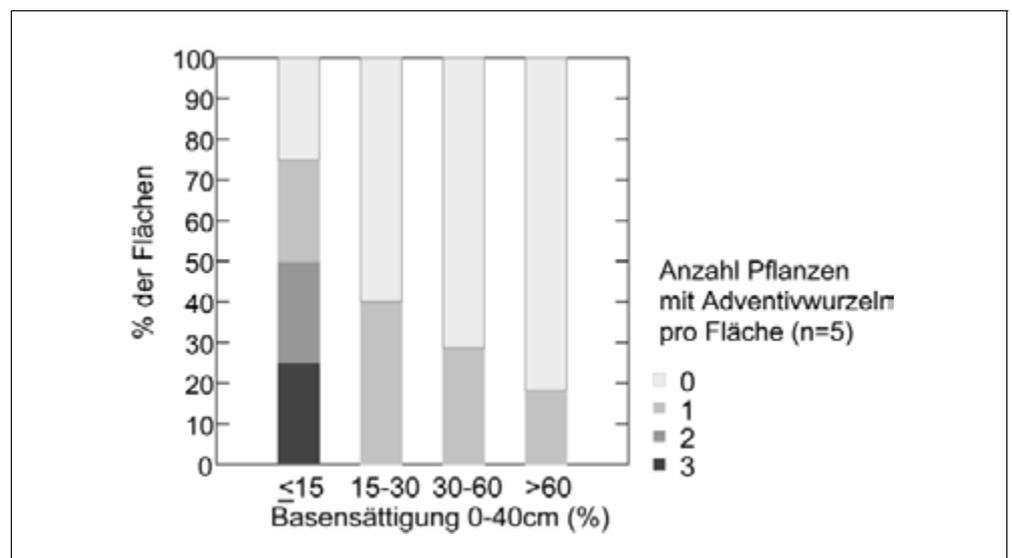
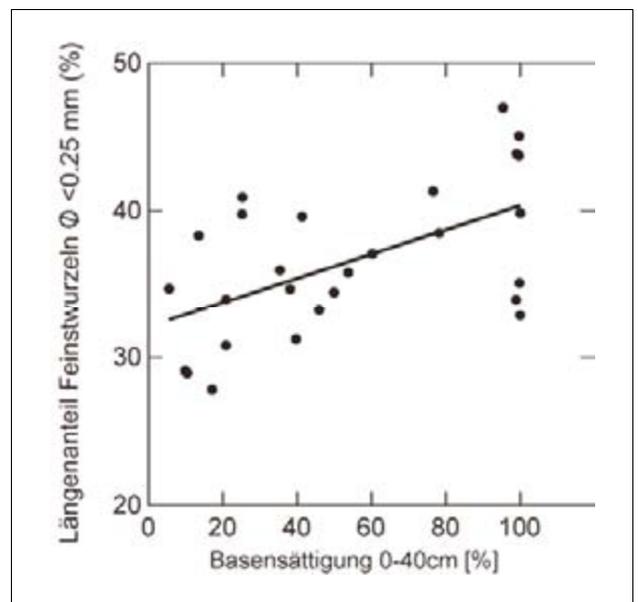


Abb. 5: Adventivwurzelbildung von jungen Buchen aus 27 Beobachtungsflächen: Häufigkeitsverteilung der Anzahl Pflanzen mit Adventivwurzeln von insgesamt 5 gemessenen Bäumchen pro Fläche. Der lineare Trend ist signifikant mit $p < 0,01$.

Abb. 6:
 Beziehung zwischen dem Längenanteil der Feinstwurzeln an der Gesamtwurzellänge von jungen Buchen aus 26 Waldbeobachtungsflächen in Beziehung zur modellierten Stickstoffdeposition. Die Beziehung ist univariat signifikant mit $p < 0.01$, multivariat mit der Basensättigung mit $p < 0.1$.

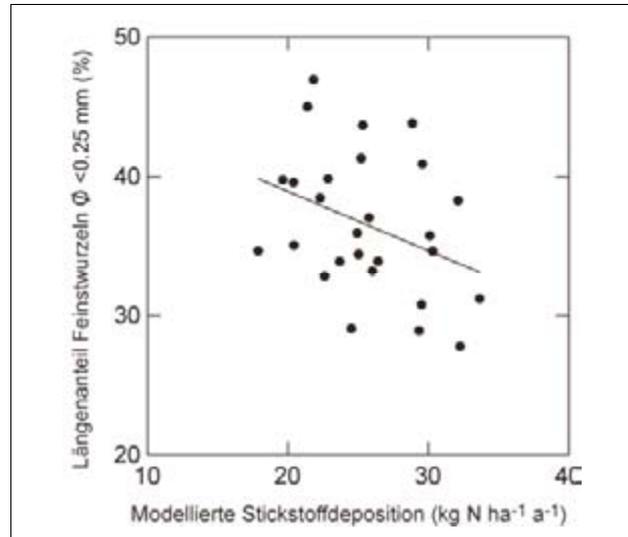


Abb. 7:
 Windwurf von Buchen und Fichten durch «Lothar» in Dauerbeobachtungsflächen in Abhängigkeit der Basensättigung im Boden. Die Beziehung ist bei der Buche signifikant mit $p < 0.001$ (multivariat mit N-Konzentration im Laub), bei der Fichte mit $p < 0.01$. Anzahl Buchen 2523, Anzahl Fichten 2473.

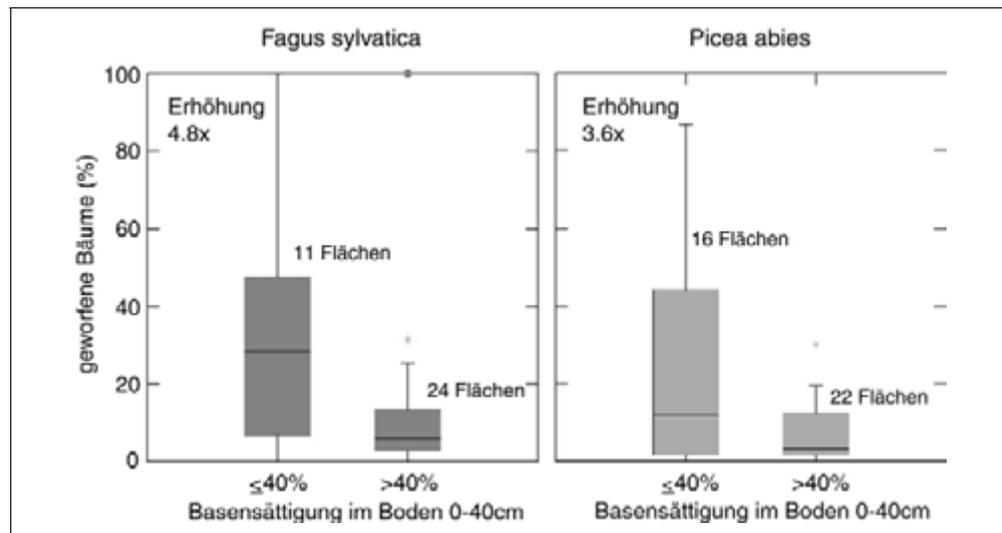
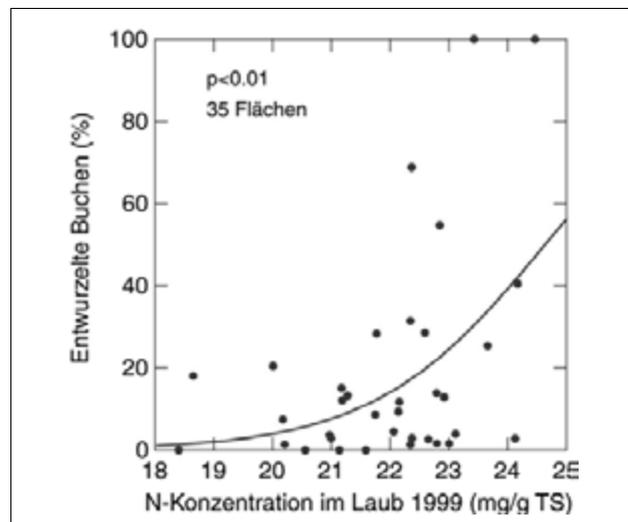


Abb. 8:
 Windwurf von Buchen durch «Lothar» in Dauerbeobachtungsflächen in Abhängigkeit zum Stickstoffgehalt im Buchenlaub (Nährstoffproben im Sommer 1999).



Literatur

- BRAUN S., SCHINDLER C., VOLZ R., FLÜCKIGER W. 2003: *Forest damage by the storm «Lothar» in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition*. Water Air and Soil Pollution 142: 327–340.
- DE VRIES W., REINDS G. J., VAN DER SALM C., DRAAIJERS G. P. J., BLEEKER A., ERISMAN J. W., AUÉE J., GUNDERSEN P., KRISTENSEN H. L., VAN DOBBEN H. F., DE ZWART D., DEROME J., VOOGD J. C. H., VEL E. M. 2001: *Intensive Monitoring of Forest Ecosystems in Europe*. EC-UN/ECE, Brussels, Geneva, 177 pp.
- FLÜCKIGER W., BRAUN S. 1999: *Wie geht es unserem Wald? Untersuchungen in Walddauerbeobachtungsflächen von 1984 bis 1998*. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch, 47 pp.
- GODBOLD D. L., FRITZ H. W., JENTSCHKE G., MEESENBURG H., RADEMACHER P. 2003: *Root turnover and root necromass accumulation of Norway spruce (Picea abies) are affected by soil acidity*. Tree Physiology 23: 915–921.
- GODBOLD D. L. 1991: *Aluminium decreases root growth and calcium and magnesium uptake in Picea abies seedlings*. In: Plant-soil interactions at low pH, eds. Wright, R. J., Baligar, V. C. and Murrmann, P. R., pp. 747–753. Kluwer Acad. Publishers,
- JENTSCHKE G., DREXHAGE M., FRITZ H.-W., FRITZ E., SCHELLA B., LEE D.-H., GRUBER F., HEIMANN J., KUHR M., SCHMIDT J., SCHMIDT S., ZIMMERMANN R., GODBOLD D. L. 2001: *Does soil acidity reduce subsoil rooting in Norway spruce (Picea abies)?* Plant and Soil 237: 91–108.
- MATZNER E., MURACH D. 1995: *Soil changes induced by air pollutant deposition and their implication for forests in Central Europe*. Water, Air and Soil Pollution 85: 63–76.
- OLEKSYN J., KAROLEWSKI P., GIERTYCH M. J., WERNER A., TJOELKER M. G., REICH P. B. 1996: *Altered root growth and plant chemistry of Pinus sylvestris seedlings subjected to aluminum nutrient solution*. Trees 10: 135–144.
- PUHE J 1994: *Die Wurzelentwicklung der Fichte (Picea abies (L.) Karst.) bei unterschiedlichen chemischen Bodenbedingungen*. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Reihe A 108: 128pp., Göttingen.
- SVERDRUP H., WARFVINGE P. 1993: *The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio*. Lund University, Department of Chemical Engineering II., Reports in ecology and environmental engineering. 2:1993: 1–108.
- TOMOVA L., BRAUN S., FLÜCKIGER W. 2003: *Influence of nitrogen fertilization on length and fungistatic phenolic compounds of fine roots of beech (Fagus sylvatica L.) on calcareous and acidic soils*. In: Annual Meeting of the British Ecological Society, Manchester 9–11 Sept. 2003.

2.6 Einfluss des letzten Eingriffs auf die Sturmschäden

Jean-Philippe Schütz

2.6.1 Erkenntnisse aus der Studie im Reusstal-Limmattal

Die Frage des Einflusses einer rechtzeitigen, präventiven Durchforstung kann man grundsätzlich positiv beantworten. Das Prinzip, wonach rechtzeitige Erstdurchforstungen für die Stabilisierung der Bestände nach wie vor wirksam sind, behält seine Bedeutung. Dies ist zu einer Zeit der zeitlichen Verzögerung der Durchforstung aus Kostengründen relevant. Die frühzeitige Waldpflege ist auch deswegen gerechtfertigt, weil junge Bestände viel weniger betroffen sind als ältere. Ausserdem können oftmals die Mischungsverhältnisse noch reguliert werden.

Ängstliche Praktiker, welche befürchten, dass eine Durchforstung eine destabilisierende Wirkung ausüben kann, wird man damit beruhigen können, dass die regelmässige (auch starke) Auflösung einer Bestockung viel weniger gefährlich ist als die Schaffung von Lücken, welche ab einer Baumlänge die Windempfindlichkeit dramatisch erhöhen. Dafür ist die langfristig positive Wirkung wiederholter Eingriffe auf die Stammform unbestritten.

Unsere Analysen zeigen keinen Einfluss von rezenten Durchforstungseingriffen auf die Sturmempfindlichkeit. Dieser Befund der nicht nachweisbaren Bedeutung der Durchforstungseingriffe für die Bestandesverletzung ist äusserst interessant und für die Waldbaupraxis nicht unwichtig. Die Angst vor einer bewussten oder unbewussten Destabilisierung infolge Durchforstung wird bei unsicheren Praktikern oftmals zu einem Hemmschuh für eine gute und rechtzeitige Durchforstungstätigkeit, obwohl die langfristige positive Wirkung solcher waldbaulichen Massnahmen in der Regel unbestritten ist. In einigen früheren Sturmschadensanalysen (etwa KÖNIG 1995; LOHMANDER und HELLES 1987) kam dieser Faktor als statistisch relevante Grösse für die kausalanalytische Erklärung von Sturmschäden heraus (z.B. nach Vivian/Wiebecke in Bayern). In anderen Studien ist die Wirkung der letzten Durchforstungen nicht erkennbar, wie in den Untersuchungen (an 492 Bestandesstichproben) in Norddeutschland nach Lothar von REDDE (2002).

Wir können unser Ergebnis durchaus als plausibel betrachten. Die schweizerische Behandlungspraxis ist eine der intensivsten, die es weltweit gibt, und die in die soziale Oberschicht eingreifende Auslesedurchforstung hat sich (im Gegensatz zu Nachbarländern wie Deutschland) wesentlich früher durchgesetzt und ist seit mehreren Jahrzehnten in der Praxis eingebürgert. Dass die Schweizer Bestände seit längerer Zeit gut durchforstet werden, zeigen auch die registrierten HD-Verhältnisse (siehe Kapitel 2.1.2, S. 32). Das Ganze ist auch konsistent mit den Erkenntnissen der Windkanaluntersuchungen von STACEY et al. (1994).

Literatur

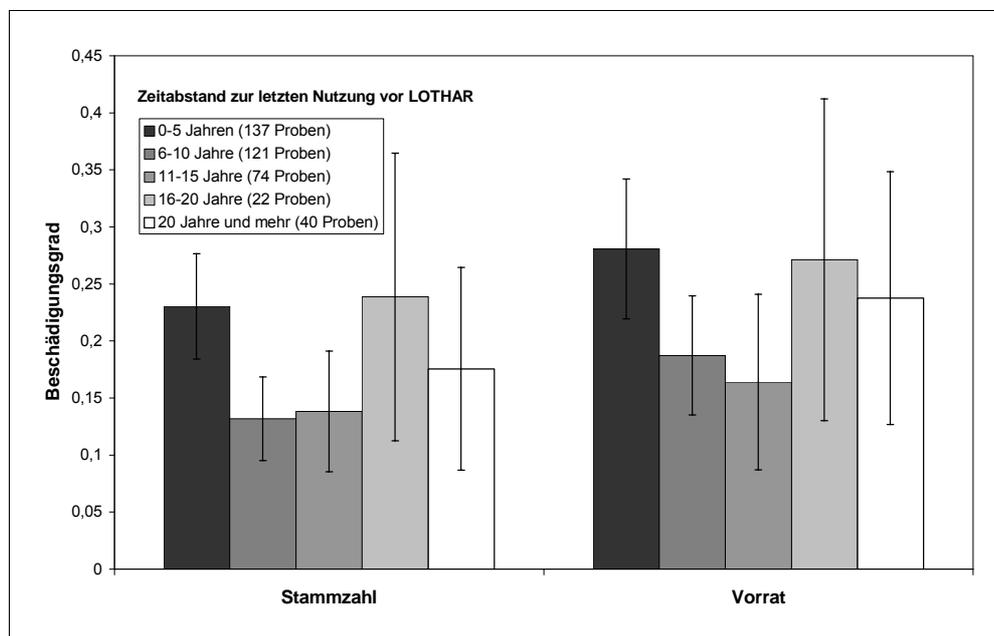
Die Literaturangaben beziehen sich auf das Literaturverzeichnis im Projektbericht (siehe S. 38).

2.6.2 Erkenntnisse aus dem Plenterwald

Flächen mit Eingriffen in den 5 Jahren vor dem Sturmereignis haben höhere Schäden als Flächen, in die vor 5–15 Jahren eingegriffen wurde. Höhere Schäden haben auch Bestände, in die lange nicht mehr eingegriffen wurde. Bei mittleren Eingriffsstärken (hier 70–150 sv/ha) sind die beobachteten Schäden geringer als bei schwächeren oder stärkeren Eingriffen.

Der Einfluss früherer Nutzungen im Untersuchungsgebiet Schwarzenegg lassen sich am besten mit den Erhebungen in den Kontrollstichprobenflächen belegen. Bestände, in welchen die letzte Nutzung maximal fünf Jahre zurückliegt, haben einen Beschädigungsgrad von 23% in der Stammzahl bzw. 28% im Volumen (Abb. 1). Sie gehörten zu den am stärksten betroffenen Beständen. Mit 13 bzw. 19% deutlich weniger beschädigt sind Bestände, in welchen die letzte Nutzung im Zeitraum vor 6–10 Jahren stattgefunden hat. Etwa gleiche Beschädigungsgrade (14 bzw. 16%) haben Bestände mit einer letzten Nutzung vor 11–15 Jahren. Wenn die letzte Nutzung 16–20 Jahren zurückliegt, steigt der Beschädigungsgrad wieder auf 24 bzw. 27% und erreicht damit gleiche Werte wie bei den jüngsten Nutzungen. Bei Nutzungen älter als 20 Jahre sinkt der Beschädigungsgrad auf 18 bzw. 24%.

Abb. 1:
Beschädigungsgrad in
Abhängigkeit vom
Zeitabstand zur letzten
Nutzung vor dem Sturm-
ereignis. Nur plenterartige
Bestände. Die Fehler-
anzeige entspricht dem
95%-Vertrauensbereich.



Auch die Eingriffsstärke bei der letzten Nutzung hat einen Einfluss auf die Schadenshöhe. Der kleinste Beschädigungsgrad mit 15 bzw. 18% gilt für Bestände mit mittlerer Eingriffsstärke (70–150 sv·ha⁻¹). Wenn die Eingriffsstärke kleiner oder höher ist, steigt der Beschädigungsgrad an. Bestände mit hoher Eingriffsstärke haben einen Beschädigungsgrad von 24 bzw. 31% und unterscheiden sich signifikant von Beständen mit mittlerer Eingriffsstärke. Eine niedrige Eingriffsstärke

bewirkt mit 22 bzw. 27% deutlich, aber nicht signifikant höhere Beschädigungsgrade als die mittlere Eingriffsstärke (Abbildung 2).

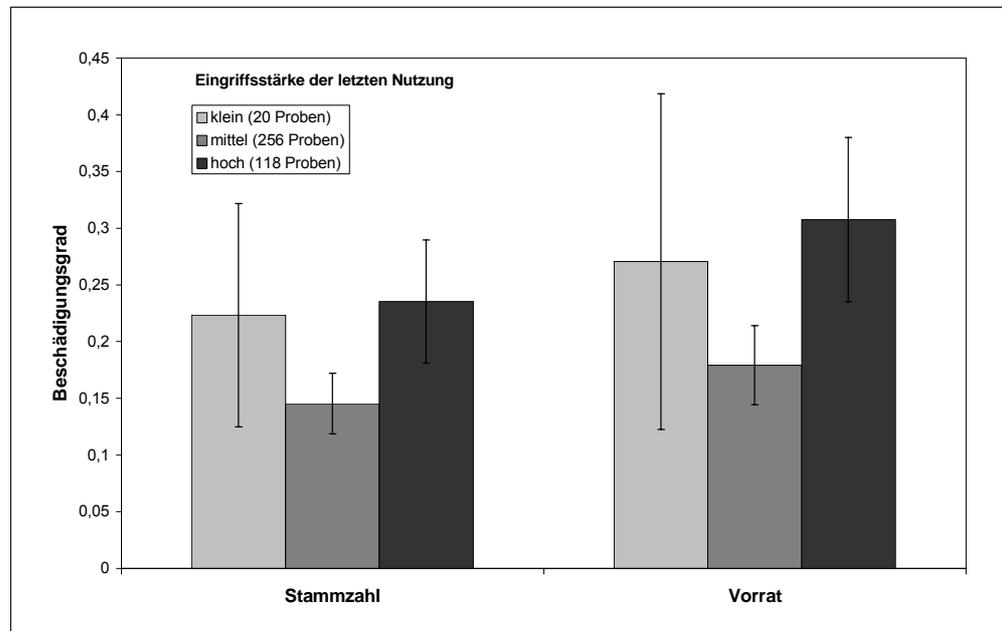


Abb. 2:
Beschädigungsgrad in
Abhängigkeit von der
Eingriffsstärke bei der
letzten Nutzung. Nur
plenterartige Bestände.
Die Fehleranzeige
entspricht dem 95%-
Vertrauensbereich.

Auf die Schadensart hat der Zeitpunkt der letzten Nutzung keinen wesentlichen Einfluss. Es zeigt sich aber, dass die Eingriffsstärke die Schadensart beeinflussen kann. Die Nutzungen mit mittlerer Eingriffsstärke haben einen kleineren Anteil an gebrochenen Bäumen als die Nutzungen mit hoher oder niedriger Eingriffsstärke. Die Unterschiede sind allerdings nicht signifikant.

Bezüglich Nutzung war bekannt, dass Eingriffe kurz vor dem Sturm das Risiko vergrößern. Größer ist das Risiko auch in lange nicht gepflegten Beständen. Regelmässige Eingriffe mit Umlaufzeiten zwischen etwa 8 und maximal 15 Jahren dürften sinnvoll und notwendig sein. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass mittlere Eingriffsstärken (in dieser Untersuchung 70–150 sv/ha) die geringsten Schäden zur Folge hatten, unabhängig vom Zeitpunkt des Eingriffs vor dem Sturm.

2.7 Einfluss benachbarter Waldteile

Jean-Philippe Schütz

2.7.1 Einfluss des Waldrandes

Betreffend Einfluss des Waldrandes kann die Wirkung dichter, undurchlässiger Waldränder durch eine adäquate Behandlung gelindert werden, indem die Waldränder möglichst durchlässig und aus stabilen Baumarten zusammengesetzt werden (MITSCHERLICH 1974).

In der Literatur bestehen verschiedene Untersuchungen zum Einfluss der Waldränder auf die Reduzierung der Windgeschwindigkeit (STACEY et al. 1994). Grund genug, um diesen Faktor zu berücksichtigen. Bezüglich des Strömungsverhaltens der Windbahnen stellt der Waldrand wie auch innere Ränder ein Hindernis dar, welches zu einer Kanalisierung der Flüsse bzw. zu einer Düsenwirkung führt. So können hinter dem Waldrand Turbulenzen entstehen. Mehrere Versuche im Windkanal zeigen, dass die Scherkräfte etwa nach 2–3 Baumlängen hinter dem Waldrand ihr Maximum erreichen (STACEY et al. 1994, FOU DHIL et al. 2003, MORSE et al. 2003). Dort ist eine Erhöhung der Turbulenzen und auch entsprechend der Schäden zu erwarten.

Die Bedeutung des Waldrandes bedarf der Differenzierung. Es ist allgemein bekannt, dass der Waldrand in der Regel stabiler ist, als die Bestände dahinter und bei grossflächigen Schäden daher sehr oft als einzige Bestandespartie stehen bleibt. Der Hauptgrund dafür ist, dass Bäume am Waldrand mehr beansprucht sind und so dickere Verankerungswurzeln entwickeln, indem Baumbewegungen das Dickenwachstum der Wurzeln induzieren (Tigmomorphogenese).

Bei den Feldaufnahmen wurden die Distanzen zum Waldrand bis zu einer Entfernung von 100 m erfasst und zwar sowohl entgegen (Luv) wie auch in der Hauptwindrichtung (Lee). Der Einfluss ist bei Fichte im Sinne einer abnehmenden Tendenz schwach erkennbar, allerdings ist der Regressionskoeffizient nicht signifikant ($p=16\%$) und das Bestimmtheitsmass gering ($R^2=5,4\%$, Abb. 1). In der Lee-Richtung (ohne Abbildung) sind keine Tendenzen erkennbar.

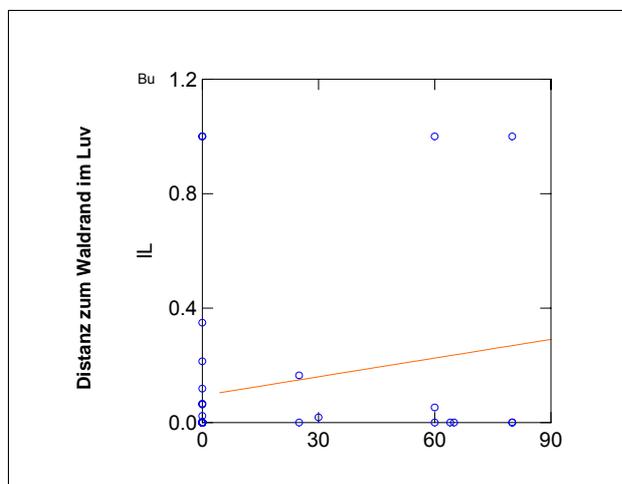
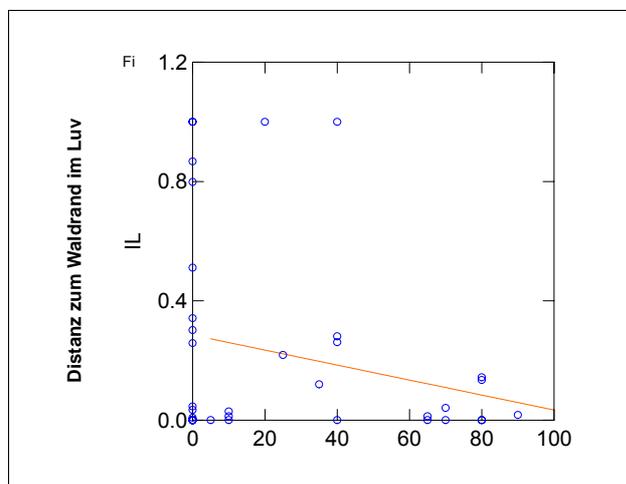


Abb. 1: Distanz zum Waldrand bei der **Fichte**.

Distanz zum Waldrand bei der **Buche**.

Varianzanalytisch lassen sich obige Resultate bestätigen. Die allgemeine Tendenz lässt bei den Fichtenbeständen bis knapp zwei Baumhöhen (59 m) nach dem Waldrand eine deutlich höhere Beschädigung erkennen als weiter in der Bestandestiefe (Abb. 2); die Unterschiede sind allerdings nicht signifikant bei einer Wahrscheinlichkeit von $p=38\%$.

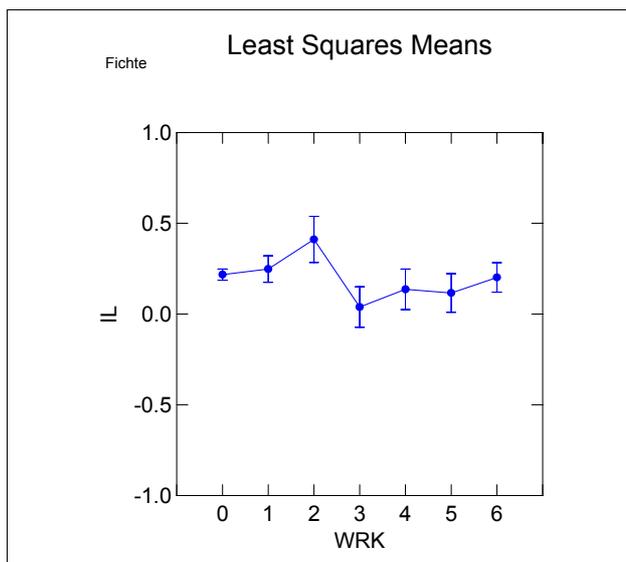


Abb. 2:
Varianzanalyse zwischen den Waldrandklassen (WRK) und dem Schadenindex (IL) für die **Fichtenbestände**.

Waldrandklassen:

0 Waldrand >als 100 m Entfernung	n=113
1 Waldrand im Luv zw. 0–19 m	n=21
2 Waldrand im Luv zw. 20–59 m	n=7
3 Waldrand im Luv zw. 60 und 100 m	n=9
4 Waldrand im Lee zw. 60 und 100 m	n=8
5 Waldrand im Lee zw. 20 und 59 m	n=10
6 Waldrand im Lee zw. 0–19 m	n=17

Um die geringe Anzahl Untersuchungen bei den Buchenbeständen zu berücksichtigen, wurde die Varianzanalyse mit drei Distanzklassen zum Waldrand, entsprechend eines Mehrfachen der Baumhöhen durchgeführt (Abb. 3). Eine Baumhöhe entsprach dabei 33,3 m.

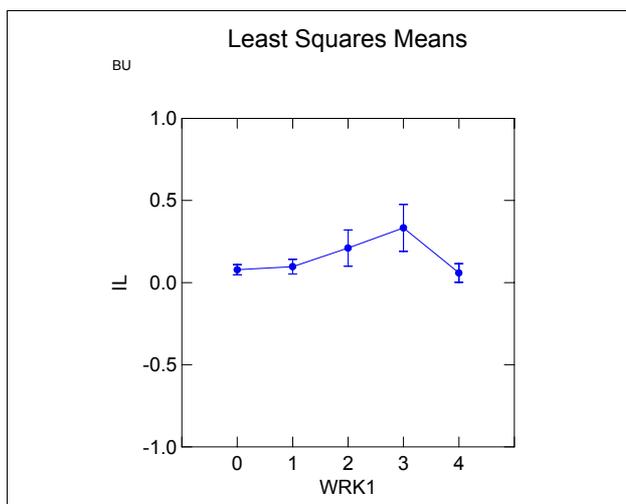


Abb. 3:
Varianzanalyse zwischen den Waldrandklassen (WRK1) und dem Schadenindex (IL) für die **Buchenbestände**.

Waldrandklassen:

0 kein Waldrand	n=64
1 WR im Luv 1 Baumhöhe	n=31
2 WR im Luv 2 Baumhöhen	n=5
3 WR im Luv 3 Baumhöhen	n=3
4 WR im Lee	n=19

1 Baumhöhe entspricht 33,3 m

Die Unterschiede sind wegen der relativ kleinen Zahl der Proben nicht statistisch gesichert. Sie liegen im besten Fall im Bereich einer Wahrscheinlichkeit um 40%

für die Klassen 0 und 3, bzw. 3 und 4. Die Tendenz hingegen ist klar und konsistent mit den Ergebnissen der Experimente im Windkanal.

Literatur

Die Literaturangaben beziehen sich auf das Literaturverzeichnis im Projektbericht (siehe S. 38).

2.7.2 Einfluss des Bestandesschutzes

Waren auf dem 4x4 km-Netz nach Westen höhere Bestände vorgelagert, so gab es am wenigsten Schäden (Abbildung 4). Bestand kein Schutz, so waren überdurchschnittliche Schäden zu verzeichnen. Der Einfluss des Bestandesschutz nahm mit der Bestandeshöhe ab. Unmittelbare Waldrandflächen hatten eher durchschnittliche Schäden zu verzeichnen, während die knapp hinter dem Waldrand gelegenen Flächen überdurchschnittlich häufig geschädigt wurden (Abbildung 5). Diese Ergebnisse bestätigen damit die bisherigen Untersuchungen und zeigen den Einfluss der unterschiedlichen Windströmungen am Bestandesrand.

Abb. 4:
Einfluss des Bestandes-
schutzes.

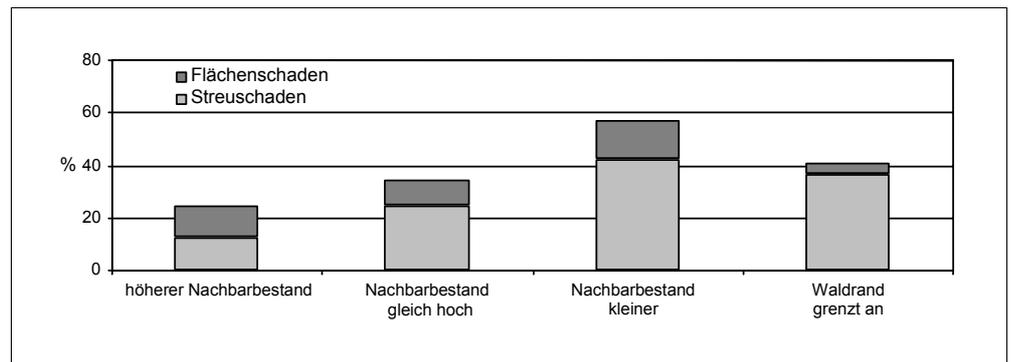
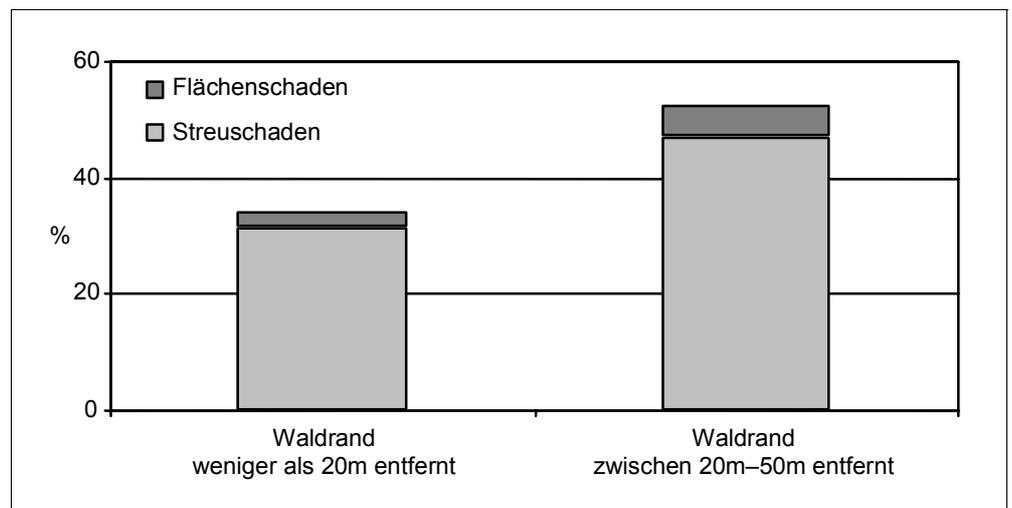


Abb. 5:
Einfluss des Waldrand-
abstandes.



2.8 Erklären Holzqualität und Baumernährung das Bruch- und Wurfrisiko der Fichte bei extremen Sturmereignissen?

Der vorliegenden Arbeit lag die Hypothese zu Grunde, dass innerhalb einer Sturmschadensfläche die Art des Schadens (Stammbruch oder Wurf) ein Spiegel der Stammqualität und Baumernährung ist. Wir gingen davon aus, dass höherer Stickstoff(Protein)gehalt im Gewebe ein Indiz für 'weicheres' und damit brüchigeres Holz ist, wogegen Kohlenhydratüberschüsse (möglicherweise als Folge von erhöhtem CO₂ bei nährstoffbedingter Wachstumslimitierung) eher zu weniger brüchigen, mehr zur Entwurzelung neigenden Bäumen führt. Um diese Hypothese zu testen wurden auf 104 Sturmschadensflächen, grossteils im Schweizer Mittelland, unmittelbar nach dem Sturm Lothar ca. 1600 Holzbohrkerne aus entwurzelt, gebrochenen und stehen gebliebenen Bäumen gewonnen. Es wurden Standorts- (Boden: pH, NH₄⁺; P-Ausstattung der Kontrollbäume, N-Eintrag) und makroskopische Baummerkmale (Schadenstyp, Höhe, Position, DBH, Bruchhöhe) dokumentiert und mit Eigenschaften des Holzkörpers wie Jahrringbreite, Holzdichte und Reservestoffgehalt verknüpft.

Die Resultate zeigen zwar eine sehr starke Streuung, die auf andere Wirkfaktoren oder stochastische Ursachen hinweist, im Einklang mit der Hypothese wurde jedoch bei Bäumen mit erhöhtem N-Gehalt, geringerer Stärkeanreicherung und breiteren Jahrringen (besonders in jüngster Zeit) ein deutlich erhöhtes Windbruchrisiko gefunden. Das Entwurzelungsrisiko ist hingegen nicht mit von uns untersuchten Faktoren korreliert. Die entwurzeltten Bäume wurden durch den Wind zwar gefällt, ihr Stammholz hat aber die selben Eigenschaften wie das der stehengebliebenen Bäume. Die Studie belegt somit, dass die in jüngster Zeit beobachtete (und wahrscheinlich durch erhöhte N-Deposition erklärte) Stimulierung des Wachstums der Fichte das Risiko eines Stammbruches bei Sturm erhöht.

2.8.1 Ziele und Methoden

Der Sturm Lothar schlug am 26. Dezember 1999 breite Schneisen in den Schweizer Wald, wobei innerhalb der Sturmschadenflächen, auch im Falle nahezu reiner Fichtenbestände, Bäume (1) entweder entwurzelt wurden (Windwurf), (2) abbrechen (Windbruch) oder (3) den Sturm überstanden und isoliert stehen blieben. Die vorliegende Studie sollte für die Fichte klären ob diese unterschiedlichen Sturmfolgen etwas mit Stammqualität und Baumernährung zu tun haben. Wir nahmen an, dass ein höherer Stickstoff- und damit Proteingehalt im Gewebe, egal aus welchem Grund, mit brüchigerem Holz assoziiert ist, wogegen Kohlenhydratüberschüsse (allenfalls sogar als Folge der heute bereits deutlich erhöhten CO₂ Konzentration in der Luft) eher zu festeren Bäumen führen, die mehr zur Entwurzelung neigen (BEISMANN et al. 2002). Die Balance zwischen N und C Überschuss bestimmt, ob das Pendel Richtung Entwurzelung oder Richtung Bruch ausschlägt, so unsere Hypothese.

Um diese Hypothese zu testen, wurden auf 104 Sturmschadenflächen, grossteils im Schweizer Mittelland, unmittelbar nach dem Sturm «Lothar» Holzbohrkerne von

ca. 1600 entwurzelten, gebrochenen und stehen gebliebenen Bäumen gewonnen (Abb. 1). Die mit einem Zuwachsbohrer gewonnenen Bohrkerne von ca. 5mm Durchmesser dienten zur Analyse zahlreicher physikalischer und chemischer Parameter sowie zur Zuwachsmessung anhand der Jahrringe. Um von allen 1600 Bäumen vergleichbare Bohrkerne identischer Länge zur Verfügung zu haben, wurden nur die äussersten 65 mm ausgewertet. Die 65 mm erwiesen sich als die maximale gemeinsame Länge der Bohrkerne. Neben dem mittleren Zuwachs der letzten 10 Jahre (1990–1999), wurde die mittlere Breite der in den 65 mm enthaltenen Jahrringe (im Mittel 37) berechnet. Die Jahrringbreiten wurden zudem mit Hilfe des Stammdurchmessers in Basalflächenzuwachs (= jährlicher Zuwachs der Stammgrundfläche) umgerechnet, weil dieser aus geometrischen Gründen bedeutend weniger vom Baumalter beeinflusst ist.

Von jedem der 104 Standorte wurden Boden-pH und P-Gehalt der Kontrollbäume gemessen, makroskopische Baummerkmale (Schadentyp, Bestandeshöhe, Stammdurchmesser in Brusthöhe, Bruchlänge) dokumentiert und mit folgenden Holzeigenschaften verglichen:

- Jahrringbreite in den äussersten 65 mm des Stammes
- Unterschiede in der Jahrringbreite der letzten 10 Jahre
- Holzdichte im frischen und trockenen Zustand
- Gehalt an nicht-strukturgebundenen Kohlenhydraten (NSC; Stärke, Zucker; KÖRNER 2003)
- Stickstoff-Konzentration im Xylem und Phloem

Im Weiteren standen die Ergebnisse eines N-Eintragsmodells von RIHM (1996) mit einem Raster von 1x1 km zur Verfügung.

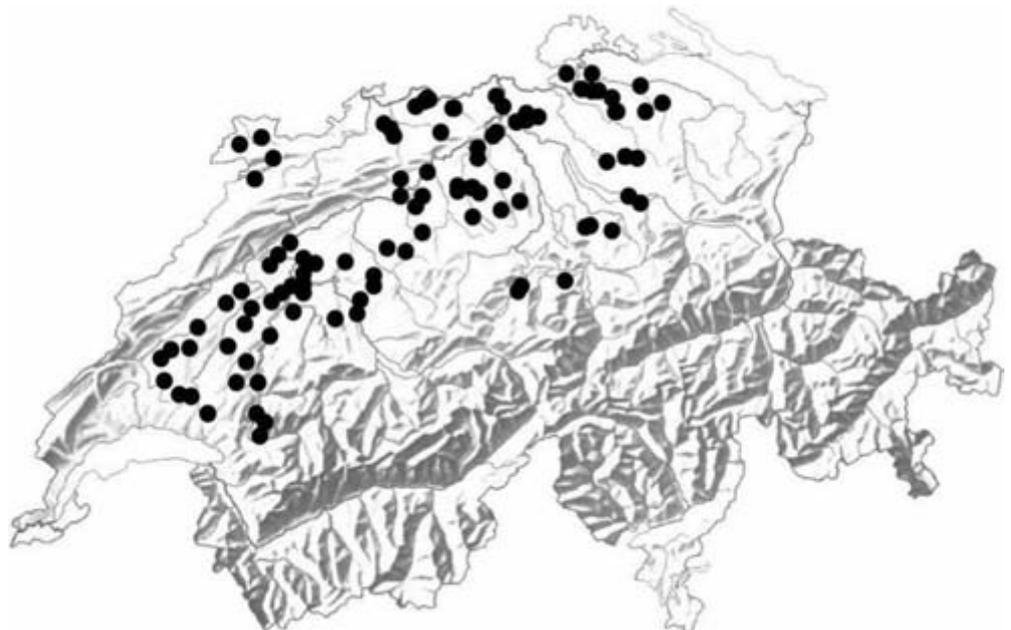


Abb. 1:
Verteilung der Untersuchungsflächen (n=104) im Schweizer Mittelland.

2.8.2 Resultate

Die statistische Auswertung (partielle Korrelationen) bringt überraschende Resultate zum Vorschein. So treten kürzere Stammbruchlängen (Länge der Bruchzone) bei Bäumen mit kleinerer Holzdicke und grösserem Splintholzflächenanteil (Fläche des wasserführenden Holzes) auf. Aufgrund der Baummechanik kann man bei kurzen Bruchlängen von spröden, bei grossen Bruchlängen von elastischen Bruchtypen sprechen. Weitgehend den Erwartungen entspricht, dass die N-Konzentration im Splintholz negativ mit der Holzdicke (ofentrocken) korreliert ist. Enthält das Splintholz weniger N, ist die Holzdicke erhöht, umgekehrt hat das Holz bei hohem N-Gehalt eine kleinere Dichte. Die Holzdicke ist positiv korreliert mit der Bruchlänge des Stammes, d.h. Stammholz, das mehr N enthält, ist wegen der geringeren Holzdicke und leichteren Holzstruktur brüchiger, was sich auch in kürzeren Bruchlängen äussert.

Tabelle 1: Partielle Korrelation von holzchemischen Eigenschaften mit den übrigen Faktoren.
Es sind nur signifikante Werte angegeben. Schlankheitsgrad = Baumhöhe/Durchmesser.

		Spalten: Element-Konzentration im Splintholz von Kontroll-Bäumen (% TM)							
		NSC	Stärke	N Phloem	N Xylem	P	Mg	Ca	K
Standort, Boden & Baum	Bestandeshöhe	-0,31*	-0,40**						0,34
	Schlankheitsgrad		-0,36*						0,34
	pH Oberboden	0,31*	0,34*			-0,30*			-0,31
	Atmosphärische NOx Deposition						-0,31*		
	Atmosph. N- Gesamtdeposition					-0,32*			
Holzchemie der Kontrollen (% TM)	NSC	1	0,82***					-0,33*	
	Stärke	0,82***	1						
	Zucker		-0,33*						
	N Phloem			1		0,35*	0,40**		
	N Xylem				1	0,30*			
	P			0,35*	0,30*	1	0,41**	0,54***	0,59
	Mg			0,40**		0,41**	1	0,30*	0,43
	Ca	-0,33*				0,54***	0,30*	1	0,75
	K					0,59***	0,43**	0,75***	1
	N/P			-0,30*		-0,82***	-0,37*	-0,43**	-0,47

Unerwarteterweise ist der Jahringbreitenzuwachs innerhalb der äusseren 65 mm schwach negativ mit der atmosphärischen N-Deposition korreliert (Tab. 2). Das heisst, dass der Jahringbreitenzuwachs bei der erhöhten atmosphärischen N-Deposition der Jahre 1993–1998 (Daten von RIHM 1996) nicht zu-, sondern abnimmt. Möglicherweise sind noch andere, hier nicht berücksichtigte Faktoren für diesen Zusammenhang ausschlaggebend. Denkbar wären geringe Niederschlagssummen, die mit tiefen N-Depositionswerten verbunden sind. Ungenügende Niederschläge

können einen reduzierten Jahrringbreitenzuwachs bewirken. Da die nasse N-Deposition mit Säureeintrag verbunden ist, wäre auch eine negative Wirkung auf schwach gepufferten Böden möglich. Die P-Konzentration im Splintholz ist negativ mit den N-Depositionen (NH_y, N-Gesamtdeposition) und dem pH-Wert des Bodens korreliert (Tab. 1). Das heisst, dass auf sauren Böden die P-Konzentration im Holz tiefer ist als auf neutralen bis basischen. Weiter erkennt man in Abb. 2 eine einfache negative Korrelation zwischen dem Basalflächenzuwachs (BAI) 1980–1999 und dem N/P-Verhältnis im Splintholz, obschon N und P alleine positiv mit dem Basalflächenzuwachs korreliert sind. Bei hohen N/P-Verhältnissen im Holz (im Wesentlichen eine Folge von wenig P) ist der Basalflächenzuwachs also kleiner! Das ist ein klares Indiz für Phosphormangel bei einem N-Überangebot von N und/oder hohem Säureeintrag und jedenfalls ein Hinweis auf eine unbalancierte Ernährungslage des Baumes.

Tabelle 2: Partielle Korrelation von holzphysikalischen Eigenschaften mit den übrigen Faktoren. Es sind nur signifikante Werte angegeben. Schlankheitsgrad = Baumhöhe/Durchmesser; JB = Jahrringbreite; BAI = Basalflächenzuwachs (basal area increment).

		Radialer Schwund	Holzdichte ofentrocken	Splintholz-flächenanteil	JB der 65mm-Proben	BAI der 65mm-Proben
Standort, Boden & Baum	Bestandeshöhe (m)			-0,37***		
	Schlankheitsgrad				0,33***	
	pH Oberboden					
	Atmosphärische NH _y Deposition	0,29**			-0,31**	
	Atmosph. N – Gesamtdeposition	0,28**			-0,33**	
Holzphysik, Zuwachs	Radialer Schwund (%)	1	0,69***	-0,31***	-0,44***	
	Holzdichte, ofentrocken (g cm ⁻³)	0,69***	1	-0,29***	-0,49***	
	Splintholflächenanteil (%)	-0,31***	-0,29***	1	0,30***	
	Jahrringbreite in 65mm (mm)	-0,44***	-0,49	0,30***	1	0,56***
	Basalflächenzuwachs in 65mm (cm ²)				0,56***	1

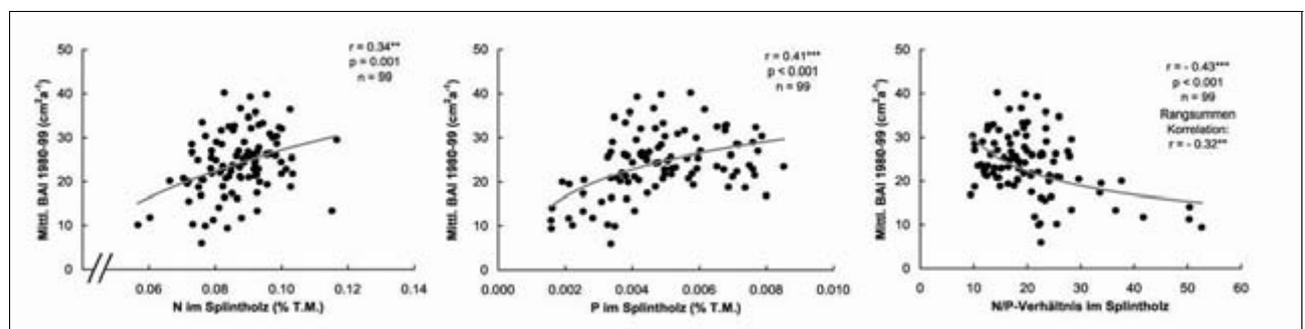


Abb. 2: Einfache Korrelationen zwischen Basalflächenzuwachs (BAI) 1980–1999 und N, P und N/P im Splintholz.

In einem nächsten, wichtigen Schritt werden die Schadentypen Bruch, Entwurzelt und Kontrolle miteinander verglichen (Varianzanalysen). Die Resultate zeigen zwar

eine sehr starke Streuung, die auf andere Wirkfaktoren oder stochastische Ursachen hinweist, im Einklang mit der Hypothese wurde jedoch bei Bäumen mit erhöhtem N-Gehalt, geringerer Stärkeanreicherung und breiteren Jahrringen besonders in jüngster Zeit ein deutlich erhöhtes Windbruchrisiko gefunden (Tab. 3).

Tabelle 3: Statistisch gesicherte Unterschiede der Schadenstypen Gebrochen (B), resp. Entwurzelt (W) im Vergleich zu den Kontrollen (=stehengeblieben). Die Unterschiede werden relativ im Vergleich zu den Kontrollen angegeben (Kontrolle=100%). Die statistische Prüfung erfolgte mittels Varianzanalyse und paarweisen t-Tests mit der Korrektur für mehrfache Vergleiche. Je mehr Sterne, desto grösser die statistische Sicherheit der Ergebnisse: (*) $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

	Gebrochen B	Entwurzelt W	Schaden B+W	Gebrochen ¹ B
Splintholzflächenanteil				+7,7%***
Holzdicke frisch	+5,4%***		+3,7%***	+4,7%***
Basalflächenzuwachs (65mm-Probe)			+3,5%*	
Basalflächenzuwachs 1990–1999				+5,7%(*)
NSC im Splintholz ²	-14,0%***			-10,9%***
Stärke im Splintholz	-13,6%*		-10,4%*	-15,4%***
Zucker im Splintholz		+17,3%(*)	+8,2%*	
N im Phloem	+10,7%***	+6,6%(*)	+9,1%***	+7,1%***

¹ Nur hier dienen als Referenz alle nicht-gebrochenen Bäume (Kontrolle, K und Entwurzelte).

² Unterschied B zu W, nicht B zu K, NSC = non structural carbohydrates (haupts. Stärke).

Die entwurzelten Bäume wurden durch den Wind zwar gefällt, ihr Stammholz hat aber fast die gleichen Eigenschaften wie das der stehengebliebenen Bäume. Einzig der Zucker im Xylem und der N-Gehalt im Phloem sind leicht erhöht, jedoch nur schwach signifikant. Die Stämme entwurzelter wie stehengebliebener Fichten sind offensichtlich weniger brüchig und der Gehalt an Reservestärke (also nicht in Struktur investiertem Kohlenstoff) ist in diesen beiden Stammtypen eher erhöht. Die hier untersuchten Holzeigenschaften lassen keinen Schluss auf das Entwurzelungsrisiko von Fichten zu.

Die Studie belegt somit, dass die in jüngster Zeit beobachtete und wahrscheinlich durch erhöhte N-Deposition verursachte Stimulierung des Wachstums der Fichte auf wenig sauren Böden das Risiko eines Stammbruches bei Sturm erhöht. Es ist denkbar, dass die heute erreichte CO₂-Erhöhung dem bereits bis zu einem gewissen Grad entgegenwirkt, wobei diese Schlussfolgerung nur auf Resultaten von in Gewächshäusern durchgeführten Experimenten an jungen Fichten ruht (HÄTTEN-SCHWILER et al. 1996, SPINNLER et al. 2002). Unabhängig davon, ob hier antagonistische Wirkungen von CO₂ und N-Deposition im Spiel sind, besteht ein Zusammenhang zwischen Stammbruchrisiko und dem Ernährungszustand der Bäume, der sich auch in der Holzqualität niederschlägt.

Literatur

- BEISMAN H., SCHWEINGRUBER FH., SPECK T., KÖRNER CH. 2002: *Mechanical properties of spruce and beech wood grown in elevated CO₂*. *Trees* 16: 511–518.
- HÄTTENSCHWILER S., SCHWEINGRUBER FH., KÖRNER CH. 1996: *Tree ring responses to elevated CO₂ and increased N deposition in Picea abies*. *Plant Cell Environ* 19:1369–1378.
- KÖRNER CH. 2003: Carbon limitation in trees. Tansley lecture. *J Ecol* 91:4–17
- RIHM B. 1996: *Critical loads of nitrogen and their exceedances*. Environmental series No 275. Federal Office of Environment, Forest and Landscape (FOEFL). 74pp
- SPINNLER D., EGLI P., KÖRNER CH. 2002: *Four-year growth dynamics of beech-spruce model ecosystems under CO₂ enrichment on two different forest soils*. *Trees* (2002) 16:423–436.

3 Einfluss verschiedener Faktoren auf die Entwicklung der Wiederbewaldung

Peter Bachmann
Lubor Dvorak

3.1 Bestand vor dem Sturm

Die Untersuchungen im Plentergebiet Schwarzenegg bestätigen die allgemein vorherrschende Meinung, dass Plenterwälder stabiler sind als gleichförmige Wälder. Ähnliches gilt auch für die Überführungswälder. Allerdings sind die Schätzwerte für die gleichförmigen Wälder aus nur 6% der Untersuchungsfläche gewonnen worden und daher weniger repräsentativ als für die anderen Betriebsarten.

Das Untersuchungsgebiet gehört zu einem traditionellen Plenterwaldgebiet. Den Forstleuten sind daher die Prinzipien der Plenterung und der einzelstammweisen Nutzung sehr vertraut, und deshalb bereitet ihnen auch die bezüglich waldbaulicher Kenntnisse anspruchsvolle Überführung keine nennenswerten Schwierigkeiten.

Gemäss Kontrollstichproben-Auswertung unterscheiden sich Überführungswälder kaum von Plenterwäldern. Der geringfügig höhere Beschädigungsgrad bei den Überführungswäldern ist statistisch unbedeutend. Bei der flächenbezogenen Auswertung lassen sich die Überführungswälder dagegen in zwei sich unterschiedlich verhaltende Gruppen unterteilen. Die Gruppe mit Strukturen näher zum gleichförmigen Wald ist deutlich weniger beschädigt als der gleichförmige Wald, aber mehr beschädigt als der Plenterwald. Die zweite Gruppe mit Strukturen näher zum Plenterwald unterscheidet sich nur geringfügig vom Plenterwald. Bäume in der ersten Gruppe haben deutlich kleinere Krone als Plenterwaldbäume; der ganze Bestand scheint sehr licht zu sein und vergrast oft. Bäume der zweiten Gruppe haben in der Oberschicht ähnliche Kronen wie die Plenterwaldbäume, was die Unterschiede im Beschädigungsgrad teilweise erklären kann.

Von Bedeutung ist auch der Zustand des Waldes nach dem Sturm, der die Vorteile der plenterartigen Bestände gegenüber dem gleichförmigen Wald hervorhebt. Nach Beobachtungen im Untersuchungsgebiet bleiben in plenterartigen Beständen nach der Räumung auch totaler Schäden viele differenzierte Jungwuchsgruppen und einzelne Stangen stehen. Diese bilden günstige Voraussetzungen für die spätere Behandlung und die Kontinuität wird nicht so stark gestört. Bereits wenige Stangen können das Mikroklima auf solchen Flächen positiv beeinflussen und Temperatur-extreme mildern. Dies wirkt sich auch auf die Verjüngungsgunst aus, was mit einer geringeren, mosaikartigen Verunkrautung zusammenhängt. Dagegen bleibt in gleichförmigen Wäldern im günstigsten Fall nach der Räumung von Totalschadenflächen nur eine nicht differenzierte Verjüngung. Öfter sind es aber ganz kahle Flächen, auf welchen es zu sehr starker Verunkrautung kommt. Dies behindert eine rasche und erfolgreiche Naturverjüngung.

Auch die Folgen der Streuschäden sind je nach Betriebsart unterschiedlich. Im Plenterwald und im Überführungswald verursachen Streuschäden von bis zu 30–40% des Bestandesvolumens in vielen Fällen keine nennenswerten negativen Veränderungen der Bestandesstruktur. Stärkere Streuschäden dagegen zerstören die ideale Plenterstruktur und verursachen vermutlich bedeutende Zuwachsverluste. Die verbleibenden Bäume sind aber dank einer langen Bekronung und der vorhan-

denen Unterschicht vor der Sonne geschützt und deshalb weniger anfällig für Sonnenbrand. Ihre hohe Vitalität bleibt in der Regel erhalten, was sich positiv auf ihren Zuwachs und die Widerstandskraft gegen nachfolgende Borkenkäferschäden auswirken kann. Die stufige Struktur bleibt auch bei sehr starken Schäden erhalten und verhindert fast immer eine flächige Vergrasung. Die Vergrasung ist meist nur mosaikartig, entsprechend den Lichtverhältnissen in einem derartigen Bestand. Die entstandenen Lücken füllen sich bald mit empor wachsenden Bäumen aus der Unterschicht.

Im gleichförmigen Wald können je nach Alter des Bestandes schon Schäden ab 15% der Grundfläche Zuwachsverluste bewirken. Gleichförmige Bestände haben nicht die Möglichkeit, die Zuwachsverluste im Hauptbestand durch eine Zuwachsteigerung in den unteren Schichten zu reduzieren. Bei einer gleichmässigen Verteilung der Lücken kann es zu Vergrasung kommen, was eine geplante Überführung bremsen dürfte. Auch die Bestandesstabilität kann deutlich gestört sein, und es kann zu Sonnenbrand und zu einer nachfolgenden Verminderung der Vitalität kommen, was in der Regel eine massenhafte Vermehrung des Buchdruckers begünstigt.

Plenterartige Bestände haben weniger stark wertmindernde Bruchschäden. Deren Volumenanteil beträgt nur ungefähr 18%, während er im gleichförmigen Wald bei 31% liegt. Der kleinere Anteil von Windbruch im Plenterwald lässt sich mindestens teilweise durch die Schaftform erklären.

Peter Lüscher

3.2 Bodenverdichtung

Fragestellung

Welchen Einfluss haben Art und Ausmass der Räumung von Sturmschadenflächen auf die physikalischen Eigenschaften des Bodens und welche Rolle spielt dabei der Standort?

Ausgangslage

Die vorliegende Synthese beruht auf den erhobenen Bodendaten auf Lothar-Reservatsflächen (Rahmenprogramm TP 1) und den Zusatzerhebungen auf dem 1 x 1 km-Stichprobennetz des Landesforstinventars im Kanton Freiburg (TP 6, Zusatz Regeneration, Sanierung).

Zusammenfassung

Das Befahren von natürlich gelagerten Waldböden mit Forstmaschinen verursacht auf einem Grossteil der im Schweizer Wald vorkommenden Bodenverhältnissen im Bereich der Fahrspuren tiefgreifende und lang anhaltende Bodenveränderungen, die wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigen. Eingeschränkte Porenvolumina und Porenkontinuität verringern die Transportleistung des Bodens für Wasser und Luft, eine unabdingbare Voraussetzung für das Wurzelwachstum.

Die erste Überfahrt verursacht nicht nur im Oberboden Verdichtungen und Verformungen.

In grösseren Tiefen erfolgen Auswirkungen der Bodenverdichtung durch hohe Gewichte und dynamische Belastungsspitzen beim Maschineneinsatz.

3.2.1 Folgerungen für Massnahmen im Hinblick auf eine zukünftige Sturmschadenbewältigung

Voraussetzungen, Grundsätze

Wechselwirkungen zwischen standörtlichen, maschinenbedingten und verfahrenstechnischen Faktoren sind gesamtheitlich schwierig fassbar und daher nur schwer abschätzbar. Prognosen von Bodenschäden sowie die Herleitung und Begründung von Grenzwerten sind für einen ökosystemverträglichen Maschineneinsatz schwierig und anspruchsvoll.

Eine nötige Vorsorge hat sich allerdings an folgender Regel zu orientieren: Flächiges Befahren ist unter allen Umständen zu vermeiden, d.h. Beschränkung von Bodenschäden auf «Rückegassen»!

Risiko-/Empfindlichkeitsstufen einzelner Waldstandortstypen

Ausgehend von ersten Untersuchungen, die zur Beurteilung der Verdichtungsrisiken ausgewählter Bodeneigenschaften der einzelnen Waldstandortstypen berücksichtigen, ist ein umfassendes Verfahren zur Priorisierung von Holzerntemassnahmen standortsspezifisch zu entwickeln.

Richtlinien und Entscheidungshilfen bei Holzerntemassnahmen

Erarbeitung von verbindlichen Richtlinien und Entscheidungshilfen für den physikalischen Bodenschutzes im Wald (siehe Kap. 3.3 Entscheidungshilfen zum Schutz des Bodens bei Räumungsarbeiten nach Flächenschäden).

Ausbildung Die konsequente Umsetzung der Erkenntnisse ist stufengerecht zu fördern und zu überwachen.

3.2.2 Synthesebericht

Einleitung Dieser Beitrag berücksichtigt die folgenden Teilaspekte:

- Charakterisierung der aufgetretenen Bodenschäden nach Räumungsarbeiten
- Störungsgrade durch vergleichende Punktaufnahmen (Störung / Referenz)
- Flächige Betrachtung von Störungsgraden mit Verdichtungsschäden
- Betrachtung von Bodenschäden nach Holzerntemassnahmen auf einem Stichprobennetz

Für die Untersuchung und die Charakterisierung der Bodenschäden am Profil wurden folgende Parameter erfasst:

- Beschreibung des Bodenaufbaus und der Bodeneigenschaften durch verschiedene Profilaufnahmen (Referenzprofile und Schadprofile)
- Lagerungsdichte der Feinerde
- Grobporenanteil / Porosität
- Eindringwiderstand
- Durchwurzelung (TP 6 Regeneration)
- Bodenatmung (TP 6 Regeneration)

Ein visuelles Typisierungsschema für die Einteilung der gestörten Profilaufnahmen in Fahrspuren und zur flächigen Erhebung wurde erarbeitet (Anhang 1). Es bietet die Voraussetzung dafür, dass die erfassten Schadkategorien auch messtechnisch belegt und unterschieden werden können.

Für die flächige Betrachtung wurde das Schadenausmass nach Störungsgraden auf ausgewählten Lothar-Reservatsflächen kartiert (Anhang 2). Die gleichen Beurteilungskriterien wurden auch für die Stichprobenaufnahmen im Kanton Freiburg verwendet.

Beispielhaft werden in diesem Synthesebericht zwei kartierte Schadbilder von Lothar-Reservatsflächen (Habsburg: Schadbilder längs Rückegassen und Brüttelen: Flächenschaden) mit unterschiedlichem Ausmass erläutert.

3.2.3 Ausgewählte Resultate

In natürlich gelagerten Waldböden haben Baumwurzeln durch das vorhandene Porensystem auf kleinstem Raum Kontakt zu Wasser, Nährstoffen und Luft.

Verdichtungsschäden, veränderte Porenvolumina und Eindringwiderstand Die Lagerungsdichte ist eine häufig verwendete Grösse zur Beurteilung von Verdichtungsschäden. Sie hängt stark von der Textur, dem Gehalt an organischem Material und dem Gehalt an Feinskelett ab.

Abb. 1:
Lagerungsdichte der
Feinerde in den Tiefen
0–10 cm und 20–30 cm.
Typ I, leicht (L);
Typ II, mittel (M);
Typ III, schwer (S) gestört.

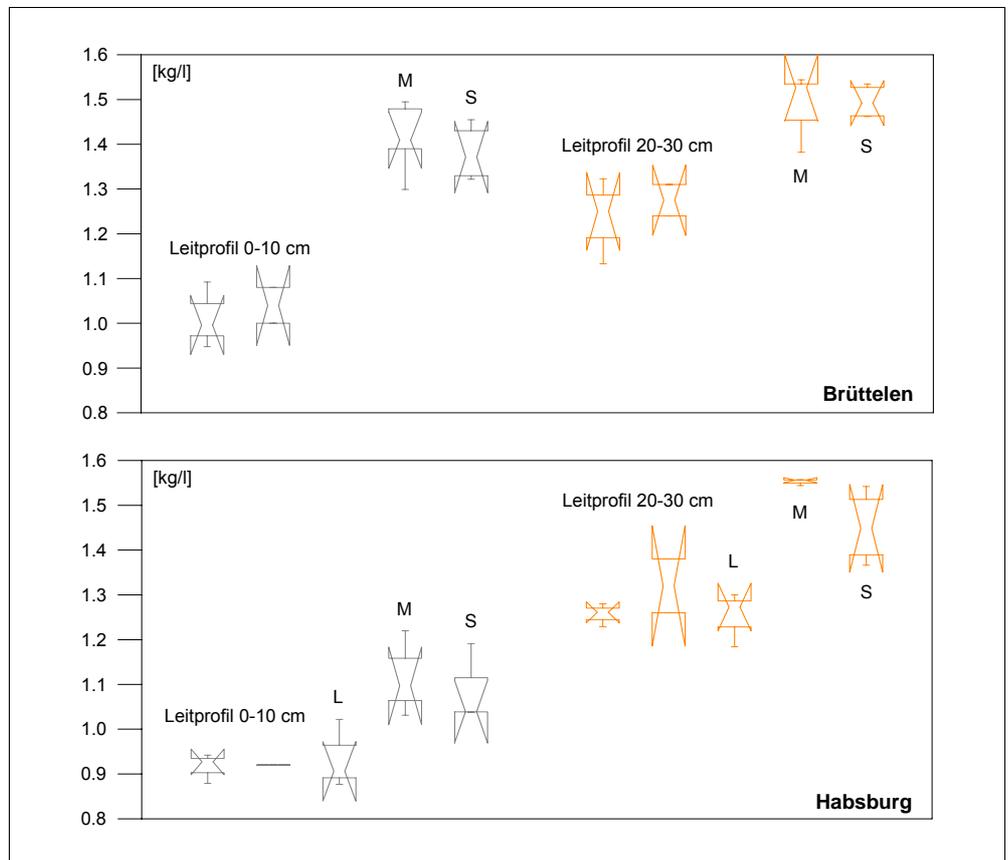


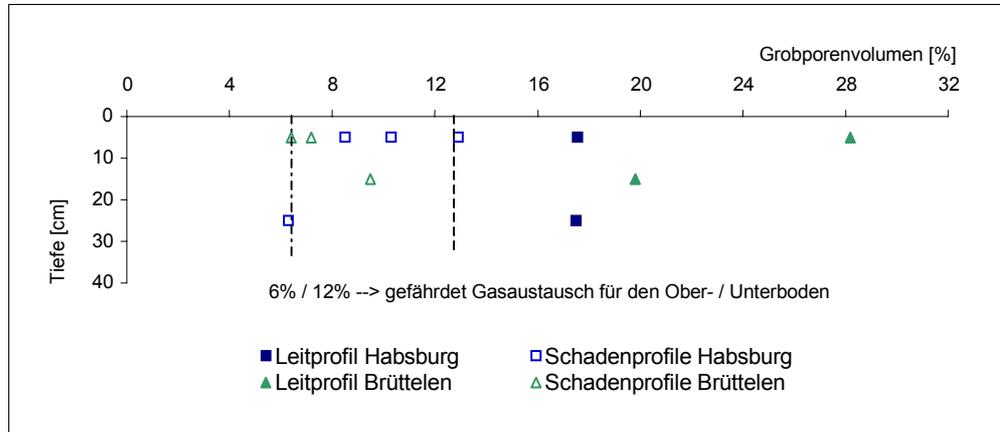
Abb. 1 zeigt, dass die Lagerungsdichten der befahrenen Stellen in 8 von 10 Fällen signifikant höher liegen als die entsprechenden Werte der Leitprofile. In allen Fällen von mittleren und schweren Schäden (Typen II und III) sind die Werte eindeutig höher.

Grobporen sind in erster Linie ein Resultat sekundärer gefügebildender Prozesse bei der Entstehung eines Bodens (biogen entstandene Poren, sog. Sekundärporen). Im Gegensatz dazu sind die Fein- und Mittelporen (körnungsbedingte Poren, sog. Primärporen) weitgehend bestimmt durch Bodenart und Lagerungsdichte. Die Grobporen sind der am «stärksten verdichtungsgefährdete Teil des Hohlraumsystems» und ein wichtiges Mass für die funktionelle Leistungsfähigkeit eines Bodens in Bezug auf dessen Transportvermögen für Gas und Wasser.

Im ungestörten Boden entfallen 50–65% des Bodenvolumens auf Hohlräume (Gesamtporenvolumen). Das Gesamtporenvolumen in gestörten Leitprofilen beträgt ca. 42–60%.

Abb. 2 zeigt, dass im ungestörten Boden rund 20–30% des Bodenvolumens auf Grobporen entfallen. In der Tiefe 0–10 cm ist deren Anteil etwas grösser als in 20–30 cm Tiefe. Das Grobporenvolumen sinkt im gestörten Boden eindeutig. Es erreicht für den Lufthaushalt kritische Bereiche zwischen 7 und 13%. In Habsburg ist der Oberboden sehr stark betroffen mit einem Verlust von 75% des Grobporenvolumens. Der mittlere Verlust liegt bei ca. 50%.

Abb. 2:
Grobporenanteil für die Leitprofile und Schadenprofile für Habsburg und Brüttelen.



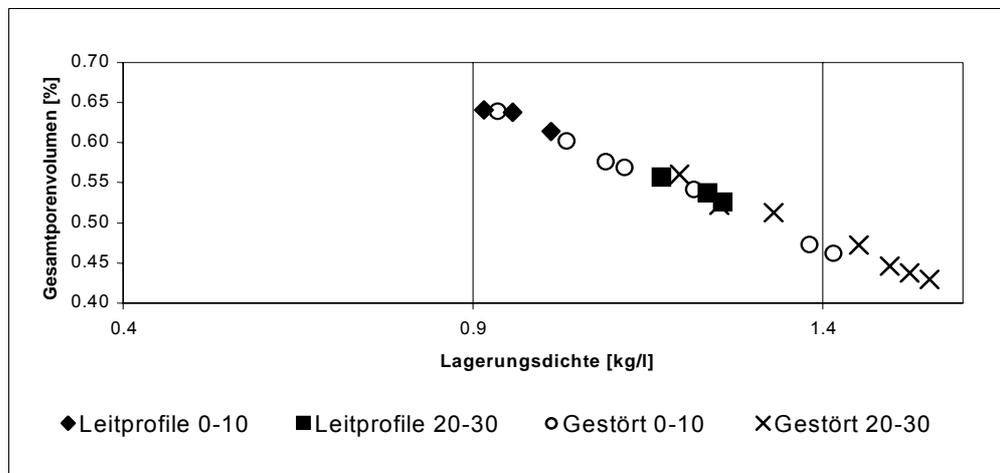
Eine Verdichtung des Bodens führt zu einer Anhebung der Lagerungsdichte (Abb. 1), einer Verminderung der Grobporen (ca. 20 cm³/100 g zu ca. 8 cm³/100 g für die ersten 20 cm) und der Porenkontinuität.

Durch diese Veränderung wurden die Wurzeln, die sich im oberen Dezimeter der Waldböden befinden (zwischen 65 und 85% des gesamten lebenden Wurzelsystems) geschädigt. Dadurch sind direkte und indirekte Schäden zu erwarten.

Direkte Wurzelschäden: Die Feinwurzeln regenerieren sich in der Regel sehr schnell, bereits nach 20–30 Tagen hatten sich in der Nähe der Wundstellen meist neue Wurzeln gebildet. Folgeschwerer sind Verletzungen von Grobwurzeln.

Indirekte Wurzelschäden: Neben dem erhöhten Durchwurzelungswiderstand verschlechtern insbesondere die gestörte Bodendurchlüftung (O₂-Mangel) und die geringe Wasserpermeabilität (Staunässe) die Lebensbedingungen für Wurzeln.

Abb. 3:
Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte der Feinerde und Durchwurzelbarkeit. Bewertung: <0,9 g/cm³: «sehr locker», 0,9–1,4 g/cm³: «gut durchwurzelbar», ab >1,4 g/cm³: «schlecht durchwurzelbar».



Die Grenze von 1,4 g/cm³ wurde in Brüttelen (mittel gestört 0–10 cm sowie mittel und schwer gestört 20–30 cm) sowie in Habsburg leicht (L2) und schwer gestört (20–30 cm) überschritten.

Die Lagerungsdichten >1,5 g/cm³ führen beim Wurzelwachstum zu relativen Wachstums-minderungen und sind als «kritisch» einzustufen. Eine solche Bewertung ist häufig unspezifisch und darf nicht für alle Baumarten verallgemeinert werden. Die hier zugrunde gelegte kritische Marke von 1,4–1,5 g/cm³ ist vermutlich eher am unteren Ende des «kritischen Bereichs» anzusiedeln.

Die Eindringwiderstände wurden mit einer PANDA-Sonde (Penetrometre Automatique Numerique Dynamique Assistée par ordinateur) bestimmt. Das Grundprinzip der Sonde basiert darauf, dass ein Sondiergestänge mit Hammerschlägen in den Boden vorgetrieben wird. Für jeden Schlag werden die Schlagkraft (Geschwindigkeit) und die Eindringtiefe des Sondiergestänges mit einem Logger erfasst und die Daten gespeichert. Aus diesen beiden Grössen errechnet sich der Eindringwiderstand gemäss der sog. «Holländer-Formel» (FABO 1998).

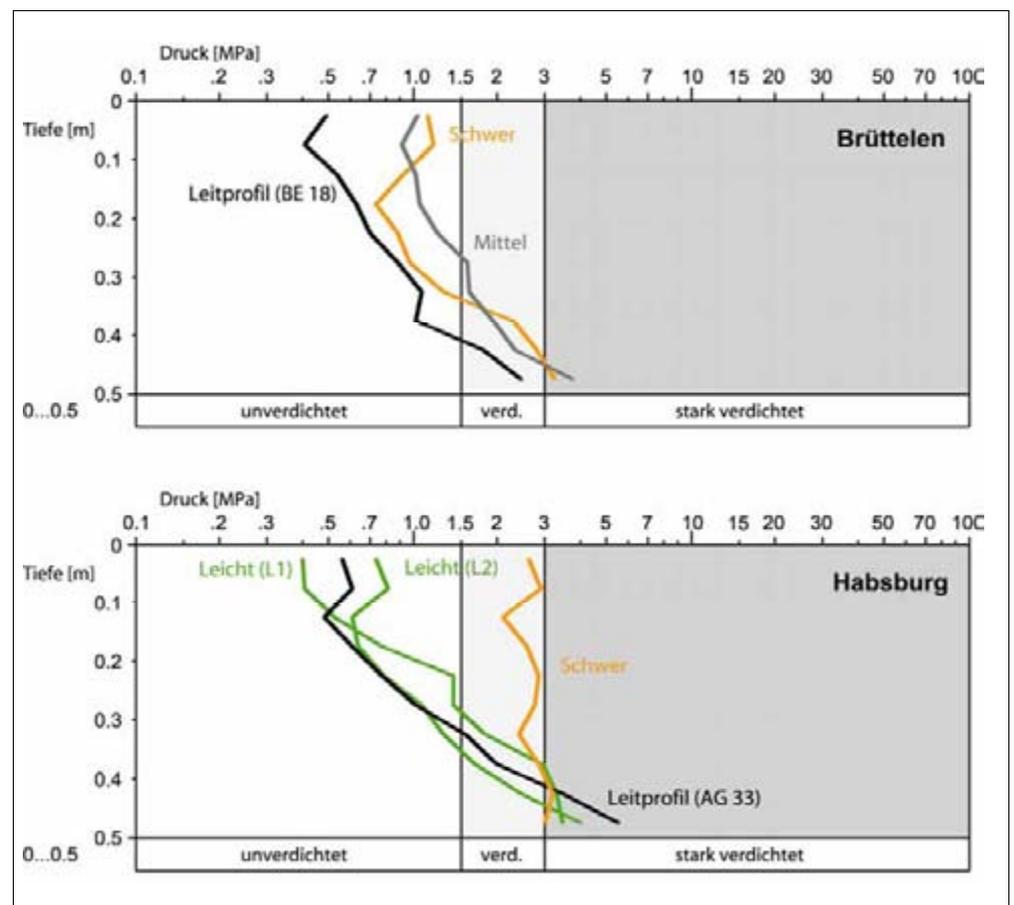


Abb. 4:
Eindringwiderstände –
gestört im Vergleich zu
ungestört (Leitprofile).

Aus den Abb. 4 geht hervor, dass die gestörten Profile tendenziell höhere Eindringwiderstände aufweisen als die vergleichbaren Referenzprofile: Bereiche mit erhöhtem Eindringwiderstand finden sich in Brüttelen in der «mittel gestörten» Spur zwischen 0–30 bzw. 40–50 cm sowie in der «schwer gestörten» Spur zwischen 0–15 bzw. 45–50 cm. In Habsburg ist eine sehr deutliche Verdichtung in der «schwer gestörten» Spur zwischen 0–30 cm festzustellen. Die beiden «leicht gestörten» Profile (L1 bzw. L2) unterscheiden sich vom Referenzprofil (AG 33) nicht signifikant.

Standörtliche Heterogenität

Die standörtliche Heterogenität der Lothar-Reservatsflächen wurde durch rund 25 Bohrungen ermittelt, die auf ein Rasternetz (20 m x 20 m) aufgenommen wurden.

Die Resultate haben gezeigt, dass ausgewählte Bodeneigenschaften von Punkt zu Punkt sehr unterschiedlich sein können. Verschiedene Mächtigkeiten wie beispielsweise der organischen Auflagehorizonte, des Ah-Horizontes oder des B-Horizontes sowie des Haupt- bzw. Nebenwurzelraumes haben gezeigt, dass der Boden keineswegs homogen ist (Anhang 3).

Störungsgrade und Flächenanteil

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden die geräumten Perimeter der Lothar-Reservatsflächen nach den ausgeschiedenen Schadtypen (Pressungen der Bodenoberfläche mit Spurbildung, sowie Störungen im natürlichen Aufbau der Bodenhorizonte) kartiert.

Für eine detailliertere Beschreibung der befahrenen Flächen wurde das Ausmass der befahrungsbedingten Verformung an der Bodenoberfläche (Störungsgrad) nach den in Beilage 1 aufgelisteten Kriterien visuell klassifiziert. Der Begriff «Störungsgrad» verweist somit auf den Zustand der Bodenoberfläche und nicht zwangsläufig auf die Ausprägung mit bodenphysikalischen Kenngrössen.

Die summierten Anteile der befahrenen Flächen nach Störungsgrad gehen aus Tabelle 1 hervor.

Tabelle 1: Befahrene Flächenanteile im Perimeter Habsburg bzw. Brüttelen.

Störungsgrad	Habsburg	Brüttelen
Summe befahren [%], davon:	26,9	67,3
Leicht	64,0	9,3
Mittel	12,7	54,4
Schwer	23,2	36,2

Die zwei aufgeführten Räumungsverfahren haben den Boden sehr unterschiedlich beeinträchtigt. Von den befahrenen Flächenanteilen her hat das flächige Aufräumen hauptsächlich zum Schadtyp IV geführt. Da ein grösser Teil der Fläche betroffen ist, ist dieses Vorgehen nicht zu empfehlen.

Einflussfaktoren	Die Schlüsselgrößen für die Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit eines Waldbodens sind hauptsächlich die drei folgenden:
Bodenfeuchte	Das Bodenwasser beeinflusst den Zusammenhalt zwischen den Bodenteilchen. In der Regel gilt: Je trockener ein Boden desto grösser sind die Kapillarkräfte, welche die Bodenteilchen zusammenhalten. Trockene Böden sind demnach grundsätzlich weniger verdichtungsempfindlich als feuchte.
Körnung / Textur	Die Körnung der Bodenteilchen bestimmt die Anzahl der Kontaktpunkte zwischen den einzelnen Teilchen und damit die Stabilität gegenüber einer mechanischen Belastung. Meist werden sandige und schluffige Böden als gefährdeter betrachtet. Mischsubstrate eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit aufweisen (so sind z.B. reine Sande kaum verformbar). Ab einem gewissen Anteil wirkt das Skelett «allein tragend» und damit positiv auf die Stabilität eines Bodens. Dieser Anteil liegt in der Größenordnung von >50%. Unterhalb dieses kritischen Gehalts kann das Skelett als neutrale Grösse betrachtet werden
Vorverdichtung	Bereits verdichtete Böden sind weniger verformbar. Dies ist der Grund dafür, dass die intensivste Verformung immer bei der ersten Überfahrt auftritt.
Arten von Verdichtungsschäden	Befahrungsbedingte Verdichtungsschäden sind bis zu einer Tiefe von 50–60 cm beobachtet worden. Die folgende Auflistung soll beispielhaft verdeutlichen, welche vielfältigen Auswirkungen eine Befahrung auf (Wald-)Böden haben kann:
Volumetrische Veränderungen des Hohlraumsystems	Volumetrische Veränderungen äussern sich in einer Zunahme der Lagerungsdichte und oft auch einer Abnahme des Grobporenanteils.
Veränderungen der mechanischen Festigkeit der Bodenmatrix	Die mechanische Überbelastungen führt zu einer dichteren Packung der Festsubstanz bzw. zu einer Zunahme der Anzahl der Kontaktpunkte unter den Bodenteilchen. Dies äussert sich in einer Erhöhung der Scherfestigkeit, einer Zunahme des Eindringwiderstands und in einer Erhöhung des Vorbelastungswerts.
Veränderungen von Leitfähigkeitseigenschaften (Strukturschäden)	Die Zunahme der Lagerungsdichte und die Abnahme des Grobporenanteils verändern die Leitfähigkeitseigenschaften des Bodens. Dasselbe gilt für die Zerstörung der Porenkontinuität. Die Grobporen werden bei einer befahrungsbedingten Verformung teilweise abgesichert und können dann wichtige Leitungsfunktionen nicht mehr wahrnehmen.

3.2.4 Folgerungen

Die unterschiedlichen Anteile befahrener Flächen sowie das unterschiedliche Ausmass der Bodenbeeinträchtigung auf den ausgewählten Versuchsflächen geben Anlass zur Vermutung, dass für die Minimierung der Bodenbeeinträchtigung im Rahmen solcher Räumungsarbeiten Optimierungsspielraum besteht.

Ansätze zur Minimierung der Bodenbeeinträchtigung durch Räumungsarbeiten sind bekannt. Speziell im englischsprachigen Raum (Australien, USA) wird das Problem der Bodenbeeinträchtigung durch Waldarbeiten intensiv untersucht. Dort wurde z.B. festgestellt, dass eine sorgfältige Vorausplanung des Erschliessungsnetzes das Ausmass der Bodenbeeinträchtigung stark beeinflussen kann.

Rolle des Standortes bzw. der Bodeneigenschaften ist zentral.

Literatur

- FABO 1998: *Messung von Bodenverdichtungen im Feld*. Teilprojekt Methodik. Hrsg. Fachstelle Bodenschutz Kt. ZH, Zürich
- LÜSCHER P., KUHN M., WALSER M. 2003: *Inventur von Bodenschäden nach Holzerntemassnahmen auf den LFI-Stichproben im Kanton Freiburg*. Dokumentation. WSL, Abt. Bodenökologie, Birmensdorf (deutsche und franz. Fassung)
- LÜSCHER P., KUHN M., WALSER M. 2003: *Inventur von Bodenschäden nach Holzerntemassnahmen auf den LFI-Stichproben im Kanton Freiburg*. Erste Ergebnisse. WSL, Abt. Bodenökologie, Birmensdorf (deutsche und franz. Fassung)
- NIEDERMAIR M. 2001: *Bodenschäden durch Räumungsarbeiten nach Windwurfschäden*. Diplomarbeit, Abt. Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich und der Abt. Bodenökologie WSL
- RESSEL D. 2001: *Bodenverdichtung durch Forstmaschineneinsatz: Verdichtung und Regeneration des Waldbodens nach Aufräumarbeiten des Orkans Lothar in der Region Habsburg (AG)*. Diplomarbeit, Abt. Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich und der Abt. Bodenökologie WSL.

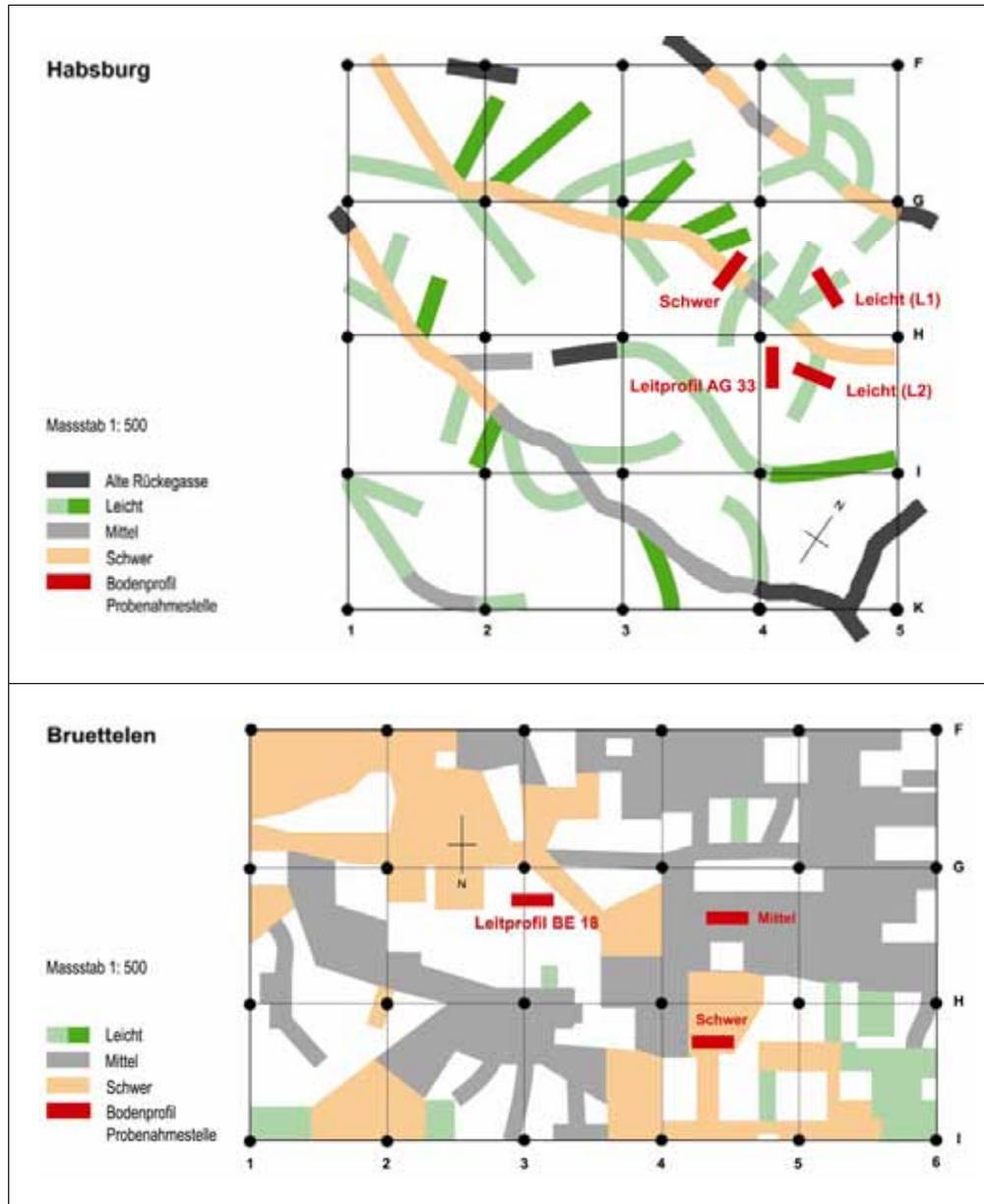
Anhang

1. Visuelle Typisierung der Fahrspuren.
2. Fahrspuren auf den Lothar-Reservatsflächen von Habsburg und Brüttelen, differenziert nach den Störungsgraden.
3. Rasterbohrungen auf den Lothar-Reservatsflächen von Habsburg und Brüttelen mit der Mächtigkeit des Ah-Horizontes und Angaben zur Gründigkeit des Hauptwurzelraumes.

Anhang 1: Visuelle Typisierung der Fahrspuren.

visuelle Typisierung	Beschreibung des Schadenbildes
<p>Typ I</p> <p>Leicht gestört</p>	<p>Die organische Auflagehorizonte (L-Horizont oder L-, F-Horizonte oder L-, F-, H-Horizonte) sind in der Radspur vorhanden und intakt. Eine natürliche Horizontabfolge ist immer vorhanden. Meist sind Anzeichen einer Pressung der organischen Auflage erkennbar.</p> <p>Keine seitlichen Aufwölbungen. Spurtiefe immer kleiner als 10 cm.</p>  <p>Organische Auflagehorizonte Ah- oder A-Horizont B- oder C-Horizont</p>
<p>Typ II</p> <p>Mittel gestört</p>	<p>Die organische Auflagehorizonte (L-Horizont oder L-, F-Horizonte oder L-, F-, H-Horizonte) fehlen vollständig oder wurde mit Ah- oder A-Material vermischt. Der Boden in der Radspur besteht aus einem Ah- oder A-Horizont oder einer verkneten Masse aus Material vom Oberboden (L-, F-, H- und Ah- oder A-Horizont). Die Farbe des Bodenmaterials ist aufgrund des hohen Anteils an organischem Material dunkel bis schwarz.</p> <p>Teilweise seitliche Aufwölbungen. Spurtiefe meist kleiner als 10 cm.</p>  <p>Ev. Aufwölbungen Organische Auflagehorizonte Ah- oder A-Horizont B- oder C-Horizont</p> <p>verknietes Oberbodenmaterial</p>
<p>Typ III</p> <p>Schwer gestört</p>	<p>Die organische Auflagehorizonte (L-Horizont oder L-, F-Horizonte oder L-, F-, H-Horizonte) und der Ah- oder A-Horizont fehlen vollständig oder wurden mit dem darunterliegenden Mineralboden (meist B oder C-Horizont) bzw. mit dem Übergangshorizont AB oder BC-Horizont vermischt. Die Farbe des Bodens ist deutlich heller als beim Typ II.</p> <p>In der Regel seitliche Aufwölbungen. Spurtiefe immer grösser als 10 cm.</p>  <p>Aufwölbungen Organische Auflagehorizonte Ah- oder A-Horizont B- oder C-Horizont</p> <p>verknietes Oberboden- und B- oder C-Material</p>
<p>Typ IV</p> <p>Zone mit flächigen Schäden (chaotisch)</p>	<p>Die Fahrspuren gehen in alle Richtungen und können vom Typ I, II oder III sein. Ein einziger Fahrspurtyp kann nicht definiert werden. Eine grosse Fläche ist durch das Befahren mit Forstmaschinen betroffen. Die organischen Auflagehorizonte (L-Horizont oder L-, F-Horizonte oder L-, F-, H-Horizonte), der Ah-Horizont und/oder der B bzw. C-Horizont werden vermischt. Die Tiefe ist unterschiedlich und nicht eindeutig bestimmbar.</p>
<p>Typ V</p>	<p>Mit Feinerde überdeckte (oft Ah- oder A-Material) oder überwachsene Fahrspuren. Ein Indiz für Befahrung können Nässezeiger bzw. Verdichtungszeiger (z.B. Binse, Hängesegge...) sein.</p> <p>Die Tiefe ist nicht eindeutig bestimmbar.</p> <p>Durch einen Bodenaufschluss ist oft eine Blaufärbung der Feinerde erkennbar (Hinweis auf mangelhafte Durchlüftung).</p>
<p>Zusätzlich sind allenfalls unabhängig vom Schadtyp Schleifspuren vom Holzrücken sichtbar. Diese werden ebenfalls auf dem Schadenformular aufgenommen und beschrieben.</p>	

Anhang 2: Fahrspuren auf den Lothar-Reservatsflächen von Habsburg und Brüttelen, differenziert nach den Störungsgraden.



3.3 Regenerationsfähigkeit von Bodenschäden im Wald

3.3.1 Rahmenbedingungen

Seit **November 2002** läuft das Projekt «Mechanische Belastungen von Waldböden: Regenerationsfähigkeit von Bodenschäden mit und ohne Sanierungsmassnahmen» auf den Lothar-Reservatsflächen Habsburg, Messen und Brüttelen. Ein Ausgangszustand des Bodens, wie er sich nach den Räumungsarbeiten präsentiert, wurde in gestörten als auch in ungestörten Flächen festgehalten.

Einerseits wird die natürliche Regenerationsfähigkeit verfolgt. Andererseits wurden gezielte Sanierungsmassnahmen eingeleitet. Der Erholungsprozess wird mit der Pflanzung von Erlen und Weiden gefördert. Das Verfahren fördert die Durchwurzelung, damit auch das Porensystem und die biologische Aktivität der Böden.

Der kurzfristige Erfolg wird mit Hilfe von Dichte-, Durchwurzelungs- und Bodenaktivitätsmessungen überprüft. Der langfristige Erfolg der Massnahmen muss in Nachfolgeprojekten überwacht werden.

Die auf den Lothar-Reservatsflächen vorhandenen unterschiedlichen Standortstypen erlauben, dass die aufgeführte Fragestellung unter verschiedenen Voraussetzungen (Varianten des Waldmeister-Buchenwaldes mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften) überprüft werden kann.

Fragestellung

Mit welchen Mitteln kann die Regeneration beeinträchtigter Böden gefördert und beschleunigt werden?

Zusammenfassung

Bodenschäden durch das Befahren benötigen meist sehr lange Regenerationszeiträume bzw. sind teilweise auch nahezu irreversibel.

Bei beeinträchtigten Böden können geeignete Sanierungsmassnahmen die Regeneration fördern bzw. beschleunigen. Diese Massnahmen sollen die natürlichen Regenerationsprozesse unterstützen.

Verschiedene Verfahren wurden geprüft, um die Durchwurzelung, damit auch das Porensystem und die biologische Aktivität der Böden zu erhöhen.

3.3.2 Folgerungen für Massnahmen im Hinblick auf eine zukünftige Sturmschadenbewältigung

Erste Erfahrungen und Auswertungen sind nach einer Zweitaufnahme zu erwarten. Sie sollen laufend umgesetzt werden (Kurstätigkeit, Merkblätter).

3.3.3 Synthesebericht zum festgehaltenen Ausgangszustand

Einleitung

Die Regenerationsfähigkeit eines Bodens ist die Fähigkeit, nach verschiedenen Arten von Eingriffen oder Schädigungen zum ursprünglichen Zustand zurückzukehren (BGS, 1999).

Während des Regenerationsprozesses wird die Krümelstruktur im Oberboden und die Porenkontinuität in den Unterboden wiederhergestellt.

Die Regenerationsfähigkeit des Bodens kann entweder natürlich geschehen oder mit der Hilfe von Sanierungsmaßnahmen gefördert und unterstützt werden.

Der natürliche «Lagerungszustand» eines Waldbodens unter einem naturnahen Bestand wird hauptsächlich durch Wurzelwachstum und die Tätigkeit von Bodenorganismen bestimmt. Der «Lagerungszustand» ist also unter idealen Voraussetzungen im Wesentlichen selbstregulierend. Bei der Beurteilung der Regenerationsfähigkeit müssen die Rahmenbedingungen dieser Selbstregulation berücksichtigt werden. Im Fall geräumter Windwurfflächen beeinflussen direkte und indirekte Veränderungen diese Rahmenbedingungen unterschiedlich stark.

- Direkte Veränderungen ergeben sich durch befahrungsbedingte Störungen des Profilaufbaus, insbesondere durch die Störung von organischen Auflagehorizonten und humushaltigem Oberboden (Verdichtung, Vermischung, Abtrag) und die damit einhergehende Beeinträchtigung der Keim- und Anwuchsphase von Jungpflanzen. Mit einer Beeinträchtigung der natürlichen Verjüngung wird ein wesentlicher «Katalysator» für die Aufrechterhaltung und Regeneration des Lagerungszustandes gehemmt (Wurzelwachstum).
- Indirekte Veränderungen durch den Wegfall des Altbestands (geringerer Wasserverbrauch der Vegetation, Unterbrechung der kontinuierlichen Streunachlieferung), vergleichbar mit den Folgeerscheinungen von Kahlschlägen (längerfristige Abnahme des Nährstoffangebots durch raschen und verstärkten Abbau und grössere Auswaschung, zeitliche Verlängerung von Phasen mit mangelhafter Durchlüftung bei staunassen Böden durch geringeren Wasserverbrauch der Vegetation). Dieser indirekte Wechsel der Rahmenbedingungen beeinflusst die Durchwurzelung ebenso wie die durch das veränderte Mikroklima beeinträchtigte Tätigkeit der Bodenorganismen (Erfahrungen aus den VIVIAN-Projekten).

Methode

Um die Regenerationsfähigkeit zu untersuchen, wurden drei Ansätze gewählt (Abb. 1):

- Regeneration ohne Massnahmen. Die Fahrspuren wurden nicht behandelt und als Referenz für den gestörten Boden genommen.
- Regeneration durch das Einsetzen von Bäumen mit intensivem Durchwurzelungspotential (Korbweiden und Schwarzerlen). Diese Bäume wurden in den Fahrspuren gepflanzt.
- Regeneration durch das Einsetzen von Bäumen auf Substrat. Die Fahrspuren wurden mit Kompost gefüllt und mit Bäumen (Korbweiden und Schwarzerlen) bepflanzt.

Daneben wurde im ungestörten Boden eine Referenzfläche mit den gleichen Bäumen eingerichtet und eine Referenzfläche ohne Bepflanzung erfasst.

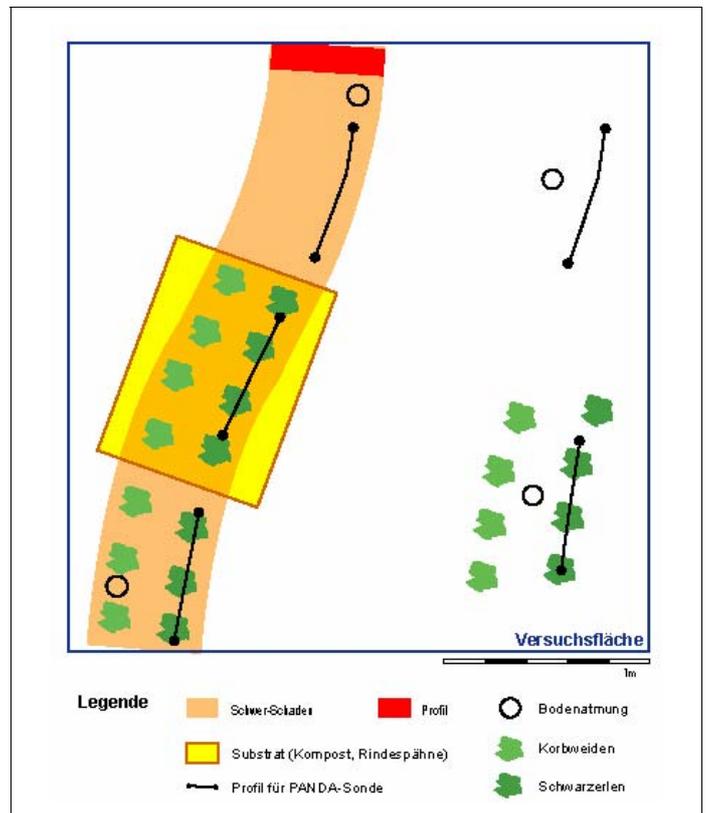


Abb. 1:
Versuchsfläche mit den
verschiedenen Methoden.

Verschiedene Verfahren wurden geprüft, um die Durchwurzelung, damit auch das Porensystem und die biologische Aktivität der Böden zu erhöhen.

Um die Folgen der Bodenverdichtung zu mildern und den Boden zu revitalisieren, soll der Einsatz von Stecklingen schnellwachsender Gehölze (Weiden und Erlen) als Vorbaubaumarten den Erholungsprozess beschleunigen. Da die Schwarzerlen und die Korbweiden eine ziemlich höhere Durchwurzelungsintensität als andere Baumarten besitzen, wurden sie für diese Untersuchung ausgewählt.

Die natürliche Regenerationsfähigkeit wird auch auf den erfassten LFI-Stichproben mit Bodenschäden im Kanton Freiburg mit den erwähnten Messmethoden überwacht.

Literatur

- BGS 1999: *Physikalischer Bodenschutz*. Dokument Nr. 9. Juris Druck und Verlag, Dietikon
- LÜSCHER P. 2002: *Humus dynamics and changes in rooting patterns in windthrow areas*.
For. Snow Landsc. Res. 77, 1/2: 49–59.
- LÜSCHER P. 2003: *Humusdynamik und Veränderungen im Wurzelraum*. Merkblatt für die Praxis, «Vivians Erbe». WSL, 8903 Birmensdorf.

3.4 Entscheidungshilfen zum Schutz des Bodens bei Räumungsarbeiten nach Flächenschäden

Kernfrage

Wie kann eine als notwendig erachtete Räumung einer Sturmschadenfläche möglichst bodenschonend ausgeführt werden, und unter welchen Bedingungen ist aus bodenökologischer Sicht der Verzicht auf Räumung angezeigt?

3.4.1 Erkenntnisse aus den Untersuchungen auf Lothar Reservatsflächen

Die Verdichtungen in Radspuren zeigten sich sowohl in den morphologischen Merkmalen als auch in den bodenphysikalischen Messungen (siehe Kap. 3.4 Bodenverdichtung).

Es besteht, obschon die Bodenfeuchtigkeit nicht erfasst wurde, ein auffälliger Zusammenhang zwischen ungünstigen Witterungsbedingungen und den festgestellten Verdichtungsschäden (Brütteln, Messen).

Ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Bodenverträglichkeit von Holzernemaschinen und der quantifizierten Schäden ist nicht ersichtlich. Aufgrund der qualitativen Beschreibung der wenigen Bodenschäden in Walkringen kann angenommen werden, dass die Räumungstechnik ohne Schlepper und Harvester vergleichsweise bodenschonend war. Der hohe Anteil mässig und stark gestörter Spuren in Brütteln, wo bodenverträgliche Maschinen zum Einsatz kamen, ist ein Anzeichen dafür, dass eine grossflächige Beanspruchung nicht zwingend zu geringeren Bodenbeeinträchtigungen führt.

Das Spurenmuster in den geräumten Flächen (siehe Kap. 3.4 Bodenverdichtung) lässt Rückschlüsse über das Erschliessungskonzept zu. Ein Vergleich der Flächen Brütteln mit den übrigen Flächen zeigt, dass eine flächige Erschliessung nicht zwingend zu geringeren Bodenverdichtungen führt. Ein negativer Zusammenhang zwischen der beanspruchten Fläche und der Intensität der Bodenschäden (geringe Fläche mit grosser Verformung vs. grosse Fläche mit geringer Verformung) ist also nicht ersichtlich.

Aus den vorliegenden Untersuchungen (siehe Kap. 3.4 Bodenverdichtung) können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Bei Räumungsarbeiten entstehen Bodenverdichtungen unterschiedlichen Ausmasses.
- Die Bodenfeuchtigkeit hat einen grossen Einfluss auf das Ausmass der Bodenschäden.
- Selbst unter kaum erkennbaren Radspuren sind Verdichtungen des Bodens und gestörte Infiltrationsverhältnisse zu erwarten.
- Mit dem Einsatz verhältnismässig leichter Maschinen allein ist noch keine bodenschonende Räumung sichergestellt.
- Mit flächigem Befahren können Bodenverdichtungen nicht vermieden werden. Es gibt Indizien für folgende These: je besser das Erschliessungskonzept, desto geringer die Bodenschäden.

- Der Einfluss der Räumungstechnik ist aufgrund der Beobachtungen an den nicht kartierten Standorten vermutlich gross.
- Massnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen werden nur zum Teil umgesetzt. Das Bewusstsein des zuständigen Forstpersonals ist vorhanden; die Entscheidungsfindung zum Schutz des Bodens geschieht derzeit noch eher intuitiv. So mindestens könnte die folgende Aussage eines der betroffenen Kreisförsters interpretiert werden: «Bei den Lothar Räumungsarbeiten wurde viel Schaden angerichtet.»

3.4.2 Folgerungen

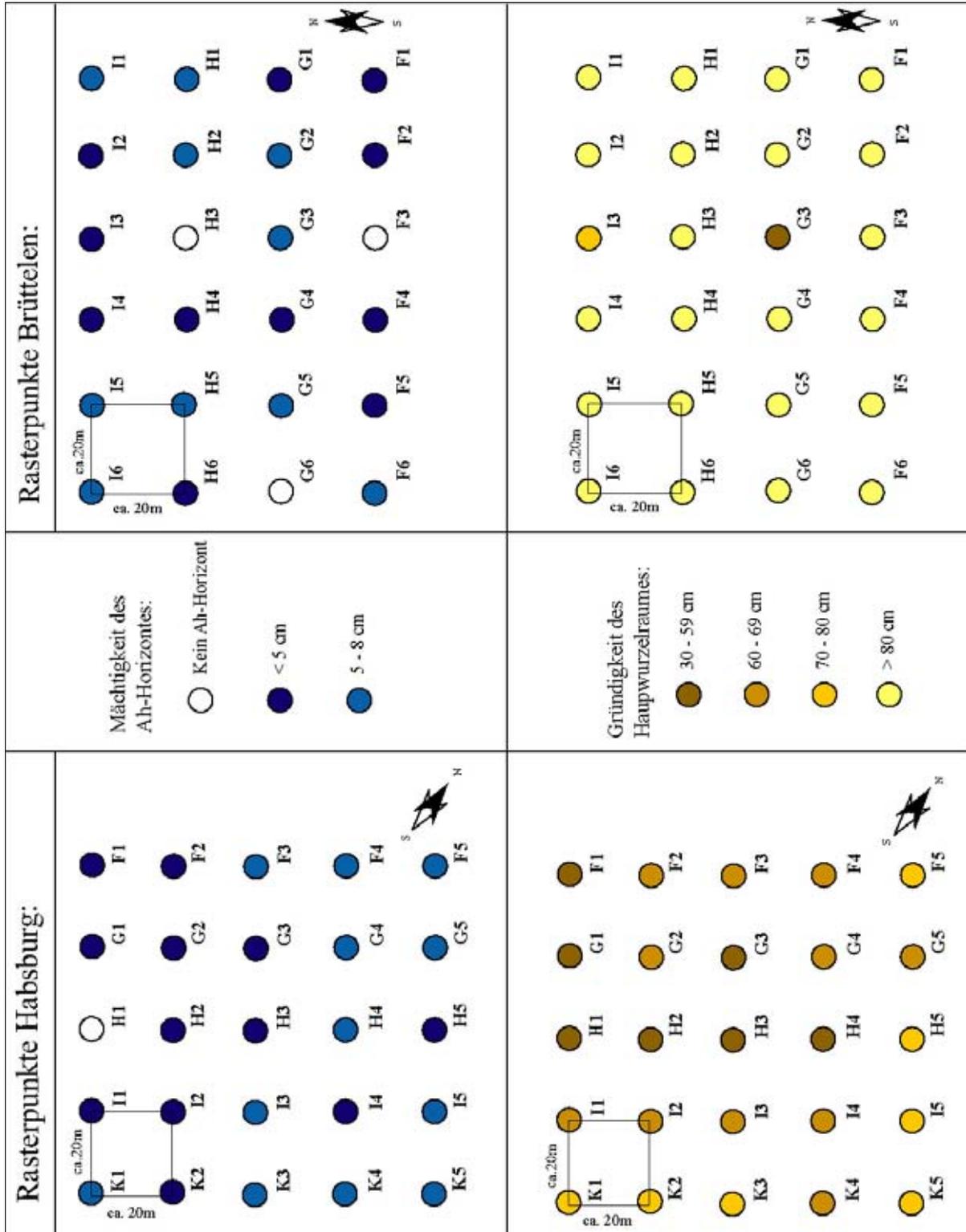
Um den Standort nachhaltig bewirtschaften und dem gesetzlichen Rahmen des Umweltrechts genügen zu können, sind Anstrengungen zum Schutz des Bodens erforderlich. Es sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen, wie:

- Verdichtungs- und Erosionsempfindlichkeit des Bodens
- Aktuelle Bodenfeuchtigkeit
- Erschliessung
- Maschinen und technische Ausrüstung
- Vorgehen beim Räumen und Priorisierung
- Räumungspriorität
- weitere Massnahmen (z.B. Astteppich)

Die Räumungsarbeiten nach Flächenschäden sind also sorgfältig zu planen, um Bodenschäden minimieren zu können. Der Forstdienst hat die Räumungsteams gemäss den vertraglichen Vorgaben und Nutzungsprioritäten klar zu führen und zu kontrollieren, um unnötige Bodenschäden zu vermeiden.

Es wurde ein Leitfaden erarbeitet, der es dem Praktiker erlaubt zu entscheiden, unter welchen Umständen welche Räumungsmassnahmen erforderlich sind oder ob auf eine Räumung verzichtet werden soll. Er soll auch Möglichkeiten zur Gestaltung von Verträgen mit Unternehmern und zur Kontrolle von Massnahmen aufzeigen.

Anhang 3: Rasterbohrungen auf den Lothar-Reservatsflächen von Habsburg und Brüttelen mit der Mächtigkeit des Ah-Horizontes und Angaben zur Gründigkeit des Hauptwurzelraumes.



3.5 Einfluss von Bodeneigenschaften auf die Wiederbewaldung

In vier Sturmflächen (Tab. 1) wurde der Einfluss verschiedener Schädigungs- und Räumungsvarianten auf den Boden und den Jungwuchs untersucht. Die Versuchsvarianten umfassten Liegenlassen von Sturmholz, schonende (d.h. den Boden möglichst wenig verdichtende) und nicht schonende Räumung sowie eine Kontrolle in einem daneben stehenden, nicht geworfenen Wald. Untersucht wurden Parameter der Bodenphysik, des Bodenchemismus, der Bodenbiologie und der Durchwurzelung von jungen Buchen. In der Fläche Brislach wurden die genannten Varianten noch durch eine Variante mit 5–8 cm dicker Schnitzelabdeckung im Wald und in der Sturmfläche ergänzt.

Folgen des Sturms selbst auf die Bodenchemie und -physik konnten in diesen Versuchsanordnungen nicht nachgewiesen werden, wie der Vergleich zwischen den Versuchsvarianten «Wald» und «nicht geräumt» zeigt. Dagegen wirkt sich die Art der Räumung sowohl auf die Physik als auch auf die Chemie sowie die Durchwurzelung aus:

3.5.1 Bodenphysikalische Eigenschaften

Die Wasserleitfähigkeit war der empfindlichste Parameter für den Nachweis einer Bodenverdichtung. Sie wurde mit dem Doppelringinfiltrometer in 4–5 Wiederholungen pro Versuchsvariante gemessen (gesättigte Wasserleitfähigkeit). Als Mass für die gehinderte Durchlüftung wurde die CO₂-Konzentration der Bodenluft in unterschiedlichen Bodentiefen analysiert (5–9 Wiederholungen pro Tiefe und Versuchsvariante). Die Bodenluft wurde mit Spezialsonden aus dem Boden extrahiert und mit einem IRGA analysiert. Die zum Teil gefundenen Unterschiede zwischen «nicht verdichtet» und «Wald» sind wohl eher auf übersehene Verdichtungen zurückzuführen als auf Sturm- oder andere Räumungseinflüsse. Trockenraumdichte und Grobporenvolumen wurden anhand von Stechzylinderproben bestimmt, die in jeweils 5 Bodenprofilen pro Versuchsvariante und Tiefenstufe entnommen wurden.

- Die Wasserleitfähigkeit ist in den verdichteten Bereichen aller vier Windwurf-flächen signifikant geringer als in den unverdichteten Bereichen und im Bestand (Abb. 1). Vor allem in Brislach und in Frienisberg werden unter Verdichtung geringe bis sehr geringe Werte erreicht. Entsprechend ist die Wassersättigung des Bodens in den verdichteten Partien hoch. In der Folge kommen Binsen auf. Ein Vergleich der gemessenen Sickerwasserraten mit der Regenintensität zeigt, dass verdichtete Böden auch durchschnittliche Regenereignisse nicht mehr schlucken können, was zu hohen Abflussspitzen führt und in der Folge ein erhöhtes Erosionsrisiko darstellt.
- Das Grobporenvolumen, welches im Oberboden normalerweise 7–12% des Bodenvolumens ausmachen sollte (BENZLER et al. 1982), beträgt in Rafz rund 5% (auch in der nicht verdichteten Variante), in Brislach 1–2%, in Frienisberg 4% und in Habsburg 3% (Abb. 2). In Habsburg ist generell bei allen Varianten

ein geringeres Grobporenvolumen festzustellen, was ev. ein Hinweis auf alte Verdichtungen ist.

- Die Trockenraumdichte wird durch die Art der Räumung von den gemessenen Parametern am wenigsten beeinflusst. In Rafz überschreitet sie in der verdichteten Variante bereits schon im Oberboden einen Wert von $1,25 \text{ g/cm}^3$, der bei Parabraunerden aus Löss für die Wurzelentwicklung von Buchenkeimlingen als kritisch beschrieben wurde (HILDEBRAND 1983) (Abb. 3). In Brislach wird dieser Wert in der Variante «verdichtet» und «Wald» erreicht und in Habsburg in allen Varianten. Solche Verdichtungen verhindern vor allem die Vertikalverwurzelung (Abb. 5). Gelingt es dem Baum nicht im Verlaufe seiner Entwicklung, sich in die Tiefe zu verwurzeln, kann sich das Risiko für Windwurf und Trockenstress erhöhen. Erste Ergebnisse vier Jahre nach «Lothar» weisen denn auch darauf hin, dass auf verdichteten Stellen der Lothar-Sturmflächen die Tiefenverwurzelung von jungen Buchen gehemmt ist, sowohl bei der Naturverjüngung als auch bei Pflanzungen.
- Vermindertes Grobporenvolumen und Diskontinuitäten im Porenraum führen zu einem verminderten Austausch der Bodenluft mit atmosphärischer Luft. Ein gutes Mass dafür ist die CO_2 -Konzentration. Sie erreicht zweieinhalb Jahre nach Lothar in Frienisberg und teilweise auch in Brislach in einer Tiefe von 5 cm bei der Variante «verdichtet» Bereiche von $>0,6\text{--}1 \text{ Vol}\%$ (Abb. 4); Konzentrationen, bei denen GAERTIG et al. (2001) eine verminderte Feinwurzelvitalität fanden. Für die Wertung der CO_2 -Konzentrationen in den übrigen Bodentiefen fehlen entsprechende Vergleichswerte.

Tabelle 1: Bodentypen der vier Sturmflächen.

Fläche	Bodentyp
Brislach	Pseudovergleyte Parabraunerde
Frienisberg	Braunerde
Habsburg	Parabraunerde
Rafz	Parabraunerde-Pseudogley

Abb. 1:
Gesättigte Wasserleitfähigkeit (Doppelringinfiltrrometer) in den Lothar-Versuchsflächen. Gleiche Buchstaben kennzeichnen nichtsignifikante Unterschiede innerhalb eines Standortes. Einstufung der Leitfähigkeiten nach BENZLER et al. (1982).

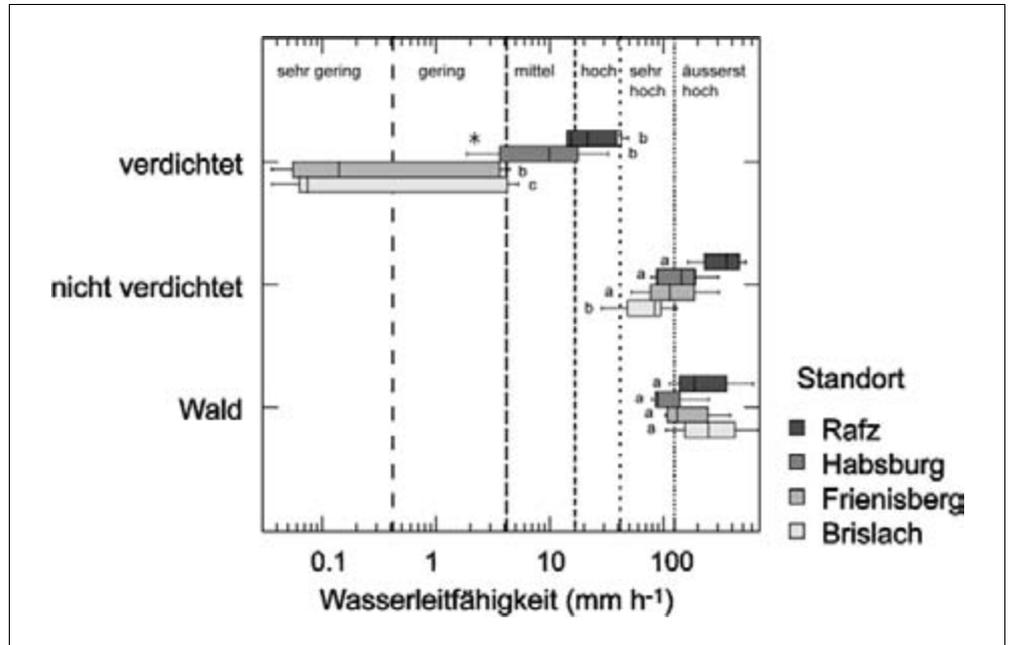


Abb. 2:
Grobporenvolumen in verschiedenen Bodentiefen in den Lothar-Versuchsflächen. Gleiche Buchstaben kennzeichnen nichtsignifikante Unterschiede. Einstufung nach BENZLER et al. (1982).

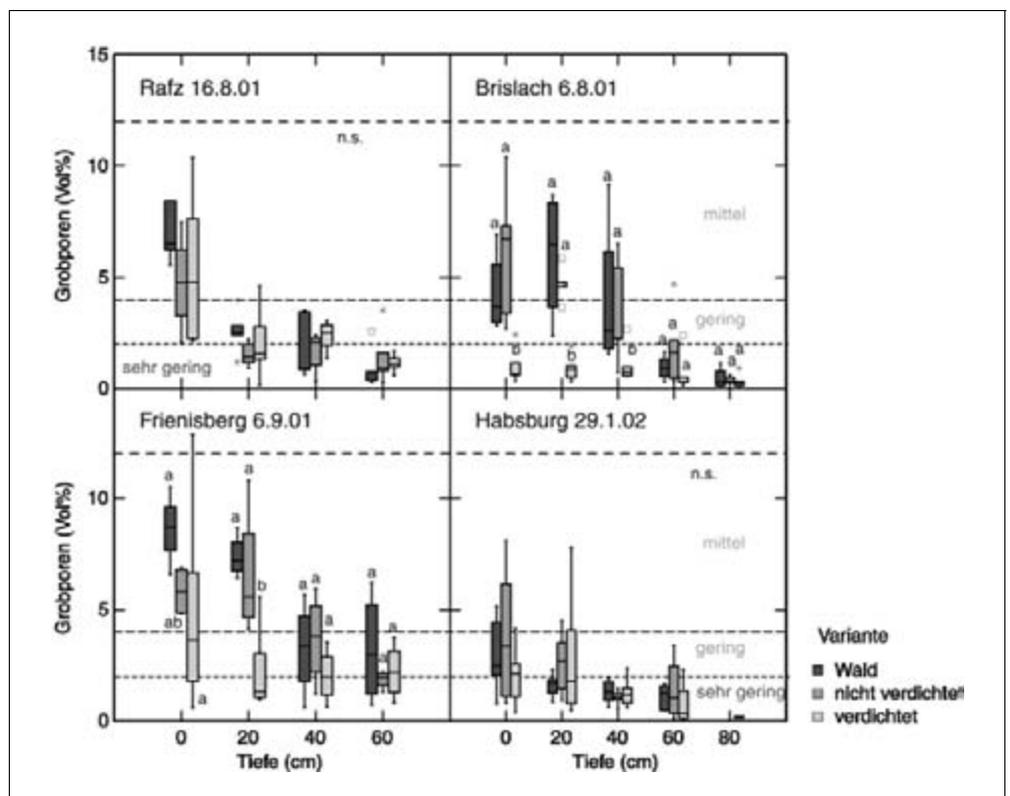


Abb. 3:
Trockenraumdichten in
verschiedenen Bodentie-
fen der Lothar-
Versuchsflächen. Gleiche
Buchstaben kennzeichnen
nichtsichnifikante Unter-
schiede.

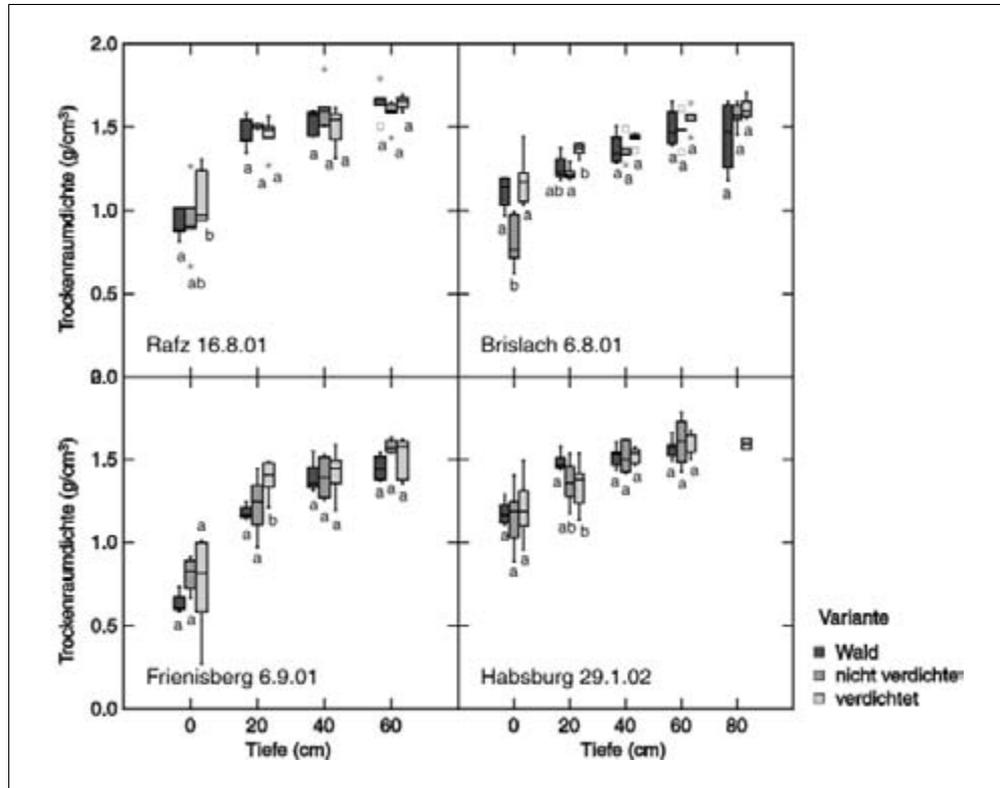


Abb. 4:
CO₂-Konzentration in
verschiedenen Bodentie-
fen der Lothar-Ver-
suchsflächen. Die Einstu-
fung der Konzentrationen
(gestrichelte Linien)
erfolgte nach GAERTIG et
al. (2001) für eine Boden-
tiefe von 5 cm.

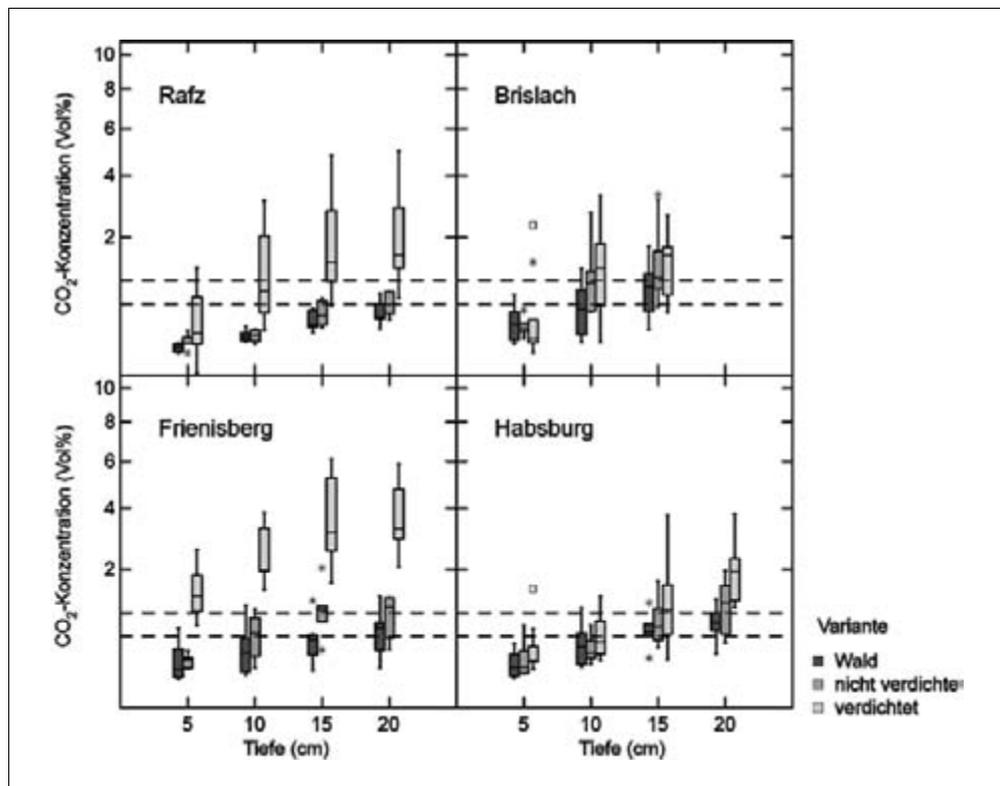




Abb. 5: Tiefenverwurzelung von jungen Buchen vier Jahre nach «Lothar» in verdichtetem Boden (links) und in nicht verdichtetem Boden (rechts). Die Marken an den Wurzeln sind im Abstand von 10 cm angebracht (Sturmfläche Brislach).

Fazit

Die in allen vier Sturmflächen festgestellte Bodenverdichtung wirkt sich sowohl wegen der mechanischen Verdichtung als auch wegen der damit verbundenen CO₂-Anreicherung negativ auf die Wurzelentwicklung aus. Insbesondere die Tiefenverwurzelung ist davon betroffen.

3.5.2 Bodenchemismus

Der Bodenchemismus wurde mittels keramischen Sauglysimetern untersucht, die in fünffacher Wiederholung pro Fläche und Versuchsvariante jeweils in Tiefen von 15 bis 20 cm und 80 cm installiert wurden. Es ist kein sturmbedingter Einfluss auf die Bodenchemie zu beobachten. Sie wird jedoch durch die Art der Räumung beeinflusst. Herausragendstes Ergebnis ist die erhöhte Nitratkonzentration in der Bodenlösung der Variante «nicht geräumt». Die Verdichtung führt zu reduzierenden Verhältnissen mit entsprechenden bodenchemischen Folgen.

- Die Bodenacidität ist im Oberboden der verdichteten Variante infolge der reduzierenden Verhältnisse geringer als in der nicht verdichteten Variante (Abb. 6)
- Die Nitratkonzentration im Sickerwasser ist in allen drei Flächen bei der Variante «nicht geräumt» deutlich am höchsten (Abb. 7)

- Das BC/Al-Verhältnis im Sickerwasser zeigt trendmässig in allen drei bzw. vier Sturmflächen eine raschere Abnahme bei den Varianten «nicht geräumt» und «Wald» (Variante «nicht geräumt» nur in den Flächen Brislach, Frienisberg und Habsburg) (Abb. 8).
- Erhöhte Manganwerte im Sickerwasser können bei der Variante «verdichtet» infolge der reduzierenden Verhältnisse und unter der Schnitzelabdeckung in Brislach beobachtet werden (Abb. 9).

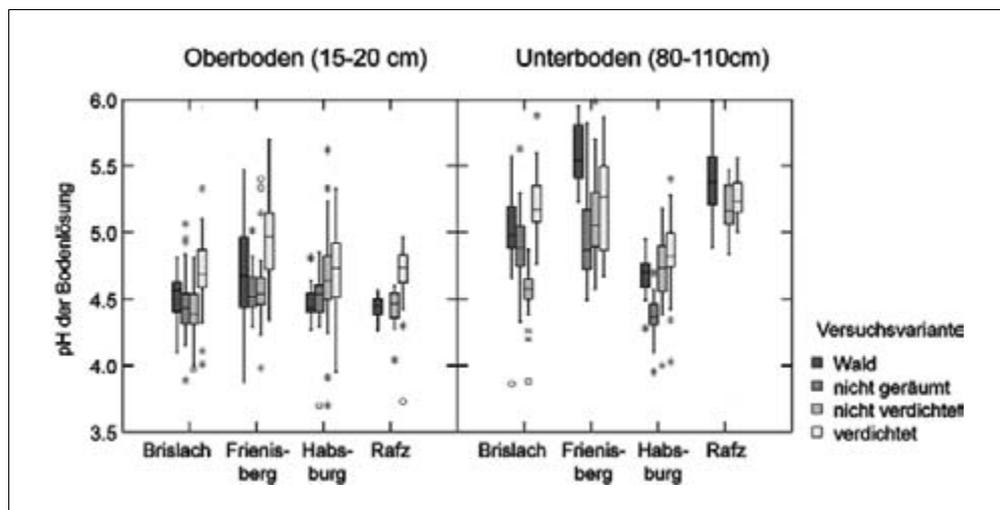


Abb. 6:
pH-Werte im Boden-
wasser zwischen April
2001 und Mai 2003.

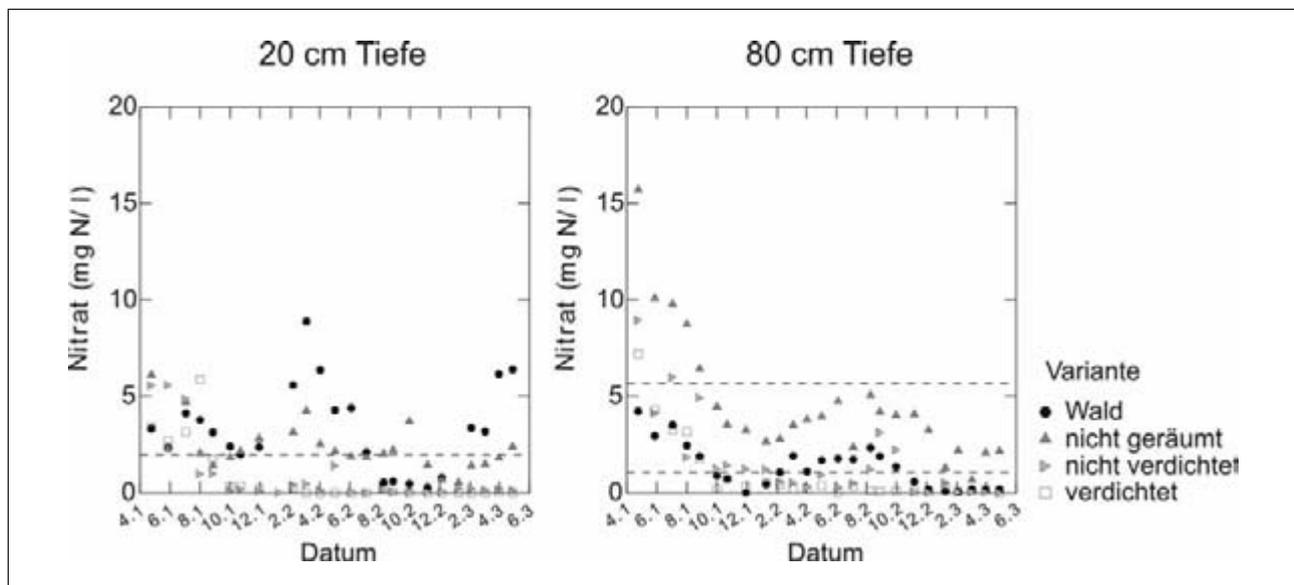


Abb. 7: Entwicklung der Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung in den verschiedenen Versuchsvarianten der Sturmfläche Habsburg. Im Oberboden ist als gestrichelte Linie diejenige Konzentration eingezeichnet, bei der MATZNER und MURACH (1995) eine Hemmung des Feinwurzelwachstums von Fichten beobachteten. Im Unterboden entspricht die untere gestrichelte Linie der kritischen N-Auswaschung nach UN/ECE (1992), die obere Linie dem Qualitätsziel für Trinkwasser in der Schweiz (=25 ppm NO_3^-).

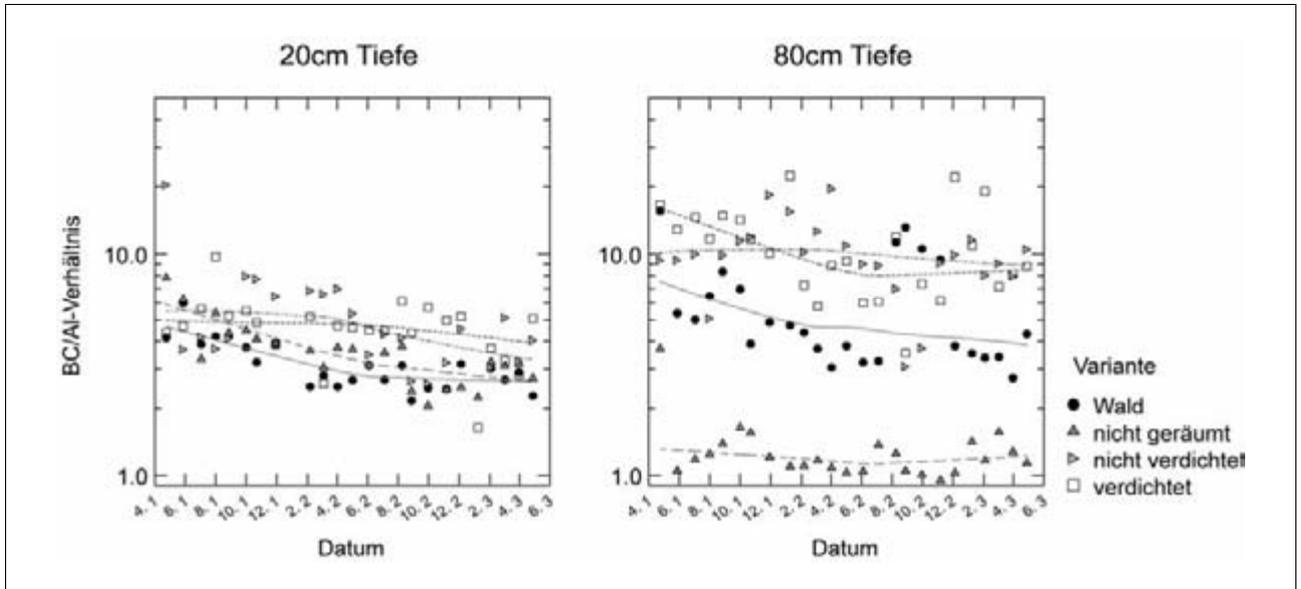


Abb. 8: Entwicklung des Verhältnisses zwischen basischen Kationen und Aluminium (BC/Al) in der Bodenlösung in den verschiedenen Versuchsvarianten der Sturmfläche Habsburg.

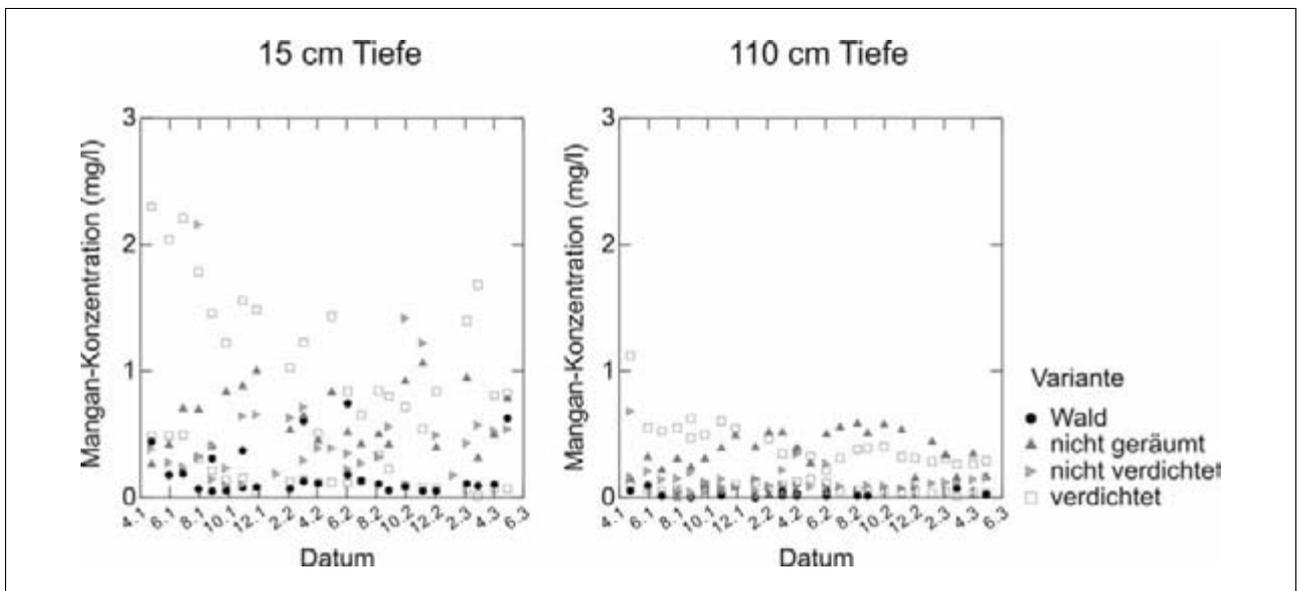


Abb. 9: Entwicklung der Mangankonzentration in der Bodenlösung in den verschiedenen Versuchsvarianten der Sturmfläche Frienisberg.

Fazit

Die hier gemessenen Parameter des Bodenchemismus werden durch die Bodenverdichtung nur marginal beeinflusst. Einerseits kann infolge der Verdichtung eine leicht verminderte Bodenacidität beobachtet werden. Andererseits sind die erhöhten NO_3 -Werte in der Variante «Liegenlassen» erwähnenswert.

3.5.3 Bodenbiologie

Im Zusammenhang mit der Bodenverdichtung wurde als bedeutender bodenbiologischer Parameter die Regenwurmpopulation untersucht, und zwar getrennt nach Ökogruppen gemäss GLASSTETTER (1991). Diese Einteilung beinhaltet 3 Gruppen, nämlich Vertikalbohrer (*Nicodrilus*, *Lumbricus*), Horizontalbohrer (*Octolasion*, *Allobophora*) und Streubewohner. Die Regenwürmer wurden durch Ausheben von je drei Gruben mit einer Seitenlänge von 0,5 m und einer Tiefe von 40 cm erfasst. Die unterhalb dieser Tiefe lebenden Würmer wurden durch Eingiessen einer Senfsuspension ausgetrieben.

- Generell ist die Regenwurmpopulation in den Sturmflächen mit Ausnahme von Rafz mit im Mittel 10 Individuen/m² säurebedingt (MAKESCHIN 1994) gering (Abb. 10, 11).
- Die vorgefundenen Würmer sind grossenteils Streubewohner und tragen insgesamt wenig zur Bodenlockerung bei.
- Eine Verdichtung vermindert zusätzlich die Anzahl Vertikal- und Horizontalbohrer
- Die Variante «nicht geräumt» unterscheidet sich nicht signifikant von den übrigen Varianten
- Erste Versuche mit Holzschnitzelabdeckung ergaben nach 3 Jahren eine deutliche Förderung der Regenwurmpopulation (im Mittel 88 Individuen/m²), insbesondere der Vertikal- und Horizontalbohrer. Diese Versuchsanordnung war nicht repliziert und ist deshalb vorerst vorsichtig zu bewerten. Es ist zu prüfen, ob Schnitzelabdeckung als mögliche Massnahme zur Regeneration verdichteter Böden in Frage kommen könnte (Abb. 10).

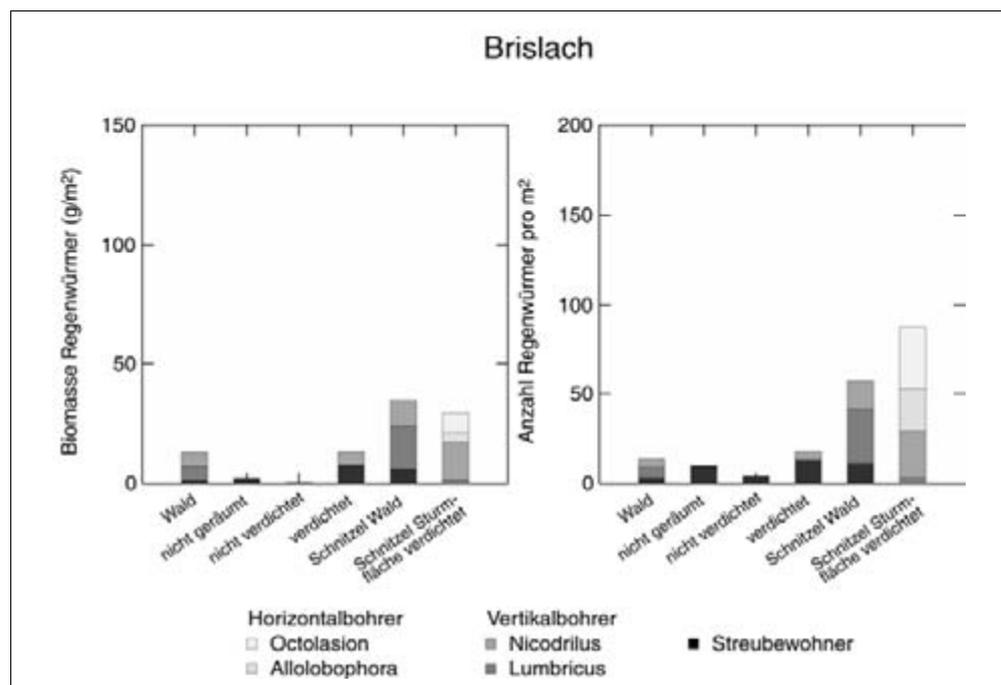
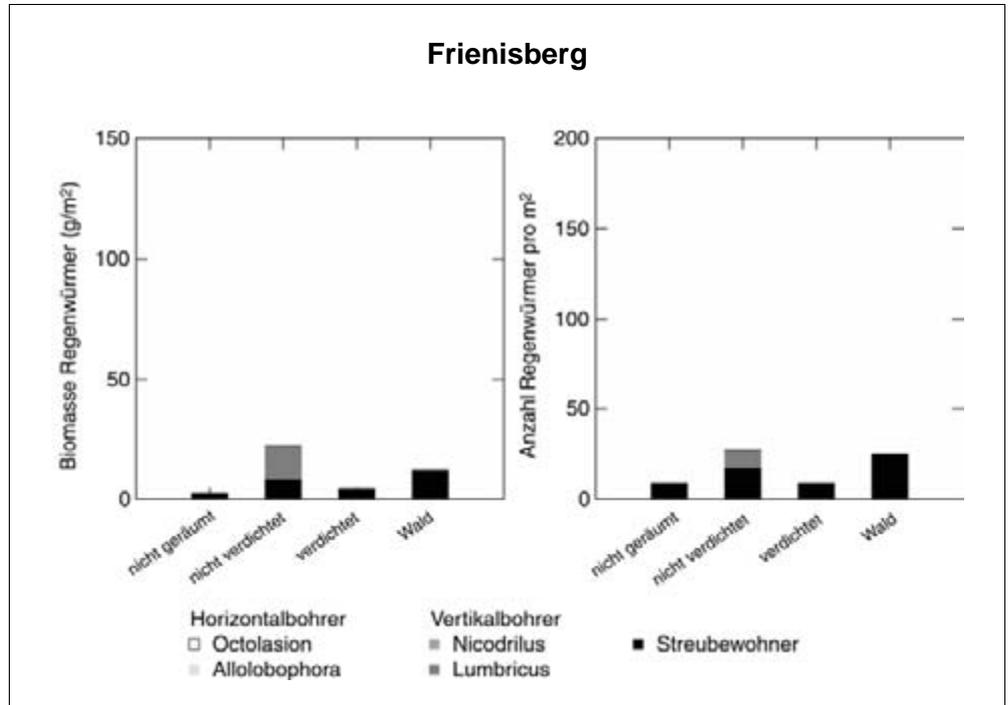


Abb. 10: Regenwurmpopulation, getrennt nach Ökogruppen, in der Lothar-Versuchsfläche Brislach.

Abb. 11:
Regenwurmpopulation,
getrennt nach Ökogrur-
pen, in der Lothar-
Versuchsfläche Frienis-
berg.



Fazit

Generell ist in den Sturmflächen eine geringe Regenwurmpopulation festzustellen. Vorläufige Ergebnisse zeigen aber, dass durch Schnitzelabdeckung die Regenwurmpopulation schon nach 2–3 Jahren angehoben werden kann.

Literatur

- BENZLER J. H., FINNERN H., MÜLLER W., ROESCHMANN G., WILL K. H. & WITTMANN O. 1982: *Bodenkundliche Kartieranleitung*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GAERTIG T., SCHACK-KIRCHNER H., HILDEBRAND E. E. 2001: *Steuert Gasdurchlässigkeit im Boden Feinstwurzeldichte und Vitalität bei Eiche?* Allgemeine Forstzeitschrift 56: 1344–1347.
- GLASSTETTER M. 1991: *Die Bodenfauna und ihre Beziehungen zum Nährstoffhaushalt in Geosystemen des Tafel- und Faltenjuras (Nordwestschweiz)*. Physiogeographica 15: 1–224.
- HILDEBRAND E. E. 1983: *Mechanische Holzernte und Bodenstruktur*. Allgemeine Forstzeitschrift 38: 1131–1143.
- MAKESCHIN F. 1994: *Experimentelle Untersuchungen zur Besiedelung anthropogen devastierter, saurer Waldböden mit leistungsfähigen Lumbriciden*. Akademischer Verlag, München, 197 pp.
- MATZNER E. & MURACH D. 1995: *Soil changes induced by air pollutant deposition and their implication for forests in Central Europe*. Water, Air and Soil Pollution 85: 63–76.
- UN/ECE 1992: *Critical Loads for Nitrogen. UN-ECE-Workshop report Lökeberg, Sweden, 6.–10. April 1992*. Grennfelt, P. und Thörnelöf, E. 1992:41. Nord.

3.6 Bewertung der Erfolgsaussichten

Zusammenfassung

Mit einem integrativen Modellierungsansatz werden Voraussagen gemacht, wie lange die Wiederbewaldung auf Windwurfflächen in Abhängigkeit von Standortfaktoren, Behandlungsvariante und Verbiss dauert. Dazu wurden Einzelprojektdaten des Vivian-Rahmenprojektes verwendet. Obwohl diese Einzelprojekte ursprünglich nicht im Hinblick auf ein solches Syntheseprojekt geplant wurden, lassen sich daraus zusammen mit Literaturdaten wichtige Faktoren für die Modellierungsprozesse «Samenverteilung», «Vegetationsentwicklung», «Keimung» und «Wachstum und Mortalität» ableiten. Eine Evaluation verschiedener Modelltypen hat ergeben, dass sich ein Einzelbaummodell – basierend auf einer bekannten Wachstumsgleichung – in Kombination mit einem matrix-basierten Vegetationsmodell dafür am besten eignet. Um daraus ein praktikables Entscheidungshilfeinstrument die Beurteilung von neuen Windwurfflächen abzuleiten, wird das Modell mit den Daten der Windwurffläche Disentis parametrisiert und für die übrigen Flächen des Vivian-Rahmenprojektes getestet.

Einleitung

Während dem aus den Daten der Lothar-Flächen erst wenige Informationen zu den Erfolgsaussichten der Wiederbewaldung von Windwurfflächen gezogen werden können, stehen dafür von dem fast 10 Jahre früheren Sturm Vivian aus verschiedenen Einzelprojekten Daten zur Samenverbreitung, zur Vegetationsentwicklung und zum Aufwuchs der Keimlinge und jungen Bäume zur Verfügung (LÄSSIG et al. 1995, SCHÖNENBERGER et al. 1999, SCHÖNENBERGER 2002, WOHLGEMUTH 1995). Ziel des im Februar 2002 begonnenen Dissertationsprojektes «*Wiederbewaldung auf Windwurfflächen: Prädiktive Modelle der Waldentwicklung*» ist es, Daten dieser Einzelprojekte zu verbinden und daraus ein Modell zur Simulation der Wiederbewaldungsdynamik nach Windwürfen abzuleiten. Mit Hilfe eines solchen Werkzeuges sollen konkretere Vorstellungen abgeleitet werden, wie lange der Prozess der Wiederbewaldung auf verschiedenen Standorten und in Abhängigkeit von Behandlungsvarianten und Verbissintensitäten dauert. Der vorliegende Beitrag kann nach der Hälfte der Projektdauer von drei Jahren noch keine abschliessende Zusammenfassung dieses Werkzeuges geben. Er gibt aber einen Überblick über die wichtigen darin zu berücksichtigenden Faktoren und beschreibt Methodik und Möglichkeiten eines solchen Modellierwerkzeuges. Dabei wird auch auf Datenlücken und zusätzlichen Forschungsbedarf hingewiesen, welche im Hinblick auf bessere Vorhersagen der Wiederbewaldung nötig wären.

3.6.1 Wichtige Faktoren für die Wiederbewaldung und Parametrisierungsgrundlagen

Der Ablauf der Wiederbewaldung kann grob in die Prozesse «Samenverteilung und Ansammlung», «Standorts- und Vegetationsentwicklung», «Wachstum» und «Mortalität/Verbiss» gegliedert. Alle diese Prozesse sind abhängig von verschiedenen Standorts- und Mortalitätsfaktoren, werden aber bis zu einem gewissen Grad auch vom Faktor «Zufall» mitbestimmt. Als erster Schritt wurde untersucht, inwiefern eine Parametrisierung eines Modells mit den vorhandenen Daten möglich ist. Dafür

wurde zunächst mögliche Einflussfaktoren analysiert und mit Literaturwerten verglichen. Aufgrund der Datenlage und deren vordringlicher Bedeutung in Schutzwäldern, beziehen sich die meisten der folgenden Ausführungen auf die Regeneration der Fichte.

Samenverteilung und Ansamung

Mit Hilfe von Samenfangbehältern wurden auf den Vivian-Flächen Daten über die Verteilung der Samen erhoben (LÄSSIG et al. 1995). Diese Informationen kann dafür genutzt werden, die Abnahme der Samenverfügbarkeit in Abhängigkeit des Waldrandes zu modellieren. Zusätzliche Hinweise auf Keimungsraten für Fichte, können in der Literatur gefunden werden: BRANG (1998) gibt für die Keimungsrate in Sedrun (1550 m ü.M) einen mittleren Wert von ~30% auf organischem Material und ~50% auf Mineralerde an. Die Zahl der überlebenden Keimlinge war bei seinen Versuchen insbesondere im ersten Jahr hoch und stark abhängig von den Witterungsbedingungen. Ab dem 2. Jahr flachten die Überlebenskurven der Sämlinge ab (BRANG 1996, HILLGARTER 1971, METTIN 1977, IMBECK und OTT 1987). In einigen Saatversuchen lagen die Keimungs- und Überlebenswahrscheinlichkeiten wesentlich niedriger: IMBECK und OTT (1987) verzeichneten beispielsweise bei starker Vegetationskonkurrenz in Davos Überlebensraten von nur 21% nach 2 Vegetationsperioden. Literaturwerte von Untersuchungen ausserhalb des Alpenraums geben ebenfalls Aufschluss über kleinstandortsabhängige Sämlingsüberlebensraten: In Norwegen fand zum Beispiel HANSSEN (2002) für die Fichte auf Kleinstandorten mit intakter Moosvegetation tiefere Keimungsraten als bei zerstörter Vegetationsdecke. Bezüglich der Makrostandorte zeigt sich insbesondere eine deutliche Abnahme von Keimungs- und Überlebensrate als Funktion der Höhe über Meer (KUOCH 1970). Solche Literaturdaten helfen, standortsspezifischen Keimungs- und Überlebensraten für Fichte für ein Wiederbewaldungsmodell zu parametrisieren. Um standörtlich differenziertere Aussagen für Windwurfflächen machen, sind zusätzliche Sämlingsauszählungen nötig, aus denen kleinstandörtliche Keimungs- und Mortalitätsraten berechnet werden können. Dazu sind verschiedene aktuelle Erhebungen (z.B. auf Lotharflächen) geeignet. Um die zeitliche Veränderung von Standortsbedingungen (z.B. Veränderung der Verjüngungsgunst von Moderholz, Wurzelteller und Wurzelmulden) besser in das Modell einzubeziehen, wären aber auch in Zukunft spezifische Sämlingsauszählungen auf den Vivianflächen wertvoll.

Standorts- und Vegetationsentwicklung

Nach dem Sturm förderte der höhere Lichteinfall und die grössere Wärmeeinstrahlung sowohl auf dem geräumten als auch auf dem belassenen Teil der Vivian-Windwurfflächen die zusätzliche Entwicklung der bereits vorhandenen Vegetation. Auf Pionierstandorten breitete sich häufig eine üppige Schlagflora aus. Die grössten Vegetationsveränderungen gab es dort, wo Vegetationsdecke vor dem Sturmereignis nicht geschlossen war (z.B. Kuppen, nackte Pionierstandorte, ursprünglich beschattete Orte, geräumter Teil). Bis 1993 entwickelte sich eine mehr als 70 prozentig deckende Vegetation, wobei auf den geräumten Flächen vor allem die Himbeere (*Rubus idaeus*) dominierte. Bis 1994 nahm die Staudenhöhe und Bodenbedeckung noch einmal zu, allerdings weniger als im Vorjahr (ANGST 1994, WOHLGEMUTH et al. 1995; WOHLGEMUTH et al. 2002). Für die Waldverjüngung stellt diese Vegetationsdecke eine enorme Konkurrenz dar: Während schnell-

wachsende Pioniergehölze (wie z.B. *Sorbus aucuparia*, *Betula pendula*) über die Staudenschicht hinauswachsen können, hat die langsamwachsende Fichte örtlich und zeitlich stark limitierte Chancen zur Etablierung. In Tab. 1 werden exemplarisch für Disentis und Pfäfers die Anzahl Fichten pro Standort mit der aufgrund der Flächengrösse erwarteten Anzahl an Fichten verglichen (Chi²-Test). In beiden Gebieten wachsen auf Asthaufen und Moderholz signifikant mehr Fichten. Ausserdem zeigt sich, dass auf den belassenen Flächen das Holz am Boden und in der Luft in den ersten zehn Jahren verjüngungsungünstig wirkt. In Pfäfers sind auf Wurzeltellern signifikant mehr Fichten zu finden als erwartet. Hingegen sind in Disentis die Wurzeln der umgefallenen Fichten so flachgründig, dass es auf den Wurzeltellern kaum Erde gibt, was wiederum verjüngungsungünstig wirkt. In Disentis ist ein grosser Teil der Fläche von einem Felsband durchzogen, auf dem vor allem Moos- und *Vaccinium*-Kleinstandorte zu finden sind. Auf diesem Kleinstandort, wie auch auf Erosionsflächen haben sich die Bäume besser verjüngt.

Tabelle 1: Vergleich von beobachteten versus aufgrund der Flächegrösse erwarteten Fichtenzahlen auf verschiedenen Kleinstandorten (Chi²-Test).

Standort	Disentis				Pfäfers			
	beobachtete Anzahl Fichten	erwartete Anzahl Fichten	Chi2	Signifikanz	beobachtete Anzahl Fichten	erwartete Anzahl Fichten	Chi2	Signifikanz
Asthaufen	1	9	5.88	0.05	2	12	7.81	0.01
Wurzelteller	1	5	2.15	n.s.	26	12	15.58	0.01
Wurzelmulde	2	1	0.50	n.s.	3	3	0.00	n.s.
Holz am Boden	0	3	2.19	n.s.	0	8	6.75	0.01
Holz in der Luft	0	13	12.30	0.01	0	10	9.04	0.01
Moderholz alt	5	1	6.74	0.01	8	1	75.52	0.01
Fels	17	8	7.99	0.01	1	6	3.03	n.s.
Blockschutt	21	13	3.73	n.s.	2	4	0.31	n.s.
Vernässt	0	1	0.01	n.s.	0	1	0.45	n.s.
Erosion	17	0	609.52	0.01	22	25	0.30	n.s.
Weg	0	1	0.14	n.s.	0	3	1.60	n.s.
Vegetation	42	50	1.25	n.s.	82	63	5.58	0.05
Summe	106				146			

Wachstum der Fichten

Der Zuwachs der Fichten unterscheidet sich nicht signifikant in Abhängigkeit vom Vegetationstyp (Abb. 1 links (Disentis); ANOVA, $F=1,81$, $p=0,12$). Auf den verschiedenen Kleinstandorten dagegen sind die Unterschiede deutlicher. Ein signifikanter Unterschied besteht insbesondere zwischen dem Standort Blockschutt und Fels (Abb. 1 rechts; ANOVA, $F=3,12$, $p=0,019$). Auf Blockschutt streut der Zuwachs stark, mit einem Mittelwert von 12 cm pro Jahr. Auf Fels und Moderholz ist der Zuwachs eher gering, während er auf Erosionsflächen überdurchschnittlich hoch ist.

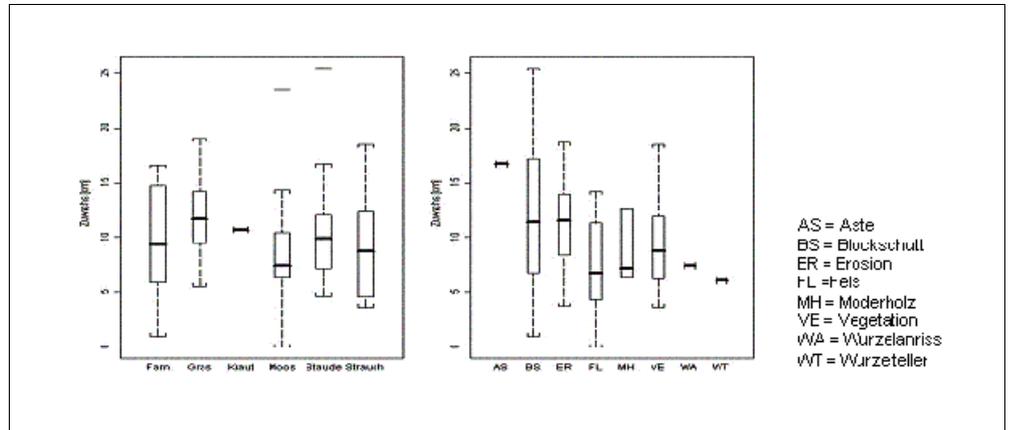


Abb 1: Mittlerer jährlicher Zuwachs (cm) der Fichte auf verschiedenen Standorten in der Windwurf-fläche von Disentis. Links: Zuwachs in Abhängigkeit von verschiedenen Vegetationstypen; Rechts: Zuwachs in Abhängigkeit vom Kleinstandort (Abkürzungen siehe rechts).

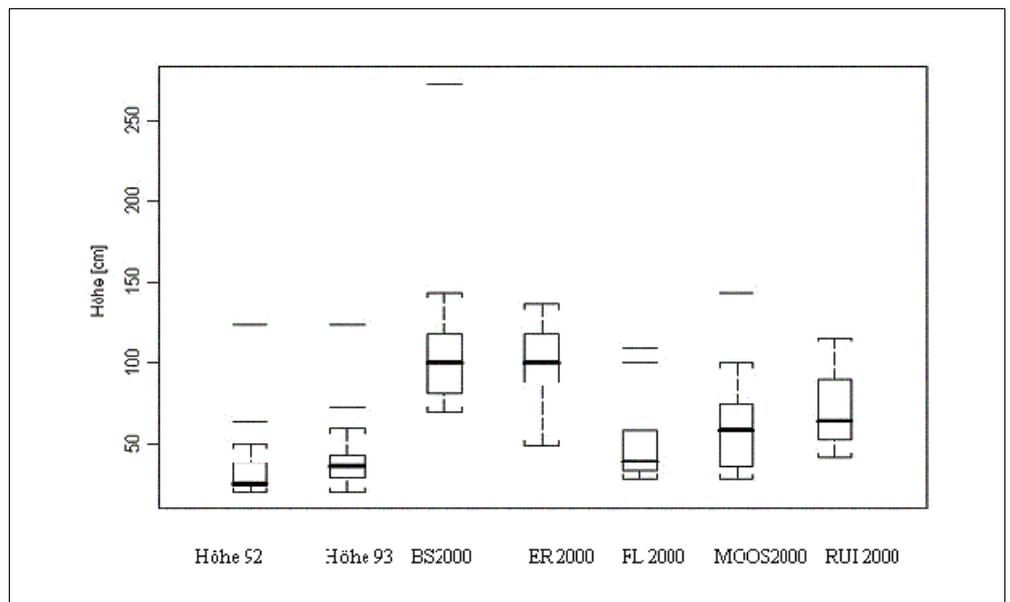


Abb. 2: Dargestellt sind zum einen die Höhen der Fichten 1992 (Höhe 92) und 1993 (Höhe 93). Ausserdem die Höhen der Fichten im Jahr 2000 in Abhängigkeit von verschiedenen Kleinstandorten (BS = Blockschutt, ER = Erosion, FL = Fels, MOOS = Moos, RUI = *Rubus idaeus*).

Der Vergleich der Höhen im Jahr 2000 auf verschiedenen Kleinstandorten mit den Höhen im Jahr 1992 und 1993 (Abb. 2) bestätigt den geringen Zuwachs auf Fels. Dagegen gab es ein starkes Wachstum auf den Standorten Blockschutt und Erosion. Hier sind die Bäume im Mittel schon ca. 1 m hoch. Auf Moos und unter Himbeere liegt die mittlere Höhe bei 60 cm. Vor allem zwischen den Standorten Blockschutt-Fels und Erosion-Fels gibt es einen signifikanten Unterschied (ANOVA, $F=5,05$, $p=0,0018$).

In einem multiplen Regressionsmodell (GLM) wurde der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Anzahl Fichten auf den Plots (50 m²) untersucht (Tab. 2 und 3). Von den grossräumigen Einflussfaktoren «Abstand zum Waldrand», «Höhe ü.N.N.», «Oberflächenstruktur (Mulde, Kuppe)», «Neigung» und «Exposition» hat auf der grössten Windwurffläche (Disentis) der Abstand zum Waldrand den stärksten Einfluss auf die Anzahl Bäume: Je weiter ein Plot vom Waldrand entfernt ist, umso weniger Bäume wachsen dort. Auch der Höhengradient von 1400–1550 m ü.N.N. innerhalb der Windwurffläche Disentis reichte aus, um eine signifikante Abnahme der Anzahl sich etablierter Bäume mit zunehmender Höhe festzustellen. In Pfäfers hat die Beschaffenheit des Geländes einen stärkeren Einfluss. Es wachsen dort mehr Bäume auf Kuppen und auf den weniger steilen stärker westlich exponierten Standorten. Bei den Mikrostandorten hat vor allem das geworfene Sturmholz, das jetzt zum Teil am Boden liegt oder noch über dem Boden hängt, einen negativen Einfluss auf das Nachwachsen der Bäume. Dagegen beeinflusst das Vorkommen der Pionierbaumarten Weide, Vogelbeere, Birke und Bergahorn das Nachwachsen von Fichten positiv. Nur in Pfäfers, wo überdurchschnittlich viel Bergahorn zu finden ist, ist dessen Einfluss auf das Wachstum der Fichte negativ.

Tabelle 2: Ergebnisse der Regression (GLM), um den Einfluss von «Makrostandorten» auf die Häufigkeit von Fichten zu testen. Folgende Variablen wurden in das Modell eingeschlossen: Abstand zum Waldrand, Oberflächenstruktur (Kuppe, Mulde), Höhe ü.N.N., Steigung, Exposition. Die nicht-signifikanten Variablen wurden nach einer stepwise-selection aus dem Modell ausgeschlossen. In Schwanden hatte keine der Variablen einen signifikanten Einfluss.

Gebiet	Variable	Koeffizient	Std. error	t-Wert	p-Wert
Disentis	Abstand zum Waldrand	-0,02	0,0056	3,69	0,000014***
	Höhe	-0,02	0,007	-2,81	0,003***
Pfäfers	Oberflächenstruktur	0,06	0,09	0,62	0,007***
	Exposition	-2,98	0,92	-3,22	0,002***
	Neigung	-0,05	0,02	-3,34	0,001***

Tabelle 3: Ergebnisse der Regression (GLM), um den Einfluss von Mikrostandorten auf die Häufigkeit von Fichten zu testen. Folgende Variablen wurden in das Modell eingeschlossen: Prozentualer Anteil an Ästen, Holz am Boden, Holz in der Luft, Moderholz, Wurzeltellern, Wurzelmulden, Vernässten Stellen, Erosion, Pionierbaumarten, Ahorn, Bodenvegetation und Fels.

Gebiet	Variable	Koeffizient	Std. error	t-Wert	p-Wert
Disentis	Holz in der Luft	-0,05	0,02	-2,82	0,000092***
	Bodenvegetation	-0,02	0,007	-2,49	0,047*
	Pionierbaumarten	0,12	0,03	3,71	0,00058***
Schwanden	Holz auf dem Boden vernässt	-0,19	0,15	-1,27	0,022**
	vernässt	-0,06	0,03	-2,1	0,00044***
	Pionierbaumarten	0,08	0,02	3,35	0,0017***
Pfäfers	Wurzelteller	0,02	0,01	1,85	0,035*
	Holz in der Luft	-0,05	0,01	-3,77	0,000032***
	Fels	-0,08	0,02	-3,2	0,0011***
	Erosion	-0,04	0,009	-4,48	0,00000***
	Ahorn	-0,02	0,01	-2,22	0,016*

Mortalität / Verbiss

Vor allem während der Keimungsphase und im ersten Lebensjahr stirbt ein Gross-
 teil der Fichtenkeimlinge wegen Trockenheit, Wärmemangel, Vegetationskonkur-
 renz, pathogenen Pilzen und anderen Gründen ab (VGL. OTT et al. 1997, BRANG
 1998, IMBECK UND OTT 1987). In der späteren Aufwuchsphase kommt Verbiss
 durch Huftiere als wichtige Ausfallursache dazu (EIBERLE 1989, SENN 2000) und
 muss somit entsprechend in das Modell der Wiederbewaldung auf Windwurfflächen
 einbezogen werden. Wichtig ist dabei die Zeitspanne, bis die Bäume über die ge-
 fährdete Grösse von 1,30m–2m hinausgewachsen sind. Diese Zeitspanne ist stark
 standortsabhängig und dauert im Gebirge unter härteren klimatischen Bedingungen
 und langsamem Wachstum länger (vgl. EIBERLE et al. 1987).

Tabelle 4: Verbissintensität (in %) für Fichte (*Picea abies*) und Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) berech-
 net nach EIBERLE et al. 1987. Die Verbissintensitäten wurden pro Jahr und für jede Behand-
 lungsvariante berechnet.

Jahr	Fichte			Vogelbeere		
	belassen	bepflanzt	geräumt	belassen	bepflanzt	geräumt
Disentis						
1992	0.0	0.0	7.4	0.0	2.8	10.5
1993	0.0	0.0	6.5	28.6	0.0	12.0
1995	0.0	2.3	12.5	0.0	50.8	51.9
1998	0.0	13.6	6.3	10.0	36.4	41.5
2000	0.0	0.6	0.0	9.1	33.8	43.2
Pfäfers						
1992	7.7	0.0	0.0			0.0
1993	7.7	11.9	0.0	0.0	20.0	0.0
1994	0.0	25.4	0.0	66.7	20.0	0.0
1996	0.0	35.3	0.0	42.9	30.3	57.9
1998	0.0	13.7	3.7	40.0	5.3	30.0
2000	7.9	0.0	4.7	18.2	5.3	17.2
Schwanden						
1992	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	12.5
1993	11.1	0.0	0.0	42.9	51.6	9.1
1994	16.7	28.8	0.0	44.4	74.2	81.8
1996	35.3	40.0	100.0	68.8	72.7	84.6
1998	50.0	60.2	50.0	57.9	73.8	83.3
2000	8.1	9.7	38.1	65.2	64.7	76.9

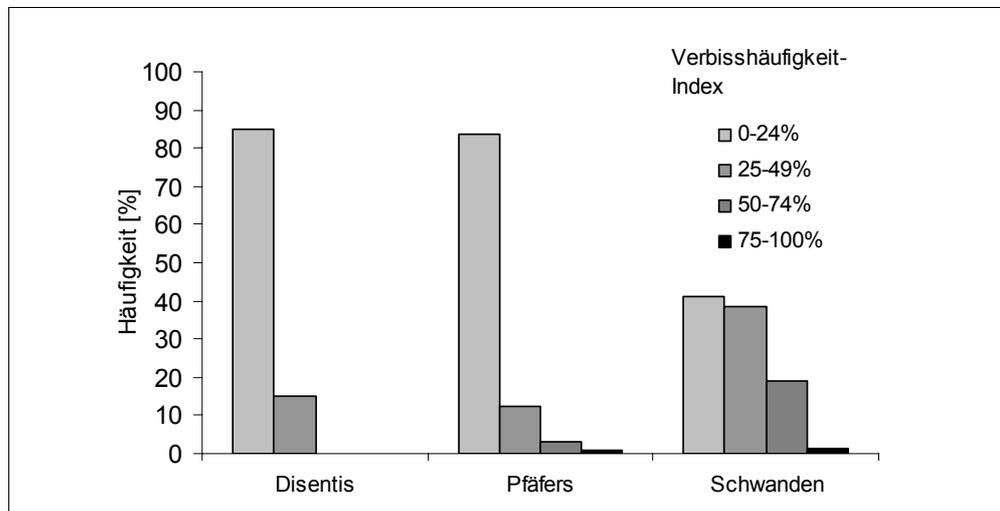


Abb. 3: Verbisshäufigkeits-Index: Es wird angegeben, wie häufig eine Pflanze in den letzten 10 Jahren verbissen wurde (Anzahl an Aufnahmen einer endtriebverbissenen Pflanze/ Anzahl an Aufnahmen einer Pflanze * 100 [in %].) So bedeutet ein Wert von 0–24%, dass eine Pflanze, die 4 mal aufgenommen wurde, kein oder einmal endtriebverbissen wurde.

Auf den für die Parametrisierung der Wiederbewaldungsmodelle zur Verfügung stehenden Windwurfflächen waren bis 3 Jahre nach dem Sturm Verbiss-Intensitäten an Fichte noch relativ gering (vgl. Tab. 4). Auf dem belassenen Teil in Disentis war in den gesamten 12 Jahren nach dem Sturm kaum Verbiss zu verzeichnen. Auf den Flächen Pfäfers und Schwanden nahmen die Verbissintensitäten im Laufe der Zeit zu. Dabei war vor allem der bepflanzte und die geräumte Behandlungsvariante betroffen. Viele der Fichten waren im Laufe der Beobachtungsperiode mehr als ein Mal Endtrieb verbissen (vgl. Abb. 3; Verbisshäufigkeits-Index >25%). In Pfäfers und Disentis dagegen ist die Häufigkeit von wiederholtem Endtriebverbiss gering (Abb. 3).

Ergebnisse verschiedener Monitoringprojekte auf Windwurfflächen, wie sie in den obigen Abschnitten exemplarisch dargestellt wurden, sind wichtig für die Modellparametrisierung zur Wiederbewaldung. Die statistischen Auswertungen dieser Daten haben aber auch deutlich aufgezeigt, dass Monitoringprojekte auf Windwurfflächen bisher nicht im Hinblick auf ein solches Syntheseprojekt geplant wurden. Trotz umfangreichem Monitoring bestehen verschiedene Datenlücken, welche die Möglichkeiten zur Modellparametrisierung sowie die Auswahl von potentiellen Modellieransätzen einschränken. Um z.B. die Ansamung auf Windwurfflächen simulieren zu können, muss auf Literaturdaten sowie auf Daten von laufenden Erhebungen (Lotharflächen, Rohwaldprojekt) zurückgegriffen werden, da die Vivian-Daten nicht genügend Informationen über Keimungs- und Mortalitätsraten auf verschiedenen Standorten geben. Auch für die Simulation des Aufwachsens der Bäume müssen zum Teil Daten aus anderen Projekten verwendet werden, da aus den Monitoringdaten häufig nicht klar ist, welche Bäume schon als Vorverjüngung vor dem Sturm vorhanden waren.

**Modellansatz und
Abschätzung des Verlaufs
der Wiederbewaldung**

Als wichtigster Faktor, der das Aufwachsen von Fichten auf Windwurfflächen bestimmt, hat sich das Mosaik von verschiedenen Vegetations- und die Kleinstandortstypen erwiesen. Deshalb wird die Vegetationsentwicklung auf den Flächen nach einfachen Regeln von Nachbarschaftsbeziehungen auf einer Matrix von solchen Vegetations- und Kleinstandortstypen simuliert. Damit kann die Ausbreitung von verschiedenen Vegetationstypen (z.B. Himbeere und Hochstauden) räumlich explizit simuliert werden. In jeder Zelle wird die Wachstumsfunktion jedes Baumes in Abhängigkeit von Kleinstandortstyp, Verbiss, Mortalität und Zufall modifiziert (Abb. 4). Dieser Modellansatz wurde im Hinblick auf die Modellierung von Windwurfflächen als am erfolgsversprechenden angesehen und im folgenden weiterverfolgt, da I) damit die wichtigsten Prozesse der Wiederbewaldung auf Windwurfflächen erfasst werden können, II) eine Kalibrierung mit Hilfe der Datengrundlage der Vivian-Windwurffläche möglich ist und III) die Kombination mit einem geographischen Informationssystem (GIS) die räumlich explizite Modellierung von Windwurfflächen ermöglicht.

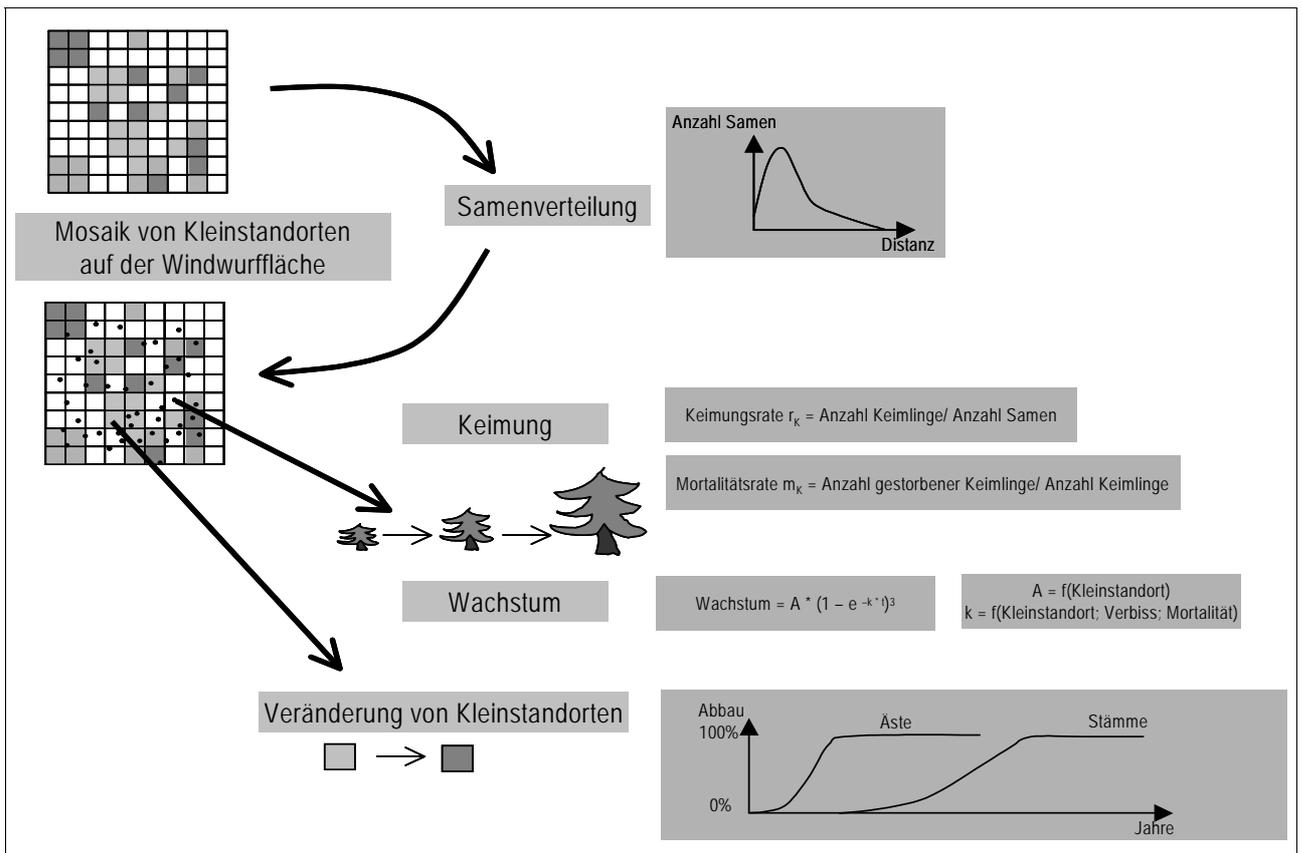


Abb. 4: Schema zur Modellierung der Wiederbewaldung auf Windwurfflächen.

Eine schematische Darstellung dieses individuenbasierten Baumwachstums-Modells ist in Abb. 4 dargestellt: Für jede Zelle wird zuerst der Sameninput in Abhängigkeit vom Abstand zum Waldrand berechnet. Anschließend wird jeder Zelle ein

neuer Kleinstandortstyp zugeordnet, je nachdem, welchen Kleinstandortstyp die Zelle gerade hat und welchen Kleinstandortstypen die Nachbarzellen besitzen. In Abhängigkeit von dieser Kleinstandortstypen keimen die Samen in den Zellen. Das Wachstum der Bäume wird schliesslich auf der Grundlage der Wachstumsgleichung von BERTALANFFY (1957) modelliert. Diese Gleichung wurde bereits mehrmals für die Modellierung von Baumwachstum getestet und hat sich dafür als geeignet erwiesen (ZEIDE 1993, KAHN 1995). Die Kurve wurde an die Daten für Fichte, für die das Alter bekannt ist, angepasst. Da von den Vivian-Windwurfllächen nur Daten für das Wachstum in den ersten zehn Jahren vorhanden waren, wurde die Kurve mit Wachstumstafeln für Fichte im Gebirge verglichen (GUTTENBERG 1915) und für verschiedene Endhöhen von 18–30 m angepasst (Abb. 5; Kurvenanpassung 1–5). In den ersten 20 Jahren des Wachstums erkennt man im Kurvenverlauf keine deutlichen Unterschiede. Der Anstieg der Kurve ist für alle Endhöhen relativ ähnlich.

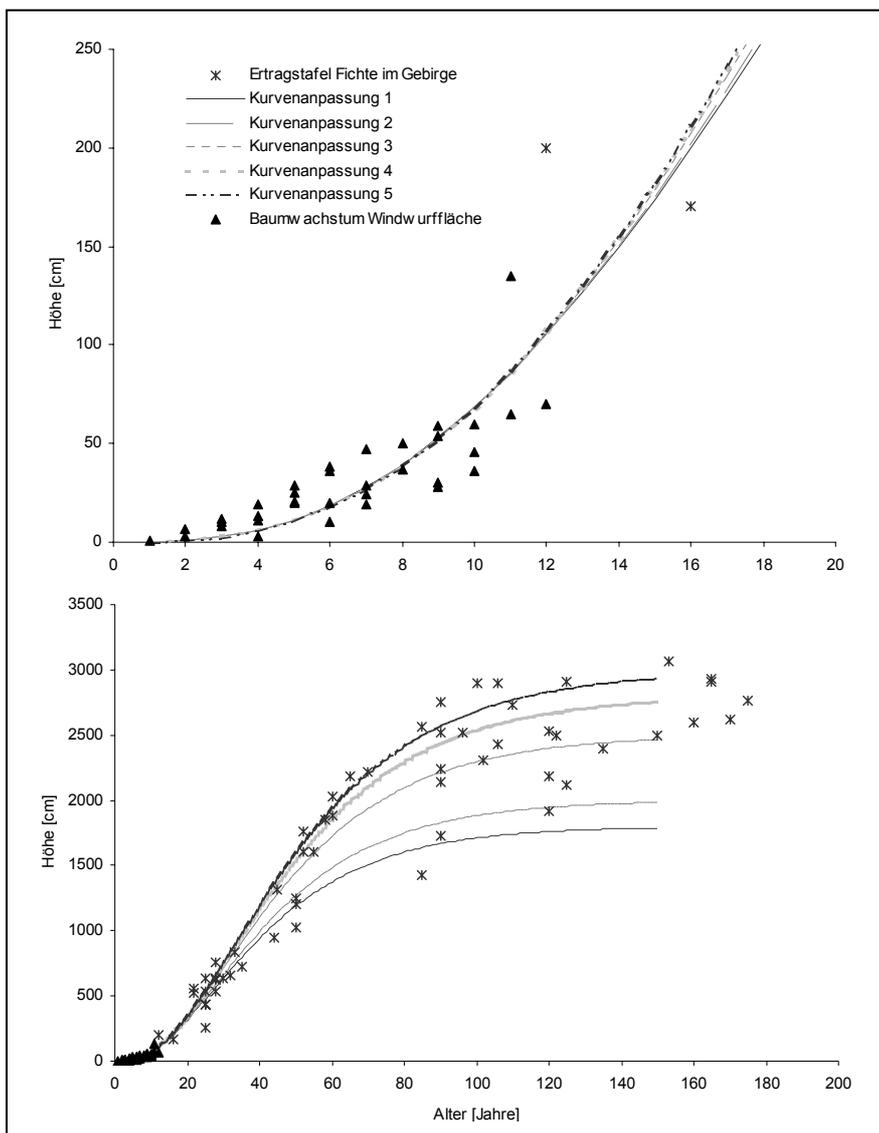


Abb. 5:
Gefittete Wachstumskurve nach v. Bertalanffy.
Oben: Kurvenverlauf für die ersten 20 Jahre.
Unten: Kurvenverlauf für 150 Jahre.
Die Kurve wurde für verschiedene Endhöhen angepasst (Kurvenanpassung 1 = 18m Endhöhe, Kurvenanpassung 2 = 20m Endhöhe, Kurvenanpassung 3 = 25m Endhöhe, Kurvenanpassung 4 = 28m Endhöhe, Kurvenanpassung 5 = 30m Endhöhe).

Vergleicht man die gefitteten Werte mit den Werten der Windwurffläche Disentis, so ergibt sich eine gute Korrelation ($R^2=0,7$). Modelliert man das Wachstum bis 150 Jahre, so zeigt sich auch mit den von (GUTTENBERG 1915) aufgenommenen Daten eine gute Übereinstimmung. In dieser Wachstumskurve können die einzelnen Parameter, wie z.B. die Endhöhe (Asymptote) oder der Anstieg der Kurve entsprechend herabgesetzt oder erhöht werden. Die Änderung in der Endhöhe bzw. der Anstieg der Kurve hängen zu einem grossen Teil von den Standortseigenschaften einer Windwurffläche (Makrostandort) und dem Kleinstandort jedes Baumes innerhalb dieser Windwurffläche (Mikrostandort) ab. Zu den zusätzlichen Einflussfaktoren, welche diese Parameter beeinflussen gehören aber auch die Faktoren «Verbiss», «Behandlungsvariante» und «Zufall».

3.6.2 Ausblick

Nach ersten vielversprechenden Parametrisierungsschritten des beschriebenen Vegetations-/Baumwachstumsmodells, sind als nächste Schritte umfangreiche Parametrisierungsarbeiten mit den Daten der Windwurffläche Disentis und weitere Literaturrecherchen vorgesehen. Auch wenn das Modell für die Flächen Schwanden und Pfäfers getestet werden kann, genügt das Spektrum der damit abgedeckten Makro- und Mikrostandorten noch nicht, um daraus bereits ein Modellierungs- und Entscheidungshilfetoole für zukünftige Windwurfflächen ableiten zu können. Ein solches anwendbares Entscheidungshilfetoole würde darin bestehen, dass nach Eingabe der relevanten Standorts- und anderen Faktoren von neu entstandenen Windwurfflächen direkt die wichtigen Parameter für das Modell der entsprechenden Fläche abgeleitet werden können. Dadurch wären insbesondere auch Abschätzungen möglich, wann an einem bestimmten Standort und bei verschiedenen Behandlungsvarianten eine ausreichende Schutzwirkung des neuen Bestandes zu erwarten wäre. Für ein solches anwendbares Entscheidungshilfetoole sind noch grosse Anstrengungen erforderlich. Insbesondere müssen weitere Parametrisierungsarbeiten mit verschiedensten Beständen, welche ein breites Spektrum an Standorts- und Umweltbedingungen abdecken, durchgeführt werden. Während dem für den Prozess «Wachstum» dafür auch nicht-windgeworfene, aber frei aufgewachsene Waldbestände und Aufforstungen verwendet werden können, wären für die bessere Parametrisierung des Ansamlungsprozesses zusätzliche Daten von Keimlingsauszählungen an verschiedenen Kleinstandorten und auf verschiedensten Windwurfflächen (v.a. Daten von Verjüngungsaufnahmen auf Lotharflächen sowie aus dem Rohwaldprojekt, Kt. Obwalden) wertvoll.

Literatur

- ANGST C. 1994: *Grunddokumentation zu dem Projekt «Entwicklung von Sturm-schadenflächen mit und ohne Räumungs- und Wiederbewaldungsmassnahmen»*. Birmensdorf, Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL).
- BERTALANFFY L. V. 1957: *Quantitative laws in metabolism and growth*. Quart. Rev. Biol. 32: 217–231.
- BRANG P. 1996: *Experimentelle Untersuchungen zur Ansamlungsökologie der Fichte im zwischenalpinen Gebirgswald*. Dissertation ETH Zürich. 375 pp.
- BRANG P. 1998: *Early seedling establishment of Picea abies in small forest gaps in Swiss Alps*. Can. J. For. Res. 28: 626–639.

- EIBERLE K. 1989: *Über den Einfluss des Wildverbisses auf die Mortalität von jungen Waldbäumen in der oberen Montanstufe*. Schweiz. Z. Forstwesen 140(12): 1031–1042.
- EIBERLE K., NIGG H. 1987: *Grundlagen zur Beurteilung des Wildverbisses im Gebirgswald*. Schweiz. Z. Forstwesen 138 (9): 747–785.
- GUTTENBERG A. 1915: *Wachstum und Ertrag der Fichte im Hochgebirge*. Wien, Leipzig, Franz Deuticke.
- HANSSEN K. H. 2002: *Effects of seedbed substrates on regeneration of Picea abies from seeds*. Scand. J. For. Res. 17: 511–521.
- HILLGARTER F. W. 1971: *Waldbauliche und ertragskundliche Untersuchungen im subalpinen Fichtenurwald Scatlé / Brigels*. Diss., Inst. für Waldbau, ETH Zürich. 80 S.
- IMBECK H., OTT E. 1987: *Verjüngungsökologische Untersuchungen in einem hochstaudenreichen subalpinen Fichtenwald, mit spezieller Berücksichtigung der Schneeablagerung und der Lawinenbildung*. Mitt. Eidg. Inst. Schnee u. Lawinenforschung SLF Davos. 202 pp.
- KAHN M. 1995: *Quasikausale Modellierung des Standort-Leistung-Bezuges als Voraussetzung zum Aufbau flexibler Mischbestandsmodelle*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 114: 175–187.
- KUOCH R. 1970: *Die Verjüngung im Bereich der oberen Waldgrenze der Alpen*. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen 46 (4): 159–328.
- KUPFERSCHMID A. D. 2002: *Tree regeneration in a Norway spruce snag stand after tree die-back caused by Ips typograohus*. For. Snow Landsc. Res. 77(1/2): 149–160.
- KUPFERSCHMID A. D., BRANG P., SCHÖNENBERGER W., BUGMANN H. 2003: *Decay of Picea abies snag stands on steep mountain slopes*. The Forestry Chronicle 79: 1–5.
- LÄSSIG R., EGLI S., ODERMATT O., SCHÖNENBERGER W., STÖCKLI B., WOHLGEMUTH T. 1995: *Beginn der Wiederbewaldung auf Windwurfllächen*. Schweiz. Z. Forstwes. 146(11): 893–911.
- METTIN C. 1977: *Zustand und Dynamik der Verjüngung der Hochlagenwälder im Werdenfeller Land*. Diss., Fak., Univ. München. 161 pp.
- OTT E., FREHNER M., FREY H.-U., LÜSCHER P. 1997: *Gebirgsnadelwälder*. Bern, Stuttgart, Wien, Haupt-Verlag.
- SCHÖNENBERGER W. 2002: *Windthrow research after the 1990 storm Vivian in Switzerland: objectives, study sites, and projects*. For. Snow Landsc. Res. 77(1/2): 9–16.
- SCHÖNENBERGER W., KASPER H., LÄSSIG R. 1992: *Forschungsprojekte zur Wiederbewaldung von Sturmschadenflächen*. Schweiz. Z. Forstwes. 143(10): 829–847.
- SCHÖNENBERGER W., WASEM U. 1999: *Der Beginn der Wiederbewaldung von Sturmwurfflächen im Gebirge*. Ein Zwischenbericht. Forstliche Forschungsberichte München 176.
- SENN J. 2000: *Huftiere und Verjüngung im Gebirgswald: eine Geschichte mit vielen Variablen und noch mehr Interaktionen*. Schweiz. Z. Forstwesen 151(4): 99–106.
- WOHLGEMUTH T., KUHN N., LÜSCHER P., KULL P., WÜTHRICH H. 1995: *Vegetations- und Bodendynamik auf rezenten Windwurfllächen in den Schweizer Nordalpen*. Schweiz. Z. Forstwes. 146(11): 873–891
- WOHLGEMUTH T., KULL P., WÜTHRICH H. 2002: *Disturbance of microsites and early tree regeneration after catastrophic windthrow Vivian 1990 in Swiss mountain forests*. Forest Snow and Landscape Research 77: 17–49
- ZEIDE B. 1993: *Analysis of growth equations*. Forest Science 39 (3): 594–516.

4 Folgerungen für vorsorgliche Risikominderung und erfolgreiche Wiederbewaldung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Eigenschaften eines Baumbestandes bzw. seines Standortes und dem Schadenausmass aufgezeigt. Damit werden gewissermassen die internen Risikofaktoren eines Waldes identifiziert. Diese werden durch die Tätigkeit des Menschen im Wald direkt beeinflusst. Daneben existieren auch Einflussfaktoren, welche durch die forstliche Tätigkeit nicht direkt beeinflusst werden können. Bevor im Kapitel 4.2 auf die Möglichkeiten zur Risikominderung eingegangen wird, soll nachfolgend die Entwicklung von externen Risikofaktoren betrachtet werden.

Richard Volz

4.1 Entwicklung von externen Risikofaktoren

Als externe Risikofaktoren für den Wald sind vor allem klimatische Ereignisse sowie Umwelteinflüsse von Bedeutung. Die Klimarisiken dürften mit der anthropogenen Klimaerwärmung zunehmen, vor allem wenn damit vermehrt Extremereignisse wie Stürme und Dürre auftreten. Die Schadstoffbelastung wirkt sich eher schleichend aus. Für die zukünftige Belastung spielen die Massnahmen zur Luftreinhaltung auf nationaler und internationaler Ebene eine Rolle.

Risikofaktoren sind all jene Einflüsse, welche einen Waldbestand entweder direkt schädigen oder seine Widerstandsfähigkeit gegenüber möglichen Schadenursachen schwächen. Im Hinblick auf Sturmschäden sind selbstverständlich Sturmwinde die Hauptursache. Dabei sind es vor allem Stürme im Spätherbst und Winter, welche von Bedeutung sind, weil sie eine flächenhafte Ausdehnung erreichen. Starkwinde im Sommer treten vor allem im Zusammenhang mit Gewittern auf. Ihre Wirkung bleibt lokal oder regional beschränkt. Neben dem Wind gibt es aber weitere Einflüsse, welche die Standfestigkeit der Bäume und die Folgeschäden des Sturms beeinflussen. Sie wirken sich auf das Schadenausmass aus und sind bei einer Risikobetrachtung mit zu berücksichtigen. Als solche Faktoren fallen insbesondere in Betracht:

- Bodenfeuchtigkeit in Abhängigkeit von den Niederschlägen (durchnässter Boden vermindert die Haftung der Wurzeln im Boden)
- Hitze- und Dürreperioden (schwächen den überlebenden Bestand und fördern die Vermehrung von Schadinsekten, insbesondere des Borkenkäfers)
- Stickstoff- und andere Einträge, welche die Bodenversauerung fördern (Nährstoffe des Bodens werden ausgewaschen und die Wurzeln konzentrieren sich auf die oberflächennahen humusreichen Schichten)
- Stickstoff- und Ozonbelastung (verkleinern das Verhältnis der Wurzeln zum Spross des Baumes)

4.1.1 Entwicklung von risikobehafteten Klimaereignissen

Klimaänderung

Der dritte Wissensstandsbericht des IPCC zur Klimaänderung (PROCLIM 2002) gibt die folgende Übersicht über zu erwartende Veränderungen in den mittleren Breiten.

Tabelle 1: Wahrscheinlichkeit von Klimaveränderungen und extremen Klimaereignissen in den mittleren Breiten und ihre mögliche Bedeutung für das Ökosystem Wald (aus PROCLIM 2002, verändert).

Projizierte Änderungen von Klimaphänomenen während des 21. Jahrhunderts und ihre Wahrscheinlichkeit ¹⁾	Mögliche Auswirkungen der Veränderungen auf den Wald
Höhere Maximaltemperaturen; mehr heisse Tage und Hitzewellen über fast allen Landmassen (<i>sehr wahrscheinlich</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Vermehrter Hitze- bzw. Trockenstress • Entwicklung und Vorkommen von Baumschädlingen • Vermehrter Druck auf Waldbestände, sich an das wärmere Klima anzupassen
Höhere (steigende) Minimaltemperaturen; weniger kalte Tage, Frosttage und Kältewellen über fast allen Landmassen (<i>sehr wahrscheinlich</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung von Baumschädlingen • Vermehrte Konkurrenz durch frostempfindliche Arten
Intensivere Niederschlagsereignisse (<i>sehr wahrscheinlich</i> in vielen Gebieten)	<ul style="list-style-type: none"> • Zunehmendes Schadenrisiko durch Überschwemmungen, Erdbeben, Lawinen und Murgänge • Zunehmende Bodenerosion
Zunehmende Sommertrockenheit über den meisten innerkontinentalen Flächen, verbunden mit dem Risiko von Dürren (<i>wahrscheinlich</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Vermehrtes Auftreten von Trockenstress • Schwächung der Resistenz von Bäumen für biotische Schäden • Beschleunigte Entwicklung von Baumschädlingen
Zunehmende Intensität von Stürmen in mittleren Breiten (<i>wenig Übereinstimmung zwischen bestehenden Modellen</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhtes Risiko von Sturmschäden im Wald

¹⁾ sehr wahrscheinlich: 90–99 prozentige Sicherheit, wahrscheinlich: 66–90 prozentige Sicherheit.

Die aktuellen Verhältnisse in der Schweiz, ihre Veränderungen in der Vergangenheit und der zu erwartende Trend in der Zukunft, wurden vom OcCC in einem Bericht aufgearbeitet (OcCC 2003). Das Problem bei der Beurteilung von Extremereignissen wie dem Sturm Lothar liegt darin, dass sie sehr selten sind. Es ist deshalb nicht möglich, mit statistischen Mitteln einen Trend nachzuweisen. Auf die Vergangenheit bezogen lassen sich die folgenden Tendenzen feststellen:

4.1.2 Sturmtätigkeit

Zyklonaktivität

Vom 16. bis ins 19. Jahrhundert trat im Mittelland je ein Jahrhundertsturm auf, welcher schwere Schäden an Wäldern, Gebäuden und Infrastrukturen anrichtete. Im 20. Jahrhundert wurden drei solche Stürme (1967, 1990, 1999) registriert. Die Häufigkeit der starken Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik hat zugenommen. Gleichzeitig haben sich ihre Zugbahnen gegen Norden verschoben. Viele Studien mit Klimamodellen sagen eine weitere Zunahme der Zyklonenaktivität über dem östlichen Nordatlantik voraus. Trotz dieser Fakten ist es der Wissenschaft nicht möglich, spezifische Aussagen über das zukünftige Auftreten von Stürmen zu machen.

4.1.3 Wärme und Trockenheit

Trockenperioden

In der Schweiz belegen die Daten des 20. Jahrhunderts eine Erhöhung der Temperaturen sowohl bei den Mittelwerten wie bei den Extremwerten. Es wird erwartet, dass dieser Trend weiter geht und höhere Temperaturextrema auftreten werden. Im 20. Jahrhundert waren sommerliche Trockenperioden relativ selten. In den letzten 500 Jahren gab es fünf extreme Dürrejahre: 1540, 1603, 1669, 1947 und 2003. Dürresommer traten vor 1730 häufiger auf, nämlich alle 12–15 Jahre, seither nur noch etwa alle 50 Jahre. Im 20. Jahrhundert fallen die trockenen Sommer inklusive das Extrem 1947 vor allem auf das Jahrzehnt 1946–1955. An direkten Auswirkungen auf den Wald führten sie vor allem zu vorübergehenden Wachstumsreduktionen (ZINGG et al. 2003). Wichtiger aber ist, dass durch die Erwärmung die Entwicklung des Borkenkäfers und anderer Schadinsekten gefördert wird (Phytoprotektions- und Meldedienst 2003). Der Sommer 2003 hat alle bisherigen Wärmerekorde seit 500 Jahren übertroffen (LUTERBACHER et al. 2004). Gemäss den Modellsimulationen von SCHÄR et al. (2003) wird sich das Klima nicht nur erwärmen. Auch die Variabilität von Jahr zu Jahr wird sich vergrössern. Gegen Ende des Jahrhunderts wird bei der aktuellen Entwicklung erwartet, dass jedes zweite Jahr mit einem so warmen Sommer wie 2003 aufwartet oder diesen sogar übertrifft.

Borkenkäfer

4.1.4 Wasserhaushalt

Niederschläge

Im 20. Jahrhundert nahmen die mittleren winterlichen Niederschlagsmengen um 20–30% zu. Ebenfalls nahm die Häufigkeit von Tagen mit intensiven Niederschlägen an den meisten Messstationen der Schweiz zu. Es wird erwartet, dass die durch die Erwärmung verursachte Intensivierung des atmosphärischen Wasserkreislaufes eine weitere Zunahme der mittleren Niederschlagsintensität zur Folge hat und dass dies vor allem über häufigere Starkniederschläge geschieht. Eine Modellstudie kommt zum Schluss, dass extrem niederschlagsreiche Winter in Europa drei bis fünf mal häufiger auftreten werden. Diese Entwicklung hat zur Folge, dass die Böden mit noch grösserer Wahrscheinlichkeit durchnässt sind, wenn ein Sturm auftritt.

Im Hinblick auf das Risiko für Sturmschäden und im Hinblick auf die Probleme bei deren Bewältigung kann man folgende Schlüsse ziehen:

- Über die Häufigkeit zukünftiger Sturmereignisse können keine gesicherten Aussagen gemacht werden.
- Falls Sturmschäden auftreten, ist die Wahrscheinlichkeit von günstigen Bedingungen für die Borkenkäfervermehrung erhöht.
- Die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein angreifender Wintersturm den Wald auf durchnässten Böden antrifft. Dies dürfte die Standfestigkeit der Bäume beeinträchtigen. Weil mehr Niederschläge fallen und der Boden im Winter nur langsam abtrocknet, werden die für einen Maschineneinsatz geeigneten Zeiten eingeschränkt.
- Diese Einflüsse lassen erwarten, dass im Falle eines Sturmereignisses das Ausmass der direkten und der Folgeschäden tendenziell erhöht wird.

4.1.5 Entwicklung der Schadstoffeinflüsse auf den Wald

kritische Belastung

Kartierungen in den neunziger Jahren ergaben, dass die kritischen Belastungswerte für den Schweizer Wald über grosse Flächen überschritten sind. Die kritische Belastung für Versauerung war im Durchschnitt der Jahre 1986–1990 auf 63% der Waldfläche überschritten (RIHM 1994). Bezüglich Stickstoffeintrag wurde der kritische Wert in den Jahren 1993–1995 auf 73–95% der Waldfläche überschritten (RIHM 1996). Im weiteren wird die kritische Konzentration für Ozon praktisch auf der ganzen Waldfläche überschritten (ACHERMANN and RIHM 1997). Für die Versauerung wurde auch die Entwicklung modelliert (KURZ et al. 1998). Diese zeigt, dass die Belastung seit den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts stark zugenommen hat. Dank den Massnahmen, die in den achtziger Jahren ergriffen wurden, wurde der Trend gebrochen. Trotz einer angenommenen weiteren Reduktion zeichnet sich aber noch keine Erholung der Waldböden ab.

Tabelle 2: Anteil der Waldfläche, wo gemäss einer dynamischen Modellierung im Boden Grenzwerte verletzt sind (KURZ et al. 1998).

Grenzwert	1950	1980	1996	2010
pH <4	5,5%	56,3%	55,3%	48,9%
BC/Al <1 ¹⁾	9,2%	37,0%	43,6%	43,4%

¹⁾ Verhältnis von basischen Kationen (Ca, Mg, K) zu Aluminium in der Bodenlösung. Ein Verhältnis <1 gilt als beeinträchtigend für die Wurzeln.

Schadstoffeinträge

Die Ergebnisse der Projekte zeigen, dass sowohl die Versauerung wie auch der Stickstoff eine beeinflussende Grösse beim Schadenausmass oder bei der Schadenart sind. Dieser Tatbestand macht deutlich, dass Stickstoff- sowie versauernd wirkende Stoffeinträge in den Wald auf einen sensiblen Bereich einwirken und diesen weiter in einer ungünstigen Richtung verändern. Es ist aber methodisch ausser-

ordentlich schwierig wenn nicht sogar unmöglich, die gesamte Wirkungskette zu analysieren und den Anteil der verschiedenen Wirkungsfaktoren zu quantifizieren. Verschiedene Untersuchungen haben Wirkungszusammenhänge gezeigt. JENTSCHKE et al. (2001) postulieren einen Zusammenhang zwischen den Stoffeinträgen aus der Luft in den Wald und der Versauerung der Böden in Nord- und Zentraleuropa. Sie zeigten, dass in versauerten Böden die Fichtenwurzeln stärker auf die oberflächennahe Humusschicht konzentriert und in den tieferen Bodenschichten reduziert sind. Es ist davon auszugehen, dass ein weniger gut ausgebildetes Tiefenwerk der Wurzeln auch die Sturmfestigkeit reduziert. Auf 62 vom Sturm betroffenen kantonalen Dauerbeobachtungsflächen wurden auf den Flächen mit einer Basensättigung <40% signifikant mehr Fichten und Buchen geworfen als auf den Flächen, die weniger sauer sind und eine höhere Basensättigung aufweisen (BRAUN et al. 2003). Arbeiten in diesem Programm zeigen eine Abhängigkeit vom pH, konnten aber keinen Einfluss des Säuregrades auf die Wurzelballen feststellen. FLÜCKIGER und BRAUN (1998) zeigen in ihren Versuchen, dass der Boden durch den Stickstoffeintrag versauert und das Sprosswachstum bei den jungen Bäumen des Versuchs im Verhältnis zu den Wurzeln fördert. Eine ähnliche Wirkung hat auch Ozon, weil es die Versorgung der Wurzeln mit Assimilaten einschränkt (LUX et al. 1997). Auf grosse Bäume übertragen bedeutet dies, dass ein grösserer Spross mit verhältnismässig kleineren Wurzeln verankert ist. Untersuchungen in diesem Programm ergaben, dass die durch Stickstoff verursachte Wachstumsstimulation vermehrt zu Stammbrüchen führt. Andererseits war das Spross/Wurzelverhältnis auf Flächen mit höherer Basensättigung tendenziell grösser.

**lufthygienische
Massnahmen**

Der Bericht des Bundesrates von 1999 zu den lufthygienischen Massnahmen zeigt, dass immer noch ein beachtlicher Reduktionsbedarf bei der Emission von relevanten Luftschadstoffen vorhanden ist (Tab. 3). Die Reduktionen werden im Rahmen der neusten Protokolle zum Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung angestrebt. Auf Grund der Massnahmen ist aber keine rasche Verbesserung der Risikofaktoren Versauerung und Stickstoffeintrag zu erwarten. Auf empfindlichen Standorten, dürfte sich die Situation weiter verschlechtern.

Tabelle 3: Notwendige Emissionsreduktionen gegenüber 1995 für verschiedene Schadstoffe zur Erreichung der Schutzziele (BERICHT DES BUNDESRATES 1999, verändert).

Schadstoff	Notwendige Emissionsreduktion	Schutzziel: Vermeidung von
SO ₂	ca. 25%	Versauerung
NO _x	ca. 65%	Versauerung, Eutrophierung, Ozonbelastung
NH ₃	40–50%	Eutrophierung, Versauerung
VOC (flüchtige organische Verbindungen)	ca. 60%	Ozonbelastung

Literatur

- ACHERMANN B., RIHM B. 1997: *Switzerland*. In: Calculation and Mapping of Critical Thresholds in Europe. Status Report 1997. Eds. M. Posch, J.-P. Hettelingh, P.A.M. de Smet and R.J. Downing, Bilthoven; S. 132–139
- BERICHT DES BUNDESRATES 1999: *Bericht über die lufthygienischen Massnahmen des Bundes und der Kantone*. S. 7735–7758
- BRAUN S., SCHINDLER C., VOLZ R., FLÜCKIGER W. 2003: *Forest damages by the storm ‚Lothar‘ in permanent observation plots in Switzerland: The significance of soil acidification and nitrogen deposition*. Water, Air and Soil Pollution, 142: 327–340
- FLÜCKIGER W., BRAUN S. 1998: *Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leaf nutrient status, parasite attacks and soilacidification*. Environmental Pollution, 102: 69–76
- JENTSCHKE G., DREXHAGE M., FRITZ H.-W., FRITZ E., SCHELLA B., LEE D.-H., GRUBER F., HEIMANN J., KUHR M., SCHMIDT J., SCHMIDT S., ZIMMERMANN R., GODBOLD D.L. 2001: *Does soil acidity reduce subsoil rooting in Norway spruce (Picea abies)?* Plant and Soil 237: 91–108
- KURZ D., ALVETEG M., SVERDRUP H. 1998: *Acidification of Swiss Forest Soils*. Environmental Documentation No. 89, Swiss Agency for Environment, Forests and Landscape, Bern; 115 S.
- LUTERBACHER J., DIETRICH D., XOPLAKI E., GROSJEAN M., WANNER H.: *European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends and Extremes Since 1500*. Science 303: 1499–503
- LUX D., LEONARDI S., MÜLLER J., WIEMKEN A., FLÜCKIGER W. 1997: *Effects of ambient ozone concentrations on contents of non-structural carbohydrates in young Picea abies and Fagus sylvatica*. New Phytol. 137: 399–409
- OCC (Hrsg.) 2003: *Extremereignisse und Klimaänderung*. Bern; 88 S.
- PHYTOSANITÄRER BEOBACHTUNGS- UND MELDEDIENST 2003: *Die Trockenheit wird Spuren hinterlassen*. Wald und Holz 9/03: 10–11
- PROCLIM (Hrsg.) 2002: *Klimaänderung 2001: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger*. Dritter Wissensstandbericht des IPCC, Bern; 119 S.
- RIHM B. 1994: *Critical Loads of Acidity for Forest Soils and Alpine Lakes*. Environmental Series No. 234, Federal Office of Environment, Forests and Landscape, Bern; 68 S. + 11 Karten
- RIHM B. 1996: *Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances*. Environmental Series No. 275, Federal Office of Environment, Forests and Landscape, Bern; 74 S. + 8 Karten
- SCHÄR C., VIDALE P.L., LÜTHI D., FREI C., HÄBERLI C., LINIGER M.A., APPENZELLER C. 2004: *The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves*. Nature 427: 332–336
- ZINGG A., BRANG P. 2003: *Sterben Buchen wegen der Trockenheit?* Wald und Holz 9/03: 44–46

4.2 Empfehlungen

Die Forschungsarbeiten im Lothar Grundlagenprogramm, Teilprogramm 6, haben einige wichtige prädisponierende und auslösende Risikofaktoren bezeichnet, die für Art und Ausmass von Sturmschäden von Bedeutung sind. Ebenso konnten Faktoren ermittelt werden, die sich auf den Start der Wiederbewaldung auswirken. Gestützt auf diese Ergebnisse wurden von der Programmleitung Empfehlungen abgeleitet und in Workshops mit den Projektverantwortlichen und der begleitenden Expertengruppe diskutiert und verabschiedet. Die Empfehlungen sollen aufzeigen, welche Vorsorgemassnahmen für die **Verminderung des Sturmschadenrisikos** oder zur **Verbesserung des Potenzials für die Wiederbewaldung** möglich sind.

Ihrem Ursprunge nach sind sowohl die Ergebnisse der Projekte wie auch die Empfehlungen vorerst für die Untersuchungsperimeter zutreffend. Durch Analogie lassen sich einige davon aber auch auf **andere Verhältnisse** übertragen und so verallgemeinern. Besonders bei den waldbaulichen Empfehlungen zeigt es sich, dass vieles nicht unbekannt ist und dass die Anwendung der Empfehlungen sich auf viel breiterer Ebene auswirkt als nur in der Verringerung der Sturmempfindlichkeit. Zu nennen wären etwa die Erhöhung der Stabilität der Bestände gegen andere Naturgefahren, eine Verringerung des Produktionsrisikos, die Senkung der Anfälligkeit gegenüber biotischen und abiotischen Schäden, eine Verbesserung des ökologischen Wertes als Lebensraum und anderes mehr.

Ob die **Umsetzung der Empfehlungen** in Einzelfall sinnvoll ist, hängt sowohl von der Ausgangslage (Standort, Baumarten, Bestand, Windexposition) als auch von der dem Wald zugeordneten Bedeutung ab. Die Gewichtungen und Entscheidungen sind deshalb im betroffenen Gebiet vorzunehmen. Sie werden in einem Nutzwald anders ausfallen als in einem Schutzwald.

4.2.1 Waldbau – Verjüngung und Waldpflege

Verminderung der Sturmempfindlichkeit

Verschiedene Elemente des Bestandesaufbaus wirken sich auf die Sturmempfindlichkeit aus. Am deutlichsten ist dieser Zusammenhang bei der Baumartenmischung, der Baumart, der Bestandeshöhe und den Höhenunterschieden zwischen Beständen, etwas weniger stark bei der Bestandesstruktur, den Durchforstungen und bei den Eigenschaften des Einzelbaumes. Eine besondere Bedeutung kommt deshalb einer sorgfältigen **waldbaulichen Planung** zu als Grundlage für eine gezielte Beeinflussung dieser Faktoren. Während sich die Bestandeshöhe nur unwesentlich oder dann durch eine vorzeitige **Verjüngung** mit entsprechender Störung der natürlichen Dynamik und wirtschaftlichen Einbussen beeinflussen lässt, können die Baumartenwahl, die Mischung und die Bestandesstruktur auf viel breiterer Ebene und über längere Zeit gelenkt werden. Die Hauptentscheide für den zukünftigen Bestandesaufbau fallen aber eindeutig in der Verjüngungs- und Jungwaldphase. Differenzierte Verjüngungsverfahren und frühzeitige **Mischungsregulierung** sollen darauf ausgerichtet sein, die standortgerechten Baumarten in ihrem ganzen Spektrum zu begünstigen, einen minimalen Laubholzanteil sicher zu stellen und stufige

Strukturen zu fördern. Auf gefährdeten Standorten sollen bei der Verjüngung keine windexponierten Säume, Steilränder oder grössere Löcher entstehen. Standortsfremde, reine Fichtenbestände sind zu vermeiden. Schon geringe Anteile (>10% in der Oberschicht) von Laubbäumen oder standortverträglichen, stabilen Gastbaumarten wie Douglasie oder Lärche, vermögen die Sturmempfindlichkeit erheblich zu senken. Die an die Jungwaldpflege anschliessenden Erstdurchforstungen sollen früh und stark sein und dann mit regelmässigen und schwächeren **Durchforstungen** fortgesetzt werden. Wichtig ist dabei die Ausbildung eines gleichmässigen Netzes von stabilen Gerüstbäumen. Wo es die standörtlichen Voraussetzungen erlauben sind stufige oder plenterartige Bestände eine gute Wahl zur Verminderung der Sturmempfindlichkeit.

Besonderes Augenmerk ist auf die alten und **vorratsreichen Bestände** zu richten. Sie sind mit ihrer grossen Oberhöhe, dem im Vergleich zu jüngeren Beständen erhöhten Anteil an Bäumen mit Stamm- und Wurzelfäulen und der Anfälligkeit auf Folgeschäden durch Käfer bei Sturmereignissen besonders gefährdet. Die Verjüngung solcher Bestände in adäquatem Tempo hat hohe Priorität. Sie vermindert die Sturmanfälligkeit der Wälder, das Ausmass der Sturmschäden und auch jenes der Folgeschäden.

Die nassen und die sauren Standorte weisen nach den Lotharuntersuchungen häufiger Sturmschäden auf als die übrigen Standorte. In diesen Fällen ist es deshalb besonders wichtig, dass der **waldbauliche Handlungsspielraum** voll ausgenutzt und die entsprechenden Empfehlungen umgesetzt werden. Eine entscheidende Bedeutung kommt auf diesen Standorten sicher einer sorgfältigen Baumartenwahl zu.

Gesamthaft kann festgehalten werden, dass der **naturnahe Waldbau** «schweizerischer Prägung» – mit hohem Anteil Naturverjüngung, standortgerechter Baumartenwahl, standortverträglichem Anteil Gastbaumarten, Vermeidung grossflächig einheitlicher Abläufe – gute Voraussetzungen bietet, um das Risiko von Sturmschäden in den Wäldern so gering wie möglich zu halten ohne einzelne Leistungen des Waldes über Gebühr einzuschränken.

**Verbesserung der
Voraussetzungen für die
Wiederbewaldung**

Die waldbaulichen Massnahmen zur Verminderung der Sturmempfindlichkeit wirken sich grossenteils auch positiv auf die Ausgangslage für die Wiederbewaldung nach einem Sturm aus. Die **standortgerechte Baumartenwahl** erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass nach einem Sturm auf der Sturmfläche oder in deren Umgebung geeignete **Samenbäume** für die Wiederverjüngung vorhanden sind. Waren vor dem Sturm stufige oder plenterartige Mischbestände vorhanden, wo auf einem grossen Teil der Fläche Verjüngungsprozesse laufen, sind nach einem Sturmereignis die Voraussetzungen für die Wiederbewaldung besser und auch die Kosten geringer als anderswo. Es sind dann auf der Sturmfläche bereits **differenzierte Verjüngungsansätze** vorhanden und verbleibende Bäume der Mittel- und Oberschicht wirken sich günstig auf Mikroklima und Verjüngungsgunst aus.

4.2.2 Bodenschutz – Holzernte und Räumungsarbeiten

Verminderung der Sturmempfindlichkeit

Art und Zeitpunkt der **Holzernte** sollen so gewählt werden, dass möglichst wenig Schäden am verbleibenden Bestand und am Boden entstehen. Die Baum- und Wurzelverletzungen erhöhen das Risiko des Befalls mit Wurzel- und Stammfäulen und damit die Empfindlichkeit der Bäume gegenüber Windeinwirkungen. Bei der Holzernte und besonders beim Einsatz von Seilkrananlagen ist eine sorgfältige Planung angezeigt, damit keine windexponierten **Säume**, **Schneisen** oder **Löcher** entstehen.

Verbesserung der Voraussetzungen für die Wiederbewaldung

Wichtigste Vorsorgemassnahme bei der Räumung von Sturmflächen ist die **Vermeidung von Bodenverdichtungen**. Ein flächiges Befahren muss vermieden werden. Bodenschäden, die je nach Ausgangslage in unterschiedlichem Ausmass aber grundsätzlich bei jedem Befahren entstehen, sollen auf klar bezeichnete Rückegassen beschränkt werden. Der sorgfältigen Planung einer Räumung, inkl. der Möglichkeit auf eine Räumung zu verzichten, kommt deshalb grosse Bedeutung zu. Dabei müssen die Empfindlichkeit der Standorte, der Wassersättigungsgrad des Bodens, die Wahl der geeignetsten Mittel und mögliche Massnahmen zur Verminderung von Bodenschäden in die Entscheidungsfindung einbezogen werden. Gestützt auf die Ergebnisse der Untersuchungen auf Sturmflächen wird eine Entscheidungshilfe erscheinen, die es dem Praktiker erlaubt bei der Einzelfläche Möglichkeiten und Risiken einer Räumung abzuschätzen und sich so für ein möglichst schonendes Vorgehen oder den Verzicht auf eine Räumung zu entscheiden.

Bei bereits beeinträchtigten Böden können geeignete Massnahmen punktuell die natürlichen **Regenerationsprozesse** unterstützen. Das Pflanzen von Baumarten mit intensivem Durchwurzelungspotenzial wie Weiden oder Erlen auf verdichteten Stellen fördert die Durchwurzelung und verbessert das Porensystem und den Wasserhaushalt. Damit werden auch die Bedingungen für die Bodenlebewesen wieder günstiger und die **biologische Aktivität** nimmt zu. Es gibt Hinweise darauf, dass letztere auch mit einer geeigneten Holzschnitzelabdeckung positiv beeinflusst werden kann indem die Regenwurmpopulation gefördert wird. Nach Lothar angelegte Dauerbeobachtungsflächen werden vertiefte Erkenntnisse über mögliche Regenerationsmassnahmen bei Bodenverdichtungen liefern.

4.2.3 Umweltpolitik – anthropogene Einträge

Durch den Sturm gebrochene Fichten zeigten einen höheren Stickstoffgehalt im Holz und ein stärkeres Wachstum als die Kontrollbäume und Buchen mit erhöhtem Stickstoffgehalt im Laub wurden häufiger geworfener als solche mit tieferen Blattspiegelwerten. Auch wenn die ursächliche Beziehung mit den hohen Stickstoff-Depositionen aus der Luft nicht untersucht werden konnte, darf doch angenommen werden, dass diese mindestens einen Beitrag an die **Stickstoffübersorgung** der Bäume liefern. Als Risikofaktor hat sich auch der Säurezustand des Bodens erwiesen. Sturmschäden sind auf sauren Standorten häufiger als auf den übrigen Standor-

ten. Die Forderung nach weiterer Reduktion der atmosphärischen Stickstoff-Depositionen und versauernder Einträge muss aus dieser Sicht unterstützt werden.

4.2.4 Umsetzung – Schulung

Ein Überblick über die Empfehlungen zeigt, dass deren Umsetzung viel **Fachwissen** und **Knowhow** bei vielen Akteuren voraussetzt: betroffen sind einerseits diejenigen, die den Wald pflegen, die Waldeigentümer und der Forstdienst aller Stufen, andererseits die Wald- und Umweltpolitiker. Viele der Ergebnisse und Empfehlungen sind nicht neu, sie erscheinen aber nach Lothar und den Projekten des Grundlagenprogrammes in neuem oder anderem Licht.

Die Erkenntnisse aus den Projekten des Lothar-Grundlagenprogrammes, die Empfehlungen, Handlungsanleitungen und Entscheidungshilfen müssen so aufbereitet und verteilt werden, dass sie den verantwortlichen Akteuren in einer **praxisgerechten Form** zur Verfügung stehen.

Spezifische und stufenübergreifende **Aus- und Weiterbildungsangebote** in den Bereichen Waldbau, Holzernte und Bodenschutz sollen die Empfehlungen und Hilfsmittel einführen und dafür sorgen, dass die gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis sinnvoll und effizient umgesetzt werden. Dabei muss besonderes Gewicht auf die Belange der Risikobeurteilung, der Vorsorge und der sorgfältigen Massnahmenplanung, gelegt werden.

5 Perspectives

Philippe Raetz

En résumé, les résultats du programme partiel relèvent de deux plans différents. Il s'agit d'une part de l'influence du sylviculteur sur l'état et le développement de la forêt (l'état de la forêt et sa résistance est ici mesuré ici au travers des effets de la tempête). D'autre part les investigations ont porté sur les répercussions des émissions de gaz à effet de serre et de polluants sur l'état de la forêt.

La question à laquelle le groupe de synthèse du PP6 cherche à répondre peut se formuler de la manière suivante : que disent les résultats des projets et quelles conclusions interpellent le sylviculteur et sont en mesure de changer son comportement ?

La sylviculture consiste aussi à faire de la prévention

Les résultats de la recherche centrée sur les peuplements et l'arbre réaffirment les connaissances acquises par le passé. Les résultats ne répondent pas toujours définitivement aux questions posées dans tous les détails. Il montrent néanmoins une tendance forte : la sylviculture exploite au mieux la synergie entre les aptitudes des stations et celles des essences constituent la meilleure prévention des dégâts aux forêts quel qu'en soit leur origine. La prévention est de longue haleine (70 ans et plus), les décisions importantes doivent se prendre dans la jeune forêt (perchis) et elle a ses limites : si la forêt est exposée à des vents très violents les dégâts sont aléatoires, son état ne joue alors qu'un rôle marginal.

Réduction du risque et développement durable

La prévention consiste à tenir compte des contraintes stationnelles dans le choix des essences, maintenir ou favoriser plus d'essences feuillues (ou résineuses moins sensibles) dans les peuplements, ceci jusque à l'étage supérieur et dominant, afin d'en améliorer la stabilité collective. Par l'éclaircie, il est possible de travailler conjointement sur la stabilité et la structure des peuplements, cette dernière est particulièrement importante dans la forêt protectrice. La réduction du risque qui en résulte porte tout à la fois sur la résistance à la perturbation « tempête » que sur la faculté de la forêt à reconstituer les dégâts. La réduction du risque sylvicole correspond aussi à une stratégie de minimisation de l'exposition des entreprises au risque économique. Elle représente ainsi une stratégie cohérente de conservation des forêts et de développement durable.

Comportements à éviter

Dans une argumentation à contrario, c'est bien de la limitation des risques liés à la monoculture de l'épicéa dont il est question. La monoculture de l'épicéa est un choix de gestion des forêts qui repose principalement sur des considérations économiques. Elle présente un risque très élevé lors des tempêtes, un risque accru par les séquelles inévitables des tempêtes que sont les épidémies de bostryche. Les résultats de la recherche montrent que le sylviculteur peut travailler avec l'épicéa mais qu'il faut éviter de le favoriser systématiquement.

Les sols et le climat sont au centre des causalités

Le problème des gaz à effet de serre ou de ceux à effet eutrophisant et acidifiant est complexe. La question est de savoir quelle sera l'évolution climatique induite par le réchauffement global dans le futur et quelles en seront les répercussions sur la couverture végétale et forestière. En parallèle on assiste à des altérations physico-chimiques des sols forestiers induites par les immissions. Des études ont démontré

la grande importance des sols. Ils constituent une interface entre la forêt et les influences environnementales et représentent le véritable capital forestier. La qualité des sols se répercute aussi sur la qualité des nappes phréatiques. A ce titre, une meilleure maîtrise des effets des exploitations mécaniques sur les sols (compaction), en temps de crise comme en exploitations normales, doit être promue. Les apports eutrophisant ont une influence sur l'état physiologique et nutritionnel des arbres. La capacité d'absorption des polluants par les sols est limitée et le lessivage des éléments vitaux est une réalité. La pression adaptative exercée par le climat sur les forêts et la dégradation des sols perdurera pendant longtemps, même dans l'hypothèse d'une stabilisation des émissions polluantes dès maintenant : les modèles climatiques nous interdisent en effet de spéculer sur une inversion de tendance à court et moyen terme. La réponse à ce problème dépasse, et de loin, le champ d'action de la politique forestière, mais une stratégie sylviculturale de répartition des risques est indiquée pour réduire les symptômes de ces développements préoccupants et contribuer finalement à la conservation qualitative des forêts.

Un effort soutenu

Des efforts de recherche sont encore nécessaires pour améliorer les connaissances des relations de cause à effet entre les émissions et le changement climatique d'une part, entre le changement climatique, les immissions et le milieu forestier d'autre part. Ces interactions méritent d'être mieux connues et les risques qu'elles révèlent doivent être communiqués plus clairement. La prévention à long terme des dégâts forestiers en utilisant les critères de l'économie durable doit être revalorisée par rapport à la stratégie de réparation des dégâts. En même temps, des efforts accrus de transferts de connaissance, le maintien de la qualité de l'enseignement en écologie forestière et la fixation d'objectifs de gestion des forêts tenant compte de ces nouvelles contraintes sont souhaitables.

6 Projekte im Teilprogramm 6

Projektname	Projektleiter
Sturmschäden in ungleichförmigen Beständen	P. Bachmann, Lubor Dvorak, ETH, Zürich
Erfassung der Bestandesdaten und Schäden auf dem repräsentativen 4x4-km Sanasilva-Netz	M. Dobbertin, WSL, Birmensdorf
Konsequenzen des Extremsturmes Lothar für die waldbauliche Praxis: Einfluss der Wind- und Böenstärke auf die Waldstabilität im Raum Reusstal-Limmattal	J.-Ph. Schütz, ETH, Zürich
Einfluss von Stamm- und Wurzelfäulen auf die Sturmwirkung	D. Rigling, WSL, Birmensdorf
Sind Windwurf- oder Windbruchrisiko mit umweltindizierten Veränderungen im Holzkörper assoziiert?	Ch. Körner, Universität, Basel
Zusammenhänge zwischen Bodenversauerung und Wurzelsystem	P. Brang, WSL, Birmensdorf
Einfluss des Liegenlassens bzw. von schonender und nicht schonender Räumung auf die Durchwurzelung, den Bodenchemismus und die Auswaschung	W. Flückiger, IAP, Schönenbuch
Entscheidungshilfe zum Schutz des Bodens bei Räumungsarbeiten nach Flächenschäden	M. Zürrer, Envico AG, Zürich
Bodenentwicklung auf Lothar-Windwurfflächen	P. Lüscher, WSL, Birmensdorf
Regenerationsfähigkeit von Bodenverdichtungen im Wald	P. Lüscher, WSL, Birmensdorf
Wiederbewaldung von Windwurfflächen: prädiktive Modelle der Waldentwicklung	P. Bebi, WSL, Birmensdorf