

R h e i n l a n d - P f a l z
Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten

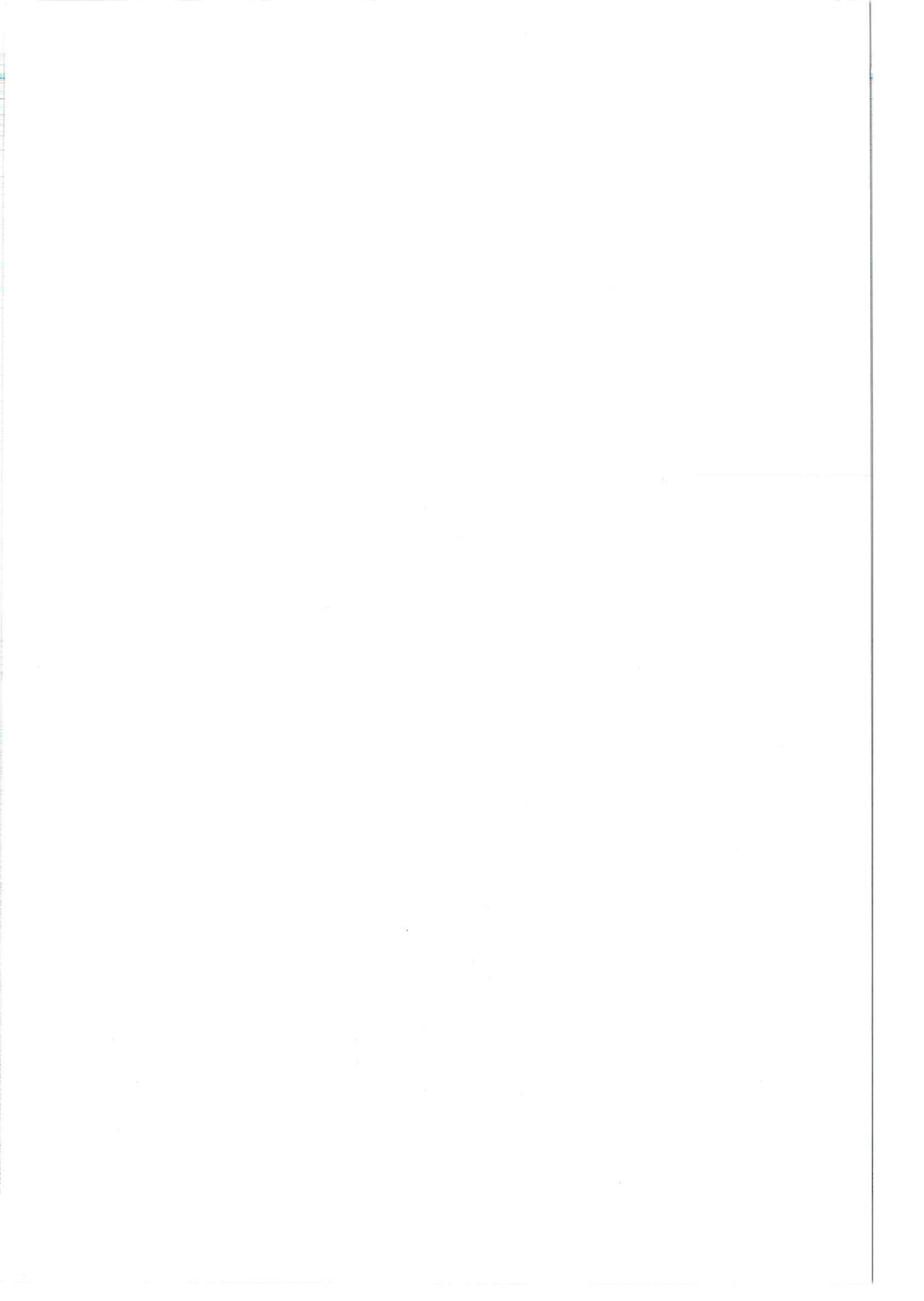
Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz
Schloß, D-6751 Trippstadt

Telefon: 06306/8311
Telefax: 06306/2821

Nr. 19/91

Autorenkollektiv

**Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen
Sturm- und Immissionsschäden im
Vorderen Hunsrück - "SIMS" -**



Zur Einführung

Untersuchungen zur Ursache von Sturmschäden und zur Verminderung des Sturmschadensrisikos in den Wäldern sind so aktuell wie nie zuvor. Wurde bereits der Novembersturm des Jahres 1984 mit einer Schadholzmenge von ca. 2,4 Millionen Festmetern als "Jahrhundertsturm" bezeichnet, so haben die Orkane zu Beginn des Jahres 1990 Schäden in einer bisher nicht bekannten Größenordnung verursacht.

Mehr als 12 Millionen Festmeter Holz wurden geworfen oder gebrochen. Fast 30 000 Hektar Wald sind völlig verwüstet.

Wie im Jahr 1984 lag auch im Jahr 1990 ein Schwerpunkt der Sturmschäden im Vorderen Hunsrück. In den dortigen Forstämtern fielen jeweils deutlich mehr als 200 000 Festmeter Sturmholz an. Die gewaltigen materiellen Schäden treffen in diesem kommunalwaldreichen Gebiet die meist finanzschwachen Gemeinden besonders hart. Neben den wirtschaftlichen sind aber auch beträchtliche ökologische Schäden zu besorgen. Auf den verbreitet auftretenden Kahlflecken sind Nährstoffverluste durch einen zu raschen Humusabbau und eine beschleunigte Bodenversauerung zu erwarten. Auf ungünstigen Standorten kann die Kahllage großer Flächen eine verstärkte Nitratfreisetzung, ein rasches Fortschreiten der Versauerungsfront in den Unterboden und somit eine Belastung des Grund- und Quellwassers mit Metallen und Nitrat bewirken. Die angerissenen Wälder lassen weitere Sturmwürfe, Borkenkäferkalamitäten und erhöhte Luftschadstoffeinträge erwarten.

Angesichts dieser katastrophalen Wirkungen von Sturmschäden und der Warnung namhafter Wissenschaftler vor einer Häufung von Sturmereignissen im Zuge der globalen Klimaveränderung ist die Verminderung des Sturmschadensrisikos in den Wäldern ein vorrangiges Ziel der Landesforstverwaltung.

Bereits Ende der 70er Jahre wurde der Verdacht geäußert, daß der Eintrag von Luftverunreinigungen über eine fortschreitende Bodenversauerung und Wurzelschäden zu einer höheren Sturmwurfgefährdung der Wälder beitragen kann. Konkrete Nachweise konnten seinerzeit allerdings nicht vorgelegt werden. Angesichts der beträchtlichen Sturmschäden aus dem Jahr 1984 und unter dem Eindruck, daß immer jüngere Bestände dem Sturm zum Opfer fielen, wurde auf Anregung des Rhein-Hunsrück-Kreises, der betroffenen Gemeinden und der Forstämter dieser Region im Rahmen des Forstökoprogramms der Landesregierung ein Untersuchungsprojekt in Gang gesetzt, um mögliche Wechselwirkungen zwischen Immissions- und Sturmschäden im Vorderen Hunsrück zu

klären und möglichst konkrete Handlungsempfehlungen für die forstliche Praxis zur Verminderung des Sturmwurfrisikos zu entwickeln. In einem breit angelegten Untersuchungsprogramm wurden unter der Federführung der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz durch mehrere Arbeitsgruppen von 1986 bis 1990

- die Immissionsbelastung und der Wasserhaushalt von Waldgebieten im Vorderen Hunsrück ermittelt,
- Beziehungen zwischen Sturmschäden und außergewöhnlichen meteorologischen Ereignissen untersucht,
- Einflüsse des Standortes und der Bestandesstruktur auf das Ausmaß der Sturmschäden aufgezeigt und
- umfangreiche Untersuchungen zur Durchwurzelung typischer Waldstandorte dieser Region durchgeführt.

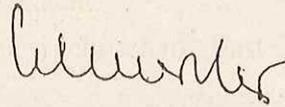
Einen großen Anteil an den Untersuchungen hatte das Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen. Es ist mir ein besonderes Anliegen, dem Leiter des Institutes, Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Ulrich, und seinen Mitarbeitern für ihr besonderes Engagement und die gründliche wissenschaftliche Arbeit zu danken. Mein besonderer Dank gilt auch dem Landrat des Rhein-Hunsrück-Kreises, den Ortsbürgermeistern der Gemeinden Kisselbach und Laudert, in deren Waldflächen die Untersuchungen vorwiegend durchgeführt wurden, sowie den Mitarbeitern der Forstämter Simmern, Kastellaun und Kirchberg für die tatkräftige Unterstützung der Untersuchungen und die wertvollen Anregungen zum Untersuchungsprogramm.

Bereits während der laufenden Untersuchungen wurden die vorläufigen Ergebnisse den beteiligten Gemeinden und Forstämtern vorgestellt und vor Ort eingehend diskutiert. Viele Anregungen konnten so in die Untersuchungen und in die Interpretation der Ergebnisse einfließen.

Die Ergebnisse der sehr umfassenden Untersuchungsprogramme sind ausführlich in den Berichten der einzelnen Arbeitsgruppen dokumentiert und zum Teil auch bereits veröffentlicht. Dieses Heft der Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz faßt die wesentlichen Ergebnisse und die hieraus abzuleitenden Schlußfolgerungen zusammen. Es soll vor allem der Information der forstlichen Praxis dienen und eine Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in das praktische Handeln der Waldbesitzer

und Forstleute ermöglichen. Ich bin sicher, daß hiermit ein wesentlicher Beitrag in Richtung auf eine Verringerung des Sturmwurftrisikos auf Staunässestandorten zu erzielen ist.

Mainz, im August 1991



Schneider

Inhaltsverzeichnis

	Seite
J. Block	: Zielsetzung und Ablauf des SIMS-Projektes..... 8
J. P. Schmidt	: Die Beziehung der hydromorphologischen Merkmale zum Wasserhaushalt auf Waldstand- orten im Hunsrück..... 13
N. Rastin	: Immissionsbelastung der SIMS-Standorte..... 28
G. Gravenhorst, J. Gieseemann, H. Kreilein und M. Raschendorfer	: Die Zunahme von Sturmschäden in den Wäldern des Vorderen Hunsrück und ihre mögliche atmo- sphärische Ursache..... 40
M. Heupel und J. Block	: Untersuchungen zum Einfluß des Standortes und der Bestandesstruktur auf das Ausmaß von Sturm- schäden im Vorderen Hunsrück..... 57
M. Heupel und J. Block	: Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wipfel- köpfungen auf Pseudogleyböden..... 69
N. Rastin	: Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf Braunerde-, Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyböden im Vorderen Hunsrück..... 79
H. Fölster, M. Degenhardt, T. Flor und M. Lux	: Untersuchungen zur Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität auf Braunerde- Pseudogleyen im Vorderen Hunsrück in Abhängig- keit von Baumart und Bestandesstrukturpara- metern..... 91

H. Fölster und Y. Xu	: Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Küstentanne (<i>Abies grandis</i>) und Fichte (<i>Picea abies</i>) auf vernässten Stand- orten.....	107
N. Rastin	: Untersuchungen zur Verankerung von Fichten auf Braunerde-, Braunerde-Pseudogley- und Pseudo- ogley-Böden des Vorderen Hunsrücks.....	120
B. Ulrich	: Zusammenfassende ökologische Bewertung der Untersuchungsergebnisse des SIMS-Projektes.....	130
W. Eder	: Konsequenzen aus den Untersuchungsergebnissen des SIMS-Projektes im Hinblick auf die wald- bauliche Behandlung von Staunässestandorten.....	141
	Berichte und Veröffentlichungen aus dem SIMS-Projekt.....	150

Zielsetzung und Ablauf des SIMS-Projektes

J. Block

Zu Beginn der 80er Jahre entstand in den Forstämtern des Vorderen Hunsrücks der Eindruck, daß die Stürme von Ereignis zu Ereignis immer größere Schäden verursachten und zunehmend auch jüngere Bestände betrafen. Zur gleichen Zeit wurden auch im Vorderhunsrück die Symptome der neuartigen Walderkrankung immer deutlicher. Da die neuartigen Waldschäden auch mit Wurzelschäden durch immissionsbedingte Bodenversauerung in Zusammenhang gebracht wurden, lag der Verdacht auf der Hand, daß ein Zusammenhang zwischen dem ständig steigenden Sturmwurfmaß und immissionsbedingten Wurzelschäden bestehen könnte.

Die örtliche Forstverwaltung regte daher bereits im Frühjahr 1984, also noch vor dem katastrophalen Herbststurm des gleichen Jahres, Untersuchungen an, die diesen Zusammenhang überprüfen und möglichst rasch Konsequenzen für die weitere waldbauliche Behandlung der sturmwurfgefährdeten Waldgebiete aufzeigen sollten.

In Zusammenarbeit mit der örtlichen Forstverwaltung, des dortigen Forsteinrichters, der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz und des Instituts für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen wurde umgehend unter dem Kürzel SIMS (Sturm- und Immissionschäden) ein entsprechendes Untersuchungsprogramm erarbeitet. Leider konnte kurzfristig lediglich eine Befliegung des Untersuchungsraumes mit IRC-Luftbildern dank einer finanziellen Unterstützung des Rhein-Hunsrück-Kreises realisiert werden. Bei diesem Teilvorhaben wurde im August 1984 auf etwa 14 000 Hektar Waldfläche, aufgeteilt in 8 Befliegungsräume, das Ausmaß der Waldschäden aufgenommen. Die in einem engen Raster vorgenommene Ansprache von mehr als 58 000 Bäumen erbrachte für das Untersuchungsgebiet keine über die durchschnittlichen Werte des Landes hinausgehende Schädigung (57 % Stufe 0, 42 % Stufe 1, < 1 % Stufe 2 - 4, BEUTEL 1986). Auch war keine deutliche räumliche Strukturierung der Schädigungen zu erkennen. Ein Zusammenhang zwischen Flächen stärkerer Kronenschäden und späteren Sturmwurfflächen konnte daher nicht festgestellt werden.

Die Durchführung des Kernprojektes zur Überprüfung des Zusammenhangs zwischen Schadstoffeinträgen, Bodenversauerung und Wurzelschäden verzögerte sich um fast zwei Jahre, da verschiedene Versuche, Finanzmittel für das Projekt bereitzustellen,

fehlschlagen. Im Frühjahr 1986 gelang es dann aber, das Projekt in das "Forstliche Ökoprogramm" der Landesregierung einzubringen. Die Mehrzahl der Untersuchungen konnte somit im Sommer 1986 beginnen.

Im Mittelpunkt des Gesamtprojektes steht ein Forschungsauftrag an das Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen (Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. B. ULRICH) mit dem Titel "Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden über den Einfluß von Standort und Immission auf die Entstehung von Sturmschäden in den Forstämtern des Vorderhunsrücks - SIMS". In diesem auf drei Jahre veranschlagten Forschungsvorhaben sollte vor allem folgende Arbeitshypothese überprüft werden:

Die Deposition von Luftverunreinigungen führt in den Waldböden des Vorderhunsrücks zu einer fortschreitenden Bodenversauerung und zur Freisetzung potentiell wurzeltoxischer Metallkationen (Kationsäuren). Vor allem in Versauerungsphasen, z.B. infolge von trocken-warmen Sommern, entsteht hierdurch in humusarmen Horizonten ein toxisches Milieu, wodurch die Wurzeln gezwungen werden, sich aus dem unteren Boden in die humusreicheren oberen Horizonte zurückzuziehen, in denen die freigesetzten Kationsäuren durch Humusstoffe komplexiert werden. Als Folge des Rückzugs der Wurzeln kann sich die Dichtlagerung des Unterbodens wegen der fehlenden biologischen Aktivität verstärken. Eine Neubildung von Grobporen durch Wurzelkanäle unterbleibt. Über Jahrzehnte hinweg kann diese Entwicklung zu einer zunehmenden Bodenverdichtung und einer flacheren Wurzel Ausbildung mit der Folge einer erhöhten Sturmwurfanfälligkeit der Bestände führen.

Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden auf ausgewählten Standorten der Standortgrundformen III (Braunerde), VIII (Braunerde-Pseudogley) und IX (Pseudogley) folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Stoffeintragsmessungen auf Freiflächen und unter Fichtenbeständen sowie Sickerwasseruntersuchungen zur Abschätzung der Immissionsbelastung der dortigen Waldökosysteme (RASTIN und ULRICH 1990 a, RASTIN 1991 a).
- Bodenphysikalische Untersuchungen und Saugspannungsmessungen zur Beschreibung des Wasserhaushalts typischer Waldstandorte des Vorderhunsrücks (SCHMIDT 1990, 1991).

- Aufnahme der Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf unterschiedlich staunässebeeinflußten Standorten an Schurfgräben (RASTIN und ULRICH 1990 b, RASTIN 1991 b).
- Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Feinwurzelbiomasse, Staunässeeinfluß und Bodenchemismus mit Hilfe einer Bohrkernmethode (RASTIN und ULRICH 1990a und b, RASTIN 1991 c).
- Untersuchungen zur Verankerung der Fichte auf unterschiedlich stauwasserbeeinflußten Standorten (RASTIN und ULRICH 1990 a, RASTIN 1991 d).

Begleitend zu diesem bodenkundlichen Kernprojekt führte die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz mit Hilfe von Werkvertragspartnern eine großflächige Erhebung zur Genese von Sturmschäden im Vorderhunsrück, zur Ermittlung der Beziehungen zwischen Standorts- und Bestandesstrukturparametern und zur Wirksamkeit waldbaulicher und technischer Maßnahmen zur Sturmschadenssicherung durch (GALLUS und HEUPEL 1987, HEUPEL und BLOCK 1991 a).

In einem weiteren Teilprojekt überprüfte das Institut für Bioklimatologie der Universität Göttingen (Leiter: Prof. Dr. G. Gravenhorst), ob die Häufung von Sturmschäden in den 80er Jahren auf eine außergewöhnliche Häufung von besonders schweren Stürmen in diesem Zeitraum zurückgeführt werden kann (GRAVENHORST u.a. 1991).

Die vorläufigen Ergebnisse der Teilprojekte wurden in Koordinierungsbesprechungen im Frühjahr 1988 und im Frühjahr 1989 von den einzelnen Arbeitsgruppen vorgestellt und vor Ort eingehend mit den örtlichen Waldbesitzern und der forstlichen Praxis diskutiert. Hierbei ergab sich eine Vielzahl von Anregungen, die in die Arbeit der einzelnen Arbeitsgruppen integriert werden konnte. Auch wurde eine Reihe von praxisorientierten Fragestellungen formuliert und die Fachwissenschaftler gebeten, hierauf in ihren Arbeiten einzugehen, z.B.:

- Wie wirken sich Entwässerungssysteme auf die Waldökosysteme und deren Sturmwurfanfälligkeit aus?
- Wie wirksam sind Wipfelköpfungen auf Staunässestandorten?
Unter welchen Bedingungen sind sie zu empfehlen?

- Wie wirksam sind Laubholzriegel im Hinblick auf die Sturmsicherung nachgelagerter Bestände?
- Wie kann die Ansprache von Pseudogleyen im Hinblick auf die Abschätzung des Standortsrisikos verbessert werden?
- Sind Bodenschutzkalkungen auf den Staunässestandorten sinnvoll und erforderlich?
- Sollen Sturmflächen vor der Neukultur durch Vollumbruch und Düngung melioriert werden?
- Welche Baumarten sind in der Lage, die Sd-Horizonte der Pseudogleye zu durchwurzeln?
- Wie wirken sich Baumartenmischungen auf die Tiefendurchwurzelung der Stauwasserstandorte aus?
- Kann mit einer geringen Stammzahlhaltung bei früher und starker Durchforstung die Wurzelausbildung der Fichte auf Braunerde-Pseudogleyen deutlich verbessert werden?

Da die Frage der Wirksamkeit von Wipfelköpfungen aus den in 1986 und 1987 erhobenen Daten (vgl. GALLUS und HEUPEL 1987) nicht mit hinreichender Sicherheit beantwortet werden konnte, wurde die Datenbasis in einem Anschlußprojekt im Rahmen einer großstatistischen Erhebung erheblich erweitert. Die Ergebnisse dieser Erhebung wurden, ergänzt um betriebswirtschaftliche Kalkulationen und konkrete Entscheidungshilfen, bereits 1989 veröffentlicht (BLOCK u.a. 1989, siehe auch HEUPEL und BLOCK 1991 b - in diesem Heft -).

Auch zur Beantwortung der während des Projekts aufgeworfenen Fragen zur Tiefendurchwurzelung von Braunerde-Pseudogleyen (Standortsgrundform VIII) durch verschiedene Baumarten, Baumartenmischungen und bei unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen reichten die ursprünglich konzipierten Untersuchungen nicht aus. Daher wurde 1988 der Forschungsauftrag an die Universität Göttingen um "Untersuchungen zur Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität auf Braunerde-Pseudogleyen im Vordergrund in Abhängigkeit von Baumart und Bestandesstrukturparametern" ergänzt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in drei Diplomarbeiten und in FÖLSTER u.a. 1991 (in diesem Heft) wiedergegeben.

Die auf einigen Hundert Seiten niedergelegten Ergebnisse des SIMS-Projektes können, wie die nachfolgenden Aufsätze zeigen, eine Reihe der Ausgangsfragestellungen beantworten. Allerdings konnten trotz des erheblichen Aufwandes bei weitem nicht alle Problembereiche so abschließend geklärt werden, wie dies für die Herleitung von Praxisempfehlungen wünschenswert gewesen wäre. Wie wohl immer bei ökosystemaren Gesamtheitsbetrachtungen werfen die Untersuchungen mehr Fragen auf, als beantwortet werden können. Dennoch dürften die Untersuchungen für die Schaffung leistungsfähiger und stabiler Waldökosysteme auf den Staunässestandorten des Vorderhunsrücks einen wesentlichen Beitrag liefern.

Literatur

Die zitierte Literatur kann der Zusammenstellung am Schluß dieses Heftes entnommen werden.

Die Beziehung der hydromorphologischen Merkmale zum Wasserhaushalt auf Waldstandorten im Hunsrück

J. P. Schmidt

1 EINLEITUNG

Ziel dieser Untersuchungen im Vorderen Hunsrück ist die Beschreibung des Wasserhaushaltes von Waldökosystemen in einem Gebiet, in dem vernäßte Böden mit Pseudogleymerkmalen auftreten.

Es soll die Dynamik des Wasserregimes in Abhängigkeit von der Zeit (Jahresverlauf) erfaßt werden. Auf der Grundlage dieser Beobachtung sollen die Wasserflüsse qualitativ und gegebenenfalls quantitativ beschrieben werden.

Dem Meßkonzept liegt die Annahme zugrunde, daß sich die räumliche Struktur der Bodeneigenschaften durch eine Kartierung der hydromorphologischen Bodenmerkmale erfassen läßt (DOBOS et al. 1990). Ob diese Merkmale die Wasserhaushaltsdynamik wiedergeben, ist zu testen. Die zweite Annahme beruht auf der Voraussetzung, daß durch die Erhebung von Strukturparametern und zeitabhängigen Größen standörtliche Unterschiede im Wasserhaushalt erfaßt werden. Als Strukturparameter werden die Wassergehalts/Wasserspannungsbeziehungen (pF -Kurven) angesprochen. Sie sollen sich gegenüber den "zeitabhängigen" Parametern nahezu konstant verhalten, d.h. ihre Veränderung erfolgt in größeren Zeitschritten (HAUHS 1991).

Als zeitabhängig werden der Freilandniederschlag, der Bestandesniederschlag und das Matrixpotential betrachtet. In diesem Aufsatz werden nur die aus den Messungen abgeleiteten Schlußfolgerungen am Beispiel von zwei Flächen vorgestellt. Detailliertere Methodenbeschreibungen, Angaben zur Simulation des Wasserhaushaltes und hydromorphologische Beschreibungen weiterer Bodenprofile im Vorderen Hunsrück finden sich in SCHMIDT (1990).

2 ZUSTANDSVARIABLEN

Das Wasserregime des Bodens wird durch die Niederschläge, die Bodenstruktur, den Wasserentzug durch die Pflanze (Transpiration) und durch die Entfernung zur Grundwasser Oberfläche gesteuert. Die Messung der Veränderung der Matrixpotentiale im Boden in Abhängigkeit von der Zeit ist eine Möglichkeit, um die Dynamik, der das Bo-

denwasser unterliegt, zu beschreiben. Die Messung des Matrixpotentials bildet die Verbindung zwischen der hydromorphologischen Profilausbildung und dem aktuellen Zustand der Waldböden ("IST"-Wasserhaushalt). Die Erfassung dieser Größen erfolgte durch ein Feldmeßsystem (SCHMIDT 1991). Das Matrixpotential wurde in 15 minütigen Zeitintervallen von der Mineralbodenoberfläche bis in max. 255 cm Tiefe durch Tensiometer erfaßt. Der Freiland- und Bestandesniederschlag wurden in wöchentlichen Intervallen bestimmt.

3 BESCHREIBUNG DER UNTERSUCHUNGSSTANDORTE UND ERGEBNISSE DER SAUGSPANNUNGSMESSUNGEN

3.1 Untersuchungsstandorte

3.1.1 Geographische Lage, Geologie und Vegetation

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich der devonischen Tonschiefer im Vorderhunsrück (Hunsrückschiefer). Die Ausgangsgesteine sind unterdevonische Tonschiefer mit Einschaltungen von Quarziten. Der anstehende Tonschiefer, bzw. die Saprolitzzone, ist von unterschiedlich mächtigen und heterogen strukturierten Deckschichten überlagert.

Die Untersuchungsflächen bei Kisselbach (Ki III und Ki IX, FA Simmern) liegen in 430 bis 450 m Höhe über NN an einem nach Osten exponierten Hang mit ca. 4 % Neigung. Die Fläche Ki IX liegt am Mittelhang, die Fläche Ki III am Unterhang. Die Mächtigkeit der Deckschicht beträgt am Unterhang 1 bis 1.5 m, am Oberhang über 3.5 m.

Alle Flächen sind mit Fichte (*Picea abies*) bestockt. Die Bestände sind 80 bis 100 Jahre alt. Ihr Wuchsleistung (Bonität) entspricht der Ertragsklasse I.5-II. Eine Krautschicht ist auf der Fläche Ki IX nicht vorhanden. Nur auf Standort Ki III treten vereinzelt Farne und Gräser auf. Dies ist auf den erhöhten Lichteinfall aufgrund der geringen Entfernung zum Bestandesrand zurückzuführen. Die Fläche Ki IX liegt im geschlossenen Bestand.

3.1.2 Hydromorphologische Beschreibung der Standorte

Die Auswahl der Flächen erfolgte auf der Grundlage der Standortkartierung und einer ergänzenden Detailkartierung. Gesucht wurden drei Standorte mit unterschiedlicher hydromorphologischer Charakteristik.

Die Flächennummern III und IX bezeichnen Standortsgrundformen der rheinland-pfälzischen Standortkartierung. Die Standortsgrundform III umfaßt Böden in ebenen Lagen ohne merklichen Staunässeinfluß. Die Standortsgrundform IX kennzeichnet Pseudogleye mit Staunässemerkmalen, die höher als 25 cm unter der Mineralbodenoberfläche reichen.

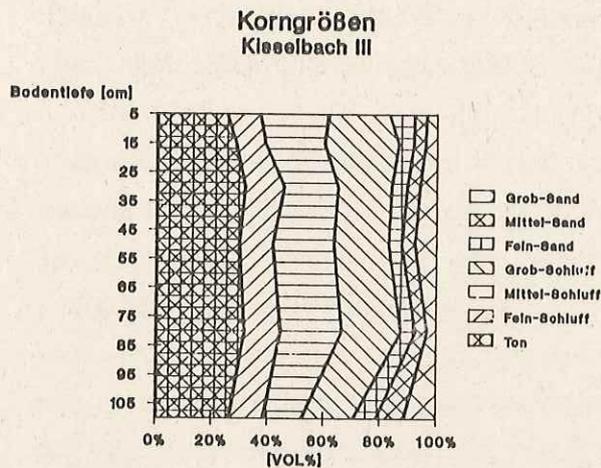
Hydromorphe Merkmale treten auf der Untersuchungsfläche Ki III ab 40 bis 50 cm Bodentiefe nur vereinzelt in Form von Konkretionen, Eisen- und Manganablagerungen am Rand von Agregaten auf. Der Oberboden im Versuchsfeld Ki IX ist einheitlich ab ca. 10 cm Tiefe deutlich gebleicht. Dieser Bleichungshorizont geht zwischen 30 und 50 cm Tiefe in einen von Rostflecken durchzogenen Bereich über.

3.1.3 Bodenphysikalische Eigenschaften

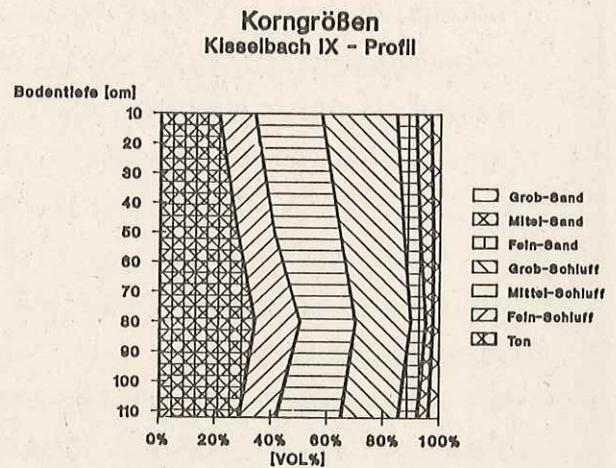
Korngrößen

Die Ergebnisse der Korngrößenanalysen sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die Korngrößenzusammensetzung in allen Profilen wird von der Tonfraktion $< 2 \mu\text{m}$ und den drei Schlufffraktionen (2 - 6, 6 - 20, 20 - 63 μm) dominiert. Sie entspricht damit im wesentlichen einem schluffigen Lehm (uL). Die Schwankungen der Korngrößenverteilung innerhalb der Profile ist größer als zwischen den einzelnen Profilen.

Toneinlagerungen in Form von "Tonbändern" mit einem Tonanteil von 40 % begleitet von Bereichen mit höherem Feinskelettanteil (Steinsohle) treten zum Teil in dem Profil auf der Fläche Ki IX in 50 bis 90 cm Tiefe auf.



**Abb. 1: Korngrößenverteilung
Kisselbach III**



**Abb. 2: Korngrößenverteilung
Kisselbach IX**

Trockenraumdichte

Die Trockenraumdichte (TRD) für Lehmböden wird bei HARTGE (1978) mit 1.19 bis 1.96 g/cm³ angegeben.

Bis auf den Oberboden von Profil Ki, III (0,9 g/cm³) liegen alle Werte in diesem Bereich.

pF-Kurven

Die pF-Kurven definieren die Beziehung des Bodenwassergehaltes zum Matrixpotential. Die Wassergehalte bei einem Matrixpotential von 2.5 cm Ws (nahe Sättigung) erreichen bei den Proben vom Graben Ki III und aus dem Profil Ki IX über alle Tiefen 30 bis 42 Vol% des Gesamtbodens. Eine Ausnahme bildet nur die Probe aus 7 cm Tiefe im Graben Ki III, die mit 55 Vol% einen deutlich höheren Wassergehalt bei gleichem Matrixpotential aufweist.

Auf der Fläche Ki III nimmt der Wassergehalt bis zum Welkepunkt (pF 4.2) im ganzen Profil mit Ausnahme des humosen Oberbodens um 21 bis 25 % ab. Im Oberboden verringert sich der Wassergehalt um 44 %. Die Wassergehaltsabnahme auf dem Standort

Ki IX beträgt im gleichen pF-Bereich 19 bis 26 % mit Ausnahme des Profilbereichs in 50 bis 100 cm Mineralbodentiefe. Hier sinkt der Wassergehalt bis zum Welkepunkt nur um 11. %.

3.2 Klimatische Bedingungen während der Meßperiode

Für die hier zu bearbeitende Fragestellung ist die Gesamtmenge des Niederschlags und seine zeitliche Abhängigkeit als Inputgröße für das Ökosystem von besonderem Interesse. In der entgegengesetzten Richtung wirken die Transpiration und die Interzeption, die im wesentlichen durch die Einstrahlung, Windgeschwindigkeit und Bestandesstruktur gesteuert werden.

Im langjährigen Mittel betragen die Niederschläge der Station Deuselbach (DEUTSCHER WETTERDIENST) 820 mm. Die Jahresmittelwerte von 1987 bis 1989 betragen 1040 mm, 855 mm und 717 mm. Der Untersuchungszeitraum kann so in ein feuchtes (1987) und ein trockenes Jahr (1989) eingeteilt werden.

Im Verhältnis zum Niederschlag im Sommer 1987 nehmen die Freilandniederschläge in den Sommermonaten in Kisselbach um 45 % 1988 und 47 % 1989 ab.

Der Bestandesniederschlag beträgt während der gesamten Meßperiode in Kisselbach zwischen 54 % und 57 % des Freilandniederschlages. Diese Werte weisen auf eine sehr hohe Interzeption von 43 % bis 46 % hin. Während der Sommermonate (vgl. Tab. 1) ist die Interzeption im feuchten Jahr 1987 mit 35 bis 39 % des Niederschlages am geringsten. In den beiden trockeneren Jahren steigt sie in den Sommermonaten auf 44 bis 63 % des Freilandniederschlages an.

Tab. 1: Bestandes- und Freilandniederschläge in mm von Juni bis September (Tag 150-273); FN = Freilandniederschlag; BN = Bestandesniederschlag

Fläche	1987		1988		1989	
	(mm)	% des FN	(mm)	% des FN	(mm)	% des FN
Ki FN	348		193		184	
Ki III BN	214	61	90	47	103	56
Ki IX BN	215	65	96	50	97	53

3.3 Zeitabhängiger Verlauf der Saugspannung

Durch die Bestimmung des Matrixpotentials bzw. der Saugspannung, wird der energetische Zustand des Bodenwassers erfaßt. Je größer die Saugspannung (d.h. je kleiner das Matrixpotential) ist, um so mehr Energie muß aufgewendet werden, um Wasser aus dem Boden zu entfernen. Ist der Boden mit Wasser gesättigt bzw. entsteht durch Überstauung ein hydrostatischer Druck, wird das Matrixpotential positiv.

Die jahreszeitliche Periodizität der Potentialverläufe ist im Untersuchungsgebiet gekennzeichnet durch eine trockene Sommerperiode mit hohen Saugspannungen und einer nassen Winterperiode, in der der Boden teilweise gesättigt ist. Eine Charakterisierung der einzelnen Versuchsflächen ist durch die Intensität und Dauer der sommerlichen Austrocknung und der winterlichen Naßphase in Abhängigkeit von den Niederschlägen möglich.

Bei allen Abbildungen der Saugspannungsverläufe sind die Niederschläge der Wetterstation Deuselbach (mm pro Tag) mit aufgetragen.

3.3.1 Kisselbach III

Am Beispiel der Meßergebnisse dieses Standortes (Ki III) sollen im folgenden die Saugspannungscharakteristika und ihre graphische Darstellung prinzipiell erläutert werden. Der zeitabhängige Verlauf der Saugspannungen ist besonders im Oberboden durch Niederschlagsereignisse geprägt (vgl. Abb. 3). Bei der Tensiometergruppe 1 ist die Reaktion des Bodens auf die Niederschläge in 10 cm Bodentiefe deutlich an den schnell abnehmenden Saugspannungswerten zu erkennen, gedämpfter reagieren die Tensiometer in den größeren Bodentiefen.

Bei Tensiometergruppe 1 ist die maximale Austrocknung in der Meßperiode 1987 (ab 31.7.87) am Tag 236 (24.8.87) erreicht. Der Oberboden ist hier bis auf ca. 800 cm Ws ausgetrocknet. Die Profilbasis in 150 cm Mineralbodentiefe ist bei der Tensiometergruppe 1 bis auf 400 cm Ws ausgetrocknet. Nach den Niederschlägen von Tag 234 bis 238 trocknet das gesamte Profil innerhalb von 8 Tagen wieder auf ähnliche Werte wie am Tag 236 aus. Erst durch die weiteren Niederschläge im Zeitraum von Tag 250 (7.9.87) bis 282 (9.10.87) wird im Oberboden (10 - 45 cm) die Saugspannung auf Werte unter 200 cm Ws (pF 2.3) abgesenkt. Der Unterboden (150 - 200 cm) wird durch die Niederschläge in dieser Periode nur gering beeinflusst. Das Niederschlagsereignis vom Tag 284 (19.9.87) mit über 36 mm bewirkt in der Folge auch eine deutliche Wiederbefeuchtung des Unterboden.

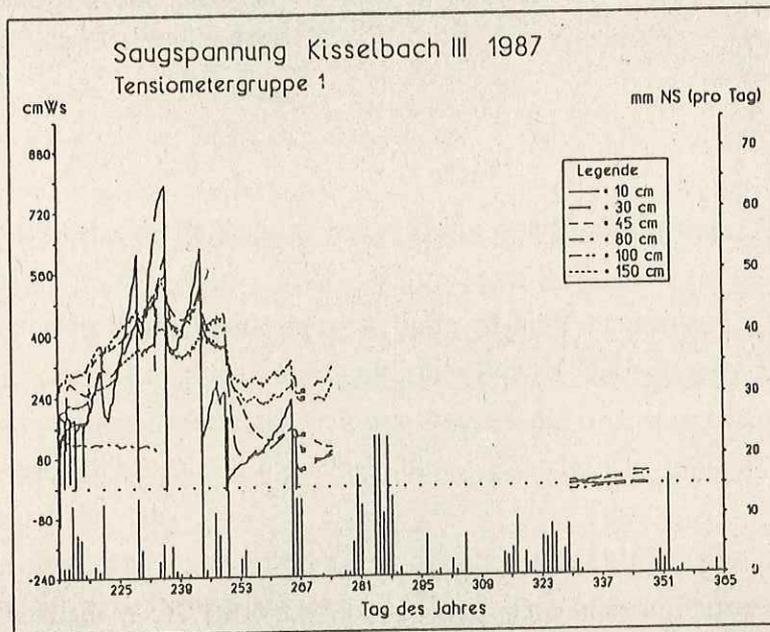


Abb. 3: Saugspannungsverlauf, Ki III Tensiometergruppe 1

In Abb. 4 werden die Mittelwerte der Saugspannung pro Tiefe für die Fläche Ki III eingeteilt in Saugspannungsklassen dargestellt. Die Saugspannungsklassen entsprechen im ungesättigten Bereich den pF-Klassen $< 1,1$ - 1,5, 1,5 - 2 und 2 - 2,5. Der Profilbereich von 15 bis 50 cm unterliegt offensichtlich während der Vegetationsperiode dem größten Nettowasserentzug (Tag 220 - 230, 1987), d.h. durch die Wurzeln wird mehr Wasser entnommen, als durch Niederschläge oder kapillarem Aufstieg nachgeliefert werden kann. In der darüberliegenden Mineralbodenschicht wird der Austrocknungsverlauf durch die Niederschläge gedämpft. Ergiebigerer Niederschläge (Tag 244, Tag 250, Tag 265 - 267) dringen je nach der Intensität unterschiedlich weit in das Profil ein. Die herbstliche Wiederbefeuchtung wird durch die Niederschläge von Tag 280 bis 288/1987 ausgelöst. In diesem Zeitraum (7.10.87 - 14.10.87) beträgt der Bestandesniederschlag für die Fläche Ki III 42 mm (vgl. Abb. 3). Die Infiltration bewirkt eine sprunghafte Veränderung der Saugspannung im oberen Profilbereich. Dieser Impuls setzt sich bis zur Profiltiefe zeitverzögert fort. Die Intensität der Potentialveränderung nimmt mit der Profiltiefe ab.

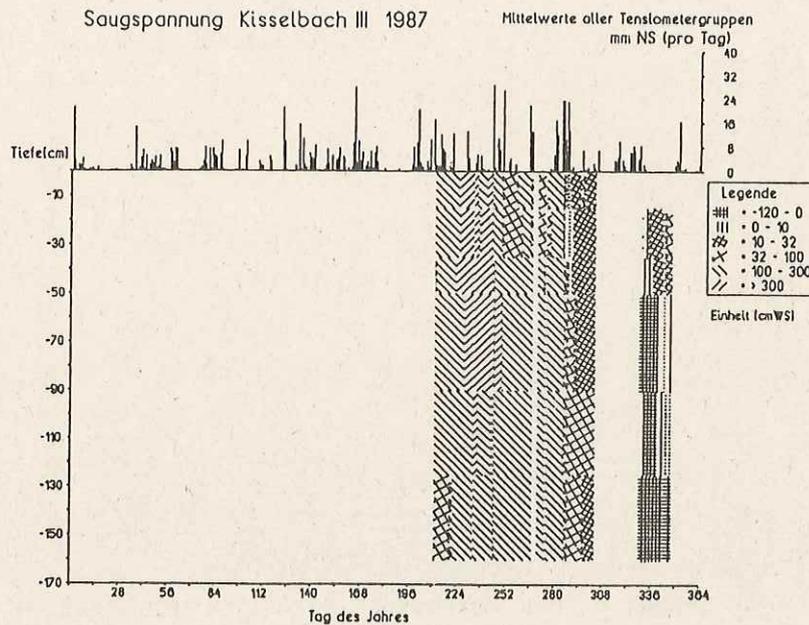


Abb. 4: Saugspannungsverlauf differenziert nach Saugspannungsklassen, Ki III, 1987

Trotz der intensiven Niederschläge treten während dieser Infiltration im Flächendurchschnitt keine gesättigten Bedingungen auf. Diese sind nur in Folge der Niederschläge Mitte November 1987 (Tage 314 - 330) kurzfristig im unteren Profilbereich zu beobachten. Im Flächenmittel ist im Herbst/Winter 1987 nur der Unterboden kurzfristig (ab Tag 337) gesättigt. Im Frühjahr 1988 (vgl. Abb. 5) ist dagegen im Flächenmittel derselbe Profilbereich von Mitte Januar bis Anfang April über 90 Tage gesättigt. In dieser Periode steigen in Abhängigkeit von den Niederschlägen auch im Oberboden die Matrixpotentiale kurzfristig auf Werte über 0 an (Tag 70 - 80). Der relativ ausgeglichene Verlauf der Saugspannung im Frühjahr geht Ende April in die Phase der Austrocknung über. Innerhalb von 30 Tagen steigt die Saugspannung im Profilbereich bis 30 cm Mineralbodentiefe auf Werte über 550 cm Ws an. Die Wiederbefeuchtung setzt erst am Jahresende ein.

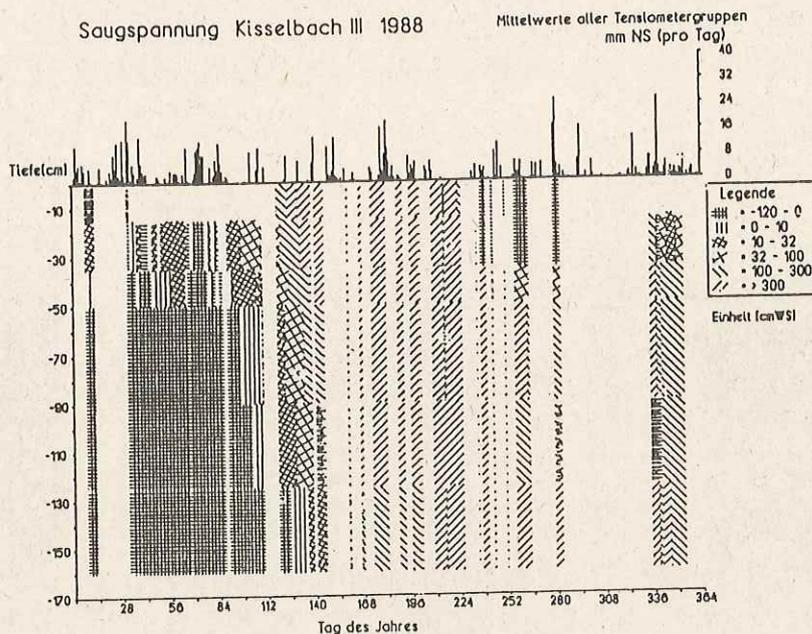


Abb. 5: Saugspannungsverlauf differenziert nach Saugspannungsklassen, Ki III 1988

3.3.2 Kisselbach IX

Die Mittelwerte aller Meßpunkte pro Meßtiefe zeigen auch hier eine Trockenphase bis Mitte Oktober 1987 an (Abb. 6). Auffällig sind die hohen Saugspannungen in der Profilschicht von 50 bis 90 cm Mineralbodentiefe.

Verursachen die Niederschläge ab Tag 150 auf dem Standort Ki III eine Abnahme der Saugspannung, die sich etwas zeitverzögert in der nächsten Profilstufe fortsetzt, so ist diese Zeitverzögerung auf der Fläche Ki IX wesentlich ausgeprägter.

Eine ähnliche Verzögerung der Versickerung tritt auch zu Beginn der Wiederbefeuchtung auf. Die Niederschläge ab Tag 280 erzeugen einen hohen Potentialgradienten in der Profiltiefe. Der Oberboden ist sehr kurzfristig gesättigt. Ab 30 cm Mineralbodentiefe ist die Reaktion der Saugspannung gegenüber der Fläche Ki III gedämpft.

Von dieser Dämpfung ausgenommen ist der Profilbereich in 150 cm Tiefe. Das Tensiometer reagiert hier auf den Niederschlag durch eine Abnahme der Saugspannung, bevor in der darüberliegenden Profilschicht eine deutliche Reaktion zu erkennen ist. Das Profil reagiert bis in 1 m Tiefe mit einer mit zunehmender Mineralbodentiefe zeitlich verzögerten Saugspannungsabnahme, wobei die Tensiometer in 115 cm, 150 cm, 225 cm und 255 cm Tiefe teilweise eine Abnahme der Saugspannung zeigen, bevor in dem darüberliegenden Bereich eine Reaktion eingesetzt hat (siehe Kap. 4.3).

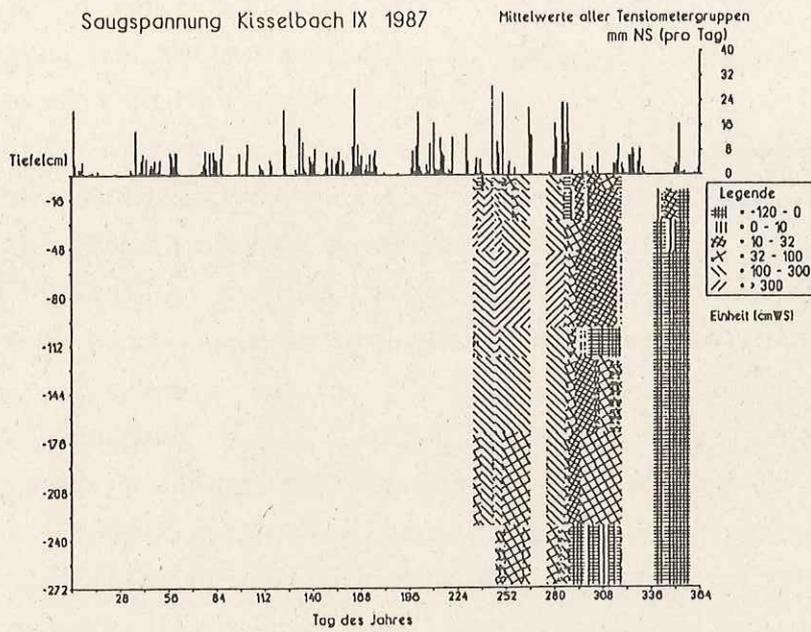


Abb. 6: Saugspannungsverlauf differenziert nach Saugspannungsklassen, Ki IX 1987

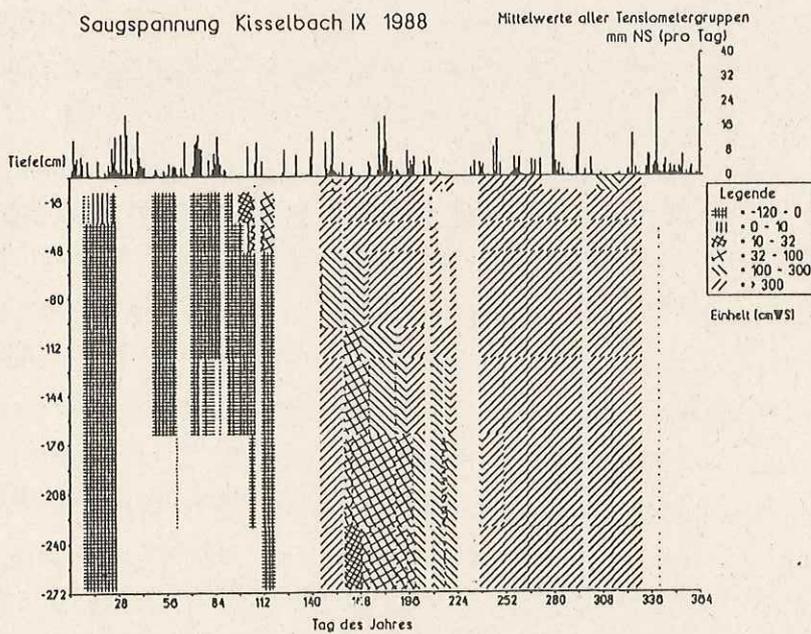


Abb. 7: Saugspannungsverlauf differenziert nach Saugspannungsklassen, Ki IX, 1988

Durch die Niederschläge ab Tag 280 (1987) sinken die Mittelwerte der Saugspannungen im gesamten Profil der Fläche Ki IX (vgl. Abb. 6) auf unter 100 cm Ws. Von Mitte November/Anfang Dezember 1987 bis Ende April 1988 ist der Standort ab 30 bis 50 cm Mineralbodentiefe gesättigt (vgl. Abb. 6 und 7). Von Ende Januar bis Ende März 1988 ist auch der Oberboden überstaut. Die Überstauung dauert damit ca. 150 bis 160 Tage an.

Ab Tag 107 bis Tag 110 steigen die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur bei der Wetterstation Deuselbach auf über 10° C an. In diesem Zeitraum setzt auf diesem Standort auch der Wasserentzug durch die Vegetation ein. Im Profil können während der Austrocknungsphase zwei Bereiche mit unterschiedlichen Saugspannungsverläufen unterteilt werden. Im oberen Bereich bis zur Meßtiefe 40 cm steigt die Saugspannung mit Beginn der Vegetationsperiode sehr schnell an. In diesem Bereich bewirken die Niederschläge Einbrüche in den Saugspannungsverläufen.

In dem Profilbereich ab Meßtiefe 80 cm ist der Anstieg der Saugspannung mit zunehmender Profiltiefe zeitverzögert. Die Reaktion auf Niederschläge ist gegenüber dem oberen Profilbereich stark gedämpft.

4 DISKUSSION

Die Dynamik des Bodenwasserhaushaltes wurde an zwei ausgewählten Waldökosystemen im Vorderen Hunsrück mit unterschiedlichen hydromorphen Merkmalen untersucht. Der Verlauf des Matrixpotentials zeigt, daß die hydromorphologischen Profilmerkmale den derzeitigen Wasserhaushalt repräsentieren. Durch die zeitlich hochaufgelösten Messungen des Matrixpotentials ist es möglich, die unterschiedlichen bodenphysikalischen Profilstrukturen der untersuchten Standorte zu differenzieren.

4.1 Bodenphysikalische Eigenschaften der Untersuchungsstandorte

Der Wasserhaushalt der Standorte ist geprägt von Naß- und Trockenphasen. Die Höhe und zeitliche Verteilung der herbstlichen Niederschläge in Zusammenhang mit dem entstandenen Wasserdefizit des gesamten Profils bestimmen den Zeitpunkt, an dem die Trockenphase beendet ist.

Gesättigte Bedingungen im Boden entstehen, wenn in einem Profilbereich der Wasserzufluß größer als der Wasserabfluß ist. Die Ursache hierfür kann in unterschiedlichen Leitfähigkeiten von verschiedenen Profilhorizonten liegen. Diese können durch die Überlagerung verschiedener Fließerden und/oder durch vertikale Stoffverlagerungen entstanden sein (BECHER u. HARTGE 1973).

Der Prozeß der Lessivierung führt zu einer Ausfüllung besonders der Grobporen (Einlagerungsverdichtung) durch ein feinporigeres Material (Ton). Die Korngrößenverteilungen der Profile Kisselbach weisen auf eine solche Tonverlagerung hin.

Die Leitfähigkeit kann aber auch durch eine Abnahme der Grobporen zugunsten der Feinporen bei gleicher Bodenart verringert werden. Eine Umverteilung der Porenklassenanteile von Mittel- zu Feinporen bei gleichbleibendem Gesamtporenvolumen kann durch die Veränderung des Redoxpotentials in Abhängigkeit von der Dauer der Wassersättigung durch die Lösung von stabilisierenden Sesqui-Oxiden (Fe- und Al-Oxide) erfolgen. Die Fe-Oxide werden dann fein verteilt in den Rostsektionen wieder ausgefällt. Die höheren Gehalte an organischen Substanzen (Huminsäuren) im Sickerwasser nach dem Passieren der Humusaufgabe können zu einer weitgehenden Eisenauswaschung aus dem Oberboden und damit zu einer Bleichung wie in Ki IX führen.

Wird durch mangelnde Bioturbation oder Wurzelwachstum ein Horizont nicht wieder "aufgebrochen", so kann der Umverteilungsprozeß während regenreicher Perioden immer weiter fortschreiten. Dieser Prozeß kann beispielsweise durch Kahlschläge initiiert werden, da dann das Wasserangebot durch den Wegfall der Interzeption und Transpiration deutlich ansteigt. Weiterhin bewirkt die Befahrung vor allem feuchter Böden eine gleichmäßige Einregulierung der Partikel, die mit einer Zunahme der Feinporen auf Kosten der Grobporen einhergeht (HARTGE u. HORN 1990).

Die Ergebnisse der Saugspannungsmessungen weisen darauf hin, daß die primär stauende Schicht im tieferen Untergrund der Flächen liegt (deshalb vermutlich geogen bedingt ist), da die Profile sich mit Ausnahme von Einzelereignissen in der Regel von unten nach oben aufsättigen.

4.2 Bodenphysikalische Prozesse

Die aus der Darcy-Gleichung abgeleiteten Hypothesen zum konvektiven Massenfluß können mit Ausnahme der im Oktober 1987 auf Fläche Ki IX beobachteten Saugspannungsverteilung bestätigt werden, soweit dies durch die Interpretation der Potentialverläufe in Verbindung mit den bodenphysikalischen Zustandsparametern möglich ist.

Bei dem Ereignis im Oktober 1987 weisen die Tensiometer im Unterboden nahezu zeitgleich mit den Tensiometern im Oberboden eine Potentialveränderung auf. Vorausgesetzt, daß die Druckveränderungen durch einen Massenfluß hervorgerufen werden, kann dieser vertikale Wassertransport nicht durch das Mittel- und Feinporengefüge des Profils erfolgt sein. Bestehen Sekundärporen, Wurzelkanäle oder ähnliches mit einer hinreichend hohen Kontinuität, so können, wenn oberflächennah zumindestens kurzfristig gesättigte Bedingungen herrschen, durch Grobporenfluß die beobachteten Phänomene ausgelöst werden (GERMANN u. BEVEN 1985).

Nehmen die Makroporen auch nur einen geringen Teil des Gesamtporenvolumens ein und findet der Fluß in ihnen nur kurzfristig statt, so ist ihre Transportkapazität um Potenzen größer als die des restlichen Bodenkörpers. Trotzdem ist der Anteil des Wassers, der am raschen Transport teilnimmt, relativ zum Gesamtwassergehalt des Bodens, sehr gering (GERMAN u. BEVEN, 1985).

Die Ergebnisse der Felduntersuchungen weisen darauf hin, daß die Bodenlösung auf der Fläche Ki IX hauptsächlich lateral (parallel zur Bodenoberfläche) durch den obersten Horizont abfließt (Diese Aussage wird durch die Simulationsergebnisse bestätigt). Da der Wasserfluß als Ionenträger fungiert, erfolgt der hauptsächlichliche Stofftransport durch den obersten Horizont. Damit werden auch alle ins System infiltrierende Schadstoffe und die internen "Umsetzungsprodukte" (wie z.B. Versauerungsreaktionen, Wurzelexudate und Absterbeprodukte) durch diesen Profilbereich geleitet.

4.3 Forstliche Relevanz der Untersuchungsergebnisse

Die Wasserspeicherkapazität insbesondere auf Standort Ki IX ist im Oberboden begrenzt. Aus diesem Grund sind die Bäume während der Vegetationsperiode auf eine Wassernachführung durch kapillaren Aufstieg aus dem Untergrund oder auf eine Wasseraufnahme durch Wurzeln in oder unterhalb der Dichtschicht angewiesen.

Einer weiteren Verschlechterung der bodenphysikalischen Standortseigenschaften durch:

- Abnahme des Gesamtporenvolumens
- Verringerung des Groß- und Mittelporenanteils
- Rückgang der Durchwurzelungstiefe
- Abnahme der Aggregatstabilität

kann durch Faktoren bewirkt werden, die zu einem größerem Wasserinput und/oder einer deutlichen Abnahme des Wasserentzuges aus dem Boden führen. Dieses kann durch die Entfernung der Bestände (Kahlschlag, Windwurf) und die damit einhergehende Abnahme der Transpiration und Interzeption eintreten (MEGAHAN 1983).

Die nachfolgende Bodenerwärmung bewirkt eine erhöhte Zersetzungsrate in der Streuauflage und im Oberboden. Die hieraus resultierenden chemischen Milieuveränderungen (ULRICH 1985) können sich ebenfalls negativ auf die Bodenstabilität auswirken. Bei dynamischen Belastungen des Bodens besonders im gesättigten Zustand, die durch Befahrungen verursacht werden, ist mit einer Homogenisierung und Verdichtung des Bodens zu rechnen. Diese Strukturveränderungen sind irreversibel.

Die genannten Gefährdungen können innerhalb des Profils zur Ausprägung einer oberflächennahen Stauschicht führen. Durch diesen Prozeß kann die Stauschicht im Bereich bis 1 m Profiltiefe auf dem Standort Ki IX entstanden sein. Auf dem Standort Ki III besteht die Gefahr, daß eine ähnliche Dichtschicht ausgebildet wird. Deshalb sollte die Befahrung auf möglichst minimale Flächenanteile (Rückegassen) und unter allen Umständen auf die "Trockenphasen" beschränkt werden.

Vorrangiges Ziel von **bodenverbessernden Maßnahmen** muß die "biologische Belebung" des Profils sein. Diese umfaßt die Bodendurchwurzelung und die Aktivität von Bodenmikroorganismen und Bodenwühlern.

Um dies zu erreichen ist es notwendig, das bodenchemische und physikalische Milieu so zu verändern, daß für die Wurzeln und Organismen geeignete Lebensbedingungen geschaffen werden.

Ziel der weiteren Flächenbehandlung sollte die möglichst kontinuierliche Bestockung mit einer Baumartenzusammensetzung sein, die dazu in der Lage ist, die Profile wieder tiefer zu durchwurzeln, um die "biologisch Dränung" aufrecht zu erhalten.

Als unterstützende Maßnahme sollte nach Möglichkeiten für eine tiefgründige Einbringung von Kalk in Abhängigkeit vom chemischen Bodenzustand gesucht werden.

5 LITERATUR

BECHER, H.H. u. HARTGE, K.H. (1973): Der Einfluß von Wassersättigung und Wasserdruckgradient auf den Transport von Feinmaterial im Boden. Schlichting, E. u. Schwertmann, U. (Hrsg.): Transaction of Commissions V and VI of the Int. Soc. Soil Sci. Pseudogley & Gley: Genesis and Use of Hydromorphic Soils. Weinheim/Bergstraße: Verlag Chemie, S. 435-441

- DOBOS, R.R., CIOLKOS, E.J., WALTMAN, W.J. (1990):** The effect of organic carbon, temperature, time and redox conditions on soil color. *Soil Sci.* 150, S. 506-512
- GERMAN, P.F. u. BEVEN, K. (1985):** Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores. *Water Resources Research*, Vol. 21, NO. 7, S. 990-996
- HARTGE, K.H. (1978):** Einführung in die Bodenphysik. Enke Verlag, Stuttgart.
- HARTGE, K.H. u. HORN, R. (1990):** Mechanische Eigenschaften von Bodenprofilen und Bodenstrukturen Methoden und Konzepte der Bodenphysik, Bericht des Weiterbildungsseminars der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft in Kandersteg vom 4.-7. April 1989. Zürich
- HAUHS, M. (1991):** Der Wasser- und Stoffhaushalt von Waldökosystemen aus informationstheoretischer Sicht. Habilitationsschrift Univ. Gött.
- MEGAHAN, W.F. (1983):** Hydrological effects of clearcutting and wildfire on steep granitic slopes in Idaho. *Water Resour. Research*, Vol. 19, NO. 3, S. 811-819
- SCHMIDT, J.P. (1990):** Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden über den Einfluß von Standort und Immission auf die Entstehung von Sturmschäden in den Forstämtern des Vorderhunsrücks - SIMS", Teilbericht "Standörtliche Ausprägung und Verbreitung hydromorphologischer Bodenmerkmale und ihre Bedeutung für den Wasserhaushalt", unveröffentlicht.
- SCHMIDT, J.P. (1991):** Feldmeßsysteme zur Erfassung bodenphysikalischer und meteorologischer Parameter. Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben der Univ. Göttingen. Reihe B, Band 24, S. 173-184
- ULRICH, B. (1985):** Stoffhaushalt von Waldökosystemen, Bioelementhaushalt. Vorlesungsskript, Institut für Bodenk. u. Waldernährung der Univ. Göttingen.

Immissionsbelastung der SIMS-Standorte

N. Rastin

1 EINLEITUNG

Die Belastung der Waldökosysteme durch anthropogene Luftverunreinigungen hat bereits große Teile der Wälder Mitteleuropas geschädigt. Zur Abschätzung der Gefährdung des Waldwachstums als Folge der Deposition von Luftverunreinigungen ist die Kenntnis der gegenwärtigen Depositionsraten neben den Konzentrationen von Schadgasen (SO_2 , NO_x , Ozon) in der Luft unerlässlich. Im folgenden werden die Eintragsraten als Belastungsmaß für die indirekten Wirkungen der Deposition von Luftverunreinigungen in 3 verschiedenen Waldökosystemen mit unterschiedlichen Standortverhältnissen erfaßt.

2 MATERIALIEN UND METHODEN

2.1 Allgemeines über die Untersuchungsflächen

Bei den drei untersuchten Flächen handelt es sich um etwa 80-jährige Fichtenbestände (*Picea abies* (L.) Karst.) auf schluffigem Lehm mit ähnlichem geologischen Ausgangssubstrat (devonische Tonschiefer, überlagert von unterschiedlich mächtigen und heterogen strukturierten Deckschichten), aber unterschiedlichen Trockenraumdichten und bodenhydrologischen Verhältnissen. Eine der untersuchten Flächen ist ein Pseudogley (Grundform IX) mit periodischem Stauwasser bis zu 10 cm unter Mineralbodenoberfläche. Bei der zweiten Fläche handelt es sich um einen Braunerde-Pseudogley (Grundform VIII) mit periodischem Stauwasser bis zu 30 cm unter Mineralbodenoberfläche, und die dritte Fläche ist eine Braunerde ohne Stauwasserbeeinflussung (Grundform III).

Die Grundformen III und IX liegen im Wuchsbezirk Östliche Hunsrück-Hochfläche 2, im Forstamt Simmern, Forstrevier Kisselbach, Laudarter Seite (nachfolgend Meßort Laudert genannt), in einer Höhe von 440-455 m über NN (submontan). Die Grundform IX befindet sich in Abteilung 10, Grundform III, in Abteilung 21a.

Grundform VIII befindet sich im Wuchsbezirk Östliche Hunsrück-Hochfläche 5322, im Forstamt Kastellaun, Revierförsterei Laubach (Abteilung 22b), (nachfolgend Meßort Laubach genannt) in einer Höhe von 465-470 über NN.

2.2 Messung der Depositionsraten

Zum Auffangen des Niederschlagswassers unter dem Kronendach wurden in den o.g. Beständen je Bestand 3 Reihen mit je 6 LÖLF-Sammlern aufgestellt.

Zur Messung der Niederschlagsdeposition (Freilandmeßstellen) wurden an zwei Stellen - eine in Laudert in der Nähe von Fläche III und IX und eine in Laubach, in der Nähe von Fläche VIII - je 3 Niederschlagssammler (LÖLF-Sammler) aufgestellt.

Auf die Bestimmung des Stammabflusses wurde verzichtet, da bei der Fichte weniger als 1 % der Bestandesniederschläge in Form von Stammabfluß den Boden erreichen (ULRICH und MATZNER 1983). In allen drei Flächen wurde daher die Kronentraufe als Bestandesniederschlag genommen.

2.3 Analyseverfahren

Bei den Freilandniederschlägen (FN) wurden die wöchentlich gesammelten Proben zu monatlichen Mischproben vereinigt.

Bei der Kronentraufe wurden zuerst die gewonnenen Lösungen von einzelnen LÖLF-Sammlern (bzw. Schnee-Eimern im Winter) zu 3 Wiederholungen je Bestand vereinigt und danach die wöchentlich gesammelten Proben zu monatlichen Proben vereinigt. Die Lagerung aller Proben erfolgte tiefgefroren oder bei 4°C.

In den gewonnenen Lösungen wurden pH-Werte und folgende Ionen gemessen: Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, SO₄, PO₄, NH₄, NO₃ und Cl.

Die Analyseverfahren sind bei MEIWES et al. (1984) beschrieben.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 pH-Werte in den Niederschlägen und im Kronendurchlaß

Die pH-Werte im Freilandniederschlag und Kronendurchlaß sowie die Elementkonzentration in den Niederschlägen zeigten während der Meßperiode (Mai 1987 bis April 1989) eine geringe räumliche Variabilität innerhalb der einzelnen Flächen. Die zeitliche Variabilität der pH-Werte und Elementkonzentration in Freilandniederschlägen und Kronentraufe war jedoch verhältnismäßig groß. Dabei waren die pH-Schwankungen von Mai 87 bis Mai 89 verhältnismäßig gering (die Daten sind bei RASTIN und ULRICH, 1990 dokumentiert).

Im Kronendurchlaß liegen die pH-Werte im Mittel unter 4.2 (Tab. 1) und damit in allen drei untersuchten Beständen sehr niedrig. Bedenkt man, daß beim Abtrocknen auf der Pflanzenoberfläche die pH-Werte noch abnehmen (FREVERT und KLEMM 1984), so ist bei ständigem Vorliegen einer solchen Belastung in allen drei Flächen eine direkte Nadelschädigung durch saure Deposition zu erwarten.

Tab. 1: Vergleich der mittleren sowie Maximum- und Minimum-pH-Werte in den Freilandniederschlägen (FN) und der Kronentraufe (BN) im Hunsrück (1987-89) und Solling (1969-82)

	Flüsse	\bar{x}	von	bis
Laudert III und IX	FN	4.9	3.86	6.30
Laubach VIII	FN	4.7	4.05	5.64
Laudert III	BN	4.05	3.88	5.54
Laudert IX	BN	4.1	3.39	5.94
Laubach VIII	BN	3.90	3.33	5.76
Solling F1	FN	4.12	3.35	5.90
	BN	3.45	2.75	4.83

Die niedrigsten pH-Werte wurden in der Kronentraufe aller drei Flächen während der Wintermonate gemessen und waren gekoppelt mit maximalen Konzentrationen von H, Ca, Mg, Mn, Al und SO_4 . Dies entspricht den Ergebnissen aus dem Solling und geht vermutlich zu einem großen Teil auf die Interception stark saurer Nebel- bzw. Wolken-tröpfchen in diesem Zeitraum zurück. Bei der hohen Konzentration von fast allen Elementen, gekoppelt mit extrem niedrigen pH-Werten in den Kronentraufen der untersuchten Fichtenbestände, ist sicherlich eine Auswaschung aus den Nadeln beteiligt. Diese betrifft einerseits Nährstoffe wie Mg und Ca und zeigt somit Zusammenhänge zu

den Magnesiummangelerscheinungen auf, wie sie von ZECH und POPP (1983) sowie BOSCH et al. (1983) beschrieben werden. Sie weisen zum anderen höhere Mn- (und Al-) Konzentrationen auf. In einer Phase extrem niedriger pH-Werte treten also hohe Konzentrationen toxischer Kationen und Auswaschung aus der Nadel kombiniert auf.

Auch die pH-Werte in den Freilandniederschlägen waren sehr niedrig (Tab. 1). Sie lagen im Jahre 87/88 im Mittel bei 4.16 (Laudert) bzw. 4.25 (Laubach). Im Jahre 88/89 waren die pH-Werte wesentlich höher, die Niederschlagsmenge jedoch erheblich niedriger als 87/88. Die pH-Werte in den Freilandniederschlägen waren in allen Terminen höher als im Kronendurchlaß. Eine pH-Erniedrigung in den Bestandesniederschlägen relativ zu den Freilandniederschlägen weist auf eine Säurezufuhr hin. Diese pH-Erniedrigung kann durch Interception von SO_2 an feuchten Oberflächen und von sauren Aerosolen, besonders Nebel und Wolkentröpfchen, erklärt werden (ULRICH et al. 1979).

Vergleicht man die mittleren pH-Werte in den Freiland- und Bestandesniederschlägen mit den mittleren pH-Werten im Solling (Tab. 1), so zeigen die untersuchten Flächen im Hunsrück sowohl in den Freilandniederschlägen als auch im Bestandesniederschlag etwas höhere mittlere pH-Werte als die langjährigen Mittel im Solling. Dabei ist zu berücksichtigen, daß das Meßjahr 1988/89 extrem warm/trocken war. In warm/trockenen Jahren wurden auch im Solling stets relativ hohe pH-Werte gemessen. Auffällig bei den untersuchten Flächen im Hunsrück war der verhältnismäßig geringe Unterschied zwischen Maximum- und Minimum-pH-Werten in Bestandesniederschlägen, (3.5 - 3.9) während der 1. Meßperiode (Mai 87 - April 88).

3.2 Raten der Deposition

Transportraten mit den Freilandniederschlägen

Der jährliche Elementtransport mit den Niederschlägen und die Niederschlagshöhe waren während der Meßperiode Mai 87 bis April 88 in Laubach und Laudert ähnlich (Tab. 2). Während der Meßperiode Mai 88 bis April 89 waren die Niederschlagsmenge sowie der H- und SO_4 -Transport mit den Niederschlägen in Laubach etwas höher, der Ca-Transport niedriger als in Laudert. In beiden Flächen waren die Elementtransporte mit den Niederschlägen 1988/89 niedriger als in 1987/88. Große Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungsperioden wurden vor allem bei den H-Ionen festge-

stellt. Diese sind höchstwahrscheinlich durch extrem niedrige Niederschlagsmengen in 1988/89 und Staubeinträge in die Sammelgefäße während der langen Trockenperioden bedingt.

Tab. 2: Raten der Niederschlagsdeposition ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, $\bar{x} \pm \text{s}\bar{x}$) auf den Freiflächen der Hunsrückstandorte sowie zweier Vergleichsstandorte in Deutschland

Fläche	H ₂ O	H	Na	K	NH ₄ -N	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	SO ₄ -S	P	Cl	NO ₃ -N
Laudert														
III u. IX 87/88	911.5	.66	5.3	2.1	5.5	2.5	.71	.09	.16	.09	9.3	.18	8.9	5.4
	7.6	.02	.39	.10	.16	.11	.03	.00	.03	.00	.17	.02	.26	.07
88/89	441.0	.15	2.9	1.5	4.5	4.8	.75	.11	.10	.07	5.7	.24	5.0	3.8
	1.0	.01	.07	.07	.20	.12	.02	.01	.01	.02	.25	.03	.05	.07
Laubach														
VIII 87/88	928.8	.57	3.8	2.9	5.8	2.4	.82	.09	.16	.09	8.6	.25	7.1	5.0
	1.7	.02	.09	.15	.23	.25	.18	.00	.02	.00	.22	.06	.19	.10
88/89	617.0	.23	3.2	1.7	4.6	2.5	.60	.10	.15	.13	7.2	.20	5.8	4.4
	1.3	.00	.02	.03	.09	.02	.00	.00	.00	.03	.05	.02	.22	.03
Solling¹⁾ Fl														
	1017	.79	7.9	3.7	11.6	10.0	1.8	0.8	0.4	1.1	23.4	0.4	16.8	8.4
Harz²⁾														
	1327	.72	8.1	3.4	13.2	6.1	1.5	-	-	-	22.0	-	15.9	8.9

1) Matzner et al. 1984 (\bar{x} 1969-1983)

2) Hauhs 1989 (\bar{x} 1981-1985)

Ein Vergleich der 1987 - 1989 gemessenen Elementtransporte mit den Niederschlägen im Hunsrück mit dem langjährigen Mittel der stark belasteten Flächen im Solling und Harz (Tab. 2) zeigt im Hunsrück in 87/88 fast ähnliche Protonen (H⁺-Ionen)-Belastung wie in den o.g. Gebieten. Der Eintrag von allen anderen Elementen liegt jedoch im Hunsrück wesentlich niedriger (meist 1.4 - 4-fach) als in den o.g. Gebieten. In 88/89 waren die Eintragsraten fast aller Elemente erheblich niedriger als im Solling und Harz.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß bei verhältnismäßig hoher Protonenbelastung die Transportraten aller untersuchten Elemente mit den Niederschlägen sehr niedrig waren. Die atmosphärische Stoffzufuhr mit den Niederschlägen, welche in stark versauerten Böden einen Teil des Nährstoffbedarfs der Pflanzen decken kann, ist also in den untersuchten Flächen niedrig, der Säureeintrag verhältnismäßig hoch.

Transportraten mit den Bestandesniederschlägen

Die Unterschiede im Elementtransport mit den Bestandesniederschlägen zwischen den untersuchten Flächen sind verhältnismäßig gering (Maximum $3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, Tab. 3). Fläche VIII zeigt bei H, Mn und SO_4 -S etwas höhere Raten und ist damit mehr durch Säure belastet als die anderen beiden Flächen. Die Flußraten von Fe und Al (Ausnahme Fläche III) mit den Niederschlägen spielen eine untergeordnete Rolle. Die Gehalte dieser Elemente liegen sowohl in den Freilandniederschlägen als auch in der Kronentraufe sehr niedrig, meist im Bereich der Nachweisgrenze.

Ein Vergleich der im Hunsrück gemessenen Depositionsraten mit den Bestandesniederschlägen zu den stark belasteten Fichtenbeständen im Solling und Harz (Tab. 3) zeigt 1987/88 im Hunsrück eine ähnliche Protonenbelastung wie im Harz und zweimal geringere Belastung als im Solling. Unabhängig von der Protoneneintragsrate (H-Ionen) liegen hier auch, wie bei der Niederschlagsdeposition, die Depositionsraten von SO_4 -S sowie von allen anderen Elementen in den o.g. Fichtenbeständen wesentlich höher als in den untersuchten Beständen im Hunsrück. 1988/89 war ein extrem trockenes Jahr mit extrem niedriger Niederschlagsmenge und geringer Transportrate bei allen untersuchten Elementen. Berücksichtigt man bei dem Vergleich der untersuchten Flächen mit den Flächen im Solling und Harz nur das Meßjahr 1987/88, so sind die Eintragsraten mit den Niederschlägen im Hunsrück am ehesten mit dem Elementtransport in der Kronentraufe des Fichtenbestandes im Harz vergleichbar, wobei die Eintragsraten von SO_4 -S, Ca und K mit den Bestandesniederschlägen im Harz aber noch etwas höher liegen als in den untersuchten Flächen im Hunsrück. Auffällig bei den untersuchten Flächen im Hunsrück ist die sehr hohe Eintragsrate von Mn mit den Bestandesniederschlägen in allen drei Flächen, welche um $1.3 - 2.1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ höher als das langjährige Mittel im Solling liegt und auf eine aktuelle Bodenversauerung und Mn-Mobilisierung in den untersuchten Beständen im Hunsrück hinweist, was durch Untersuchungsergebnisse des Bodenwassers (RASTIN und ULRICH 1990) auch bestätigt wird.

Tab. 3: Jährliche Elementflüsse ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, $\bar{x} \pm \text{s}\bar{x}$) mit den Bestandesniederschlägen in den 3 untersuchten Fichtenbeständen sowie in einigen Fichtenbeständen in Deutschland

Flüsse Fläche	H ₂ O	H	Na	K	NH ₄ -N	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	SO ₄ -S	P	Cl	NO ₃ -N
Laudert														
III 87/88	481.1 5.2	1.3 .03	8.7 .37	18.6 .46	8.2 .33	13.6 .53	3.2 .11	.46 .02	6.8 .39	1.2 .12	33.5 .85	.20 .02	21.3 .66	11.4 .36
88/89	275.1 3.0	.42 .02	6.2 .11	14.7 1.1	7.2 .20	12.4 .91	2.5 .09	.26 .02	5.9 .54	.40 .05	19.7 .57	.16 .04	16.2 .75	8.9 .21
Laudert														
IX 87/88	522.5 5.6	1.3 .03	6.3 .11	20.4 .36	7.9 .24	10.2 .22	2.6 .06	.25 .02	6.7 .17	.41 .09	31.6 .69	.19 .01	18.6 .21	9.5 .21
88/89	287.6 3.3	.44 .03	4.6 .20	13.3 .50	7.6 .43	9.0 .75	2.2 .12	.21 .01	4.8 .24	.60 .09	19.2 1.1	.12 .00	13.6 .74	8.1 .33
Laubach														
VIII 87/88	547.2 5.9	1.5 .02	7.1 .13	20.1 .27	8.1 .13	10.8 .27	2.7 .05	.34 .02	7.6 .16	.55 .09	34.8 .58	.16 .01	20.4 .27	10.7 .11
88/89	341.6 5.4	.63 .01	5.7 .14	14.6 .44	7.3 .20	9.1 .20	2.1 .06	.34 .02	6.2 .29	.70 .09	22.5 .58	.19 .01	15.2 .65	9.3 .16
Solling ¹⁾ F1	747	3.1	17.4	28.6	15.4	32.5	4.9	2.1	5.5	3.0	85.2	0.5	39.4	15.6
Harz ²⁾	1172	1.3	10.4	24.3	9.3	16.0	2.9	-	-	-	45.4	-	23.6	10.

1) Matzner et al., 1984 (\bar{x} 1969-83)

2) Hauhs, 1989 (\bar{x} 1981-85)

Kronendachdifferenz (KDD)

Der Weg der deponierten Säureäquivalente im Ökosystem beginnt mit dem Transport durch den Kronenraum der Bestände. Hier wird ein Teil der Säurebelastung durch Kationenumtausch im Blatt abgepuffert. Dies gilt insbesondere für die Protonen, die nach trockener Deposition von SO₂ in den Stomata als Folge der Bildung von H₂SO₃ (nach Oxidation H₂SO₄) entstehen. Sie tauschen die an den sauren Gruppen der Zellwand gebundenen Ca- und Mg-Ionen aus, die zusammen mit dem SO₄²⁻ aus dem Blatt ausgewaschen werden.

Als Kronendachdifferenz (KDD) wird die Differenz zwischen der Niederschlagsdeposition auf Freiflächen und der Bestandesdeposition bezeichnet. Alle Elemente zeigen in den untersuchten Flächen im Hunsrück eine sehr hohe Zunahme der Raten des Transports in der Kronentraufe, welche meist um das 2 - 9-fache höher liegen als in der Niederschlagsdeposition (Tab. 4).

Ein Vergleich der KDD zwischen den drei untersuchten Fichtenbeständen im Hunsrück zeigt bei Fläche IX etwas geringere Raten von Na, Ca, Cl und NO₃-N (sowie Al und SO₄-S in 1987/88) als in dem benachbarten Fichtenbestand auf Fläche III. Fläche VIII zeigt die höchsten H-, SO₄-S- und Mn-Raten in der KDD, was auf stärkere Säurebelastung dieses Standorts im Vergleich zu Fläche III und IX hinweist (Tab. 4).

Tab. 4 : Kronendachdifferenz (BN-FN) für Waldbestände in Laubach, Kisselbach und Laudert sowie für andere Fichtenbestände im Norddeutschen Raum (Werte in kg·ha⁻¹·a⁻¹, $\bar{x} \pm s\bar{x}$)

Flüsse Fläche	H ₂ O	H	Na	K	NH ₄ -N	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	SO ₄ -S	Cl	NO ₃ -N
Laudert													
III 87/88	-427.4	.65	3.3	16.5	2.7	11.1	2.5	.37	6.6	1.1	24.2	12.5	6.1
	9.2	.04	.54	.48	.37	.54	.12	.02	.39	.12	.86	.71	.36
88/89	-165.9	.26	3.4	13.2	2.7	7.6	1.7	.16	5.8	.34	13.9	11.2	5.1
	3.2	.02	.13	1.1	.28	.92	.09	.02	.54	.05	.62	.75	.22
Laudert													
IX 87/88	-389.0	.64	1.0	18.3	2.4	7.8	1.9	.15	6.6	.32	22.3	9.7	4.2
	9.5	.04	.41	.38	.29	.25	.06	.02	.17	.08	.70	.33	.23
88/89	-153.4	.29	1.7	11.7	3.1	4.2	1.5	.10	4.7	.53	13.5	8.6	4.3
	3.4	.03	.21	.50	.47	.75	.12	.02	.24	.09	1.2	.75	.34
Laubach													
VIII 87/88	-381.6	.95	3.2	17.1	2.2	8.4	1.9	.24	7.5	.45	26.2	13.3	5.7
	6.2	.03	.16	.31	.27	.37	.19	.02	.16	.09	.62	.33	.15
88/89	-275.4	.41	2.6	12.9	2.7	6.6	1.5	.24	6.0	.56	15.3	9.4	4.9
	5.5	.01	.14	.44	.22	.20	.06	.02	.29	.09	.58	.69	.16
Solling ¹⁾ Fl													
	-270.0	2.3	9.5	24.9	3.8	22.5	3.1	1.3	5.1	.29	61.8	22.6	7.2
Harz ²⁾													
	-155.0	.58	2.3	20.9	-3.9	11.9	1.4				23.4	7.7	1.1

1) Matzner et al., 1984 (\bar{x} 1969-83)

2) Hauhs, 1989 (\bar{x} 1981-85)

Berücksichtigt man nicht die extrem warm/trockene Meßperiode 1988/89 und vergleicht die ermittelten Raten der KDD mit denen der Standorte im Solling und Harz, so kommt die starke Belastung der Fichtenbestände im Hunsrück deutlicher zum Ausdruck: Zwar liegen in der KDD die Raten von H, Na, K, Ca, SO_4 -S und Cl in den untersuchten Beständen im Hunsrück niedriger als im Solling; die Unterschiede sind jedoch geringer als es bei dem Vergleich der Flußraten mit Bestandes- und Freilandniederschlägen der Fall war (Vergleich Tab. 2, 3 und 4). Bei den N-Formen (NH_4 -N und NO_3 -N) sowie bei Mn sind die Flußraten in der KDD im Hunsrück, besonders in Fläche III, dem stark belasteten Standort im Solling sehr ähnlich.

Die im Vergleich mit dem Fichtenbestand im Harz wesentlich niedrigeren Raten von SO_4 -S, Ca und K mit Bestandesniederschlägen in den untersuchten Beständen im Hunsrück sind beim Vergleich der KDD nicht vorhanden. In der KDD zeigen die Bestände im Hunsrück sehr ähnliche Flußraten wie der Fichtenbestand im Harz. Die Eintragsraten von N-Formen (NH_4 -N und NO_3 -N) liegen in den Beständen im Hunsrück sogar höher als im Harz.

Berechnet man das Verhältnis der Transportraten mit den Bestandesniederschlägen zu denen der Niederschlagsdeposition als ein relatives Maß für die Zunahme der Elementtransporte in der Kronentraufe und vergleicht die ermittelten Werte mit denen von Solling und Harz, so ist die Zunahme der Raten des Stofftransports in der Kronentraufe in den untersuchten Beständen im Hunsrück bei allen Elementen sehr ähnlich wie im Solling. Sie liegt wesentlich höher als im Harz (Tab. 5). Die starke Zunahme des Elementtransports in der Kronentraufe ist ein Hinweis auf die extrem hohe Interceptionsdeposition, Blattauswaschung und die sehr geringe Fähigkeit der untersuchten Waldbestände, die zugeführte Säure mit den Niederschlägen abzupuffern.

Die Abpufferung der Säure (H^+ -Ionen) im Kronenraum erfolgt durch Austausch von Ca (Mg, K, Mn) aus der Zelle oder den Zellwänden und durch Aufnahme einer äquivalenten Menge von Basen aus dem Boden (ULRICH 1983). Bei der Aufnahme von Basen aus dem Boden wird eine der H^+ -Abpufferung im Kronenraum äquivalente Menge an Protonen im Boden hinterlassen, so daß die Abpufferung im Kronenraum keinen Beitrag zur Entlastung der Puffersysteme des Bodens zur Folge hat, sondern der Boden in jedem Fall die gesamte Säurelast trägt.

Mit steigender Säurebelastung findet eine erhöhte Auswaschung von Ca, Mg, K und Mn im Kronenraum statt (HORNTVEDT 1980). Eine erhöhte Kationenauswaschung bei H^+ -Belastung des Blattes kann zu Nährstoffmangelerscheinungen beitragen (ZECH und POPP 1983; ZÖTTEL und MIES 1983). Dies dürfte besonders dann der Fall sein,

wenn die Kationenaufnahme und damit die Nachlieferung der ausgewaschenen Elemente durch das Auftreten von Al-Ionen in der Bodenlösung gehemmt ist (ROST-SIEBERT 1983; HÜTTERMANN 1983).

Tab. 5: Verhältnis von Elementtransport mit den Bestandesniederschlägen zu dem in den Freilandniederschlägen in den untersuchten Fichtenbeständen im Hunsrück sowie im Solling und Harz

Fläche	H	Na	K	NH ₄ -N	Ca	Mg	Mn	SO ₄ -S	Cl	NO ₃ -N
Laudert III	2.0	1.6	8.9	1.5	5.4	4.5	42.5	3.6	2.4	2.1
Laudert IX	2.0	6.3	9.7	1.4	4.1	3.7	41.9	3.4	2.1	1.8
Laubach VIII	2.6	1.9	6.9	1.4	4.5	3.3	47.5	4.0	2.9	2.1
Solling F1	3.9	2.2	7.7	1.3	3.3	2.7	13.7	3.5	2.3	1.9
Harz	1.8	1.3	7.1		3.0	1.9		2.1	1.5	1.1

1) Matzner et al., 1984 (\bar{x} 1969-83)

2) Hauhs, 1989 (\bar{x} 1981-85)

Dies scheint in den untersuchten Ökosystemen der Fall zu sein. Darauf weisen die Ergebnisse der KDD sowie der an den gleichen Standorten durchgeführten bodenchemischen Untersuchungen, die Elementgehalte in den Nadeln sowie die Untersuchungsergebnisse der röntgenenergie-dispersiven Elementanalyse in den Wurzelgeweben hin (siehe RASTIN und ULRICH 1990).

Beim Vergleich der Depositionsraten sowie der KDD der untersuchten Flächen im Hunsrück mit den stark belasteten Standorten im Solling und Harz müssen die unterschiedlichen Meßzeiträume berücksichtigt werden. Nach Untersuchungsergebnissen von BLOCK (1990) ist in Rheinland-Pfalz die Schwefeldeposition in den letzten 7 Jahren merklich zurückgegangen. Außerdem war die Meßperiode 1988/1989 warm/trocken. Mit Berücksichtigung der Tatsache, daß die Bestandesniederschlagsraten in warm/trockenen Jahren besonders bei H und SO₄ niedriger liegen, muß man im langjährigen Mittel mit einer wesentlich höheren Belastung der untersuchten Flächen im Hunsrück rechnen, als es 1988/1989 gemessen wurde.

Danksagung

Die Betreuung der Versuchsflächen sowie die Probenahme erfolgte durch Frau Keimer. Die Berechnung der Flüsse erfolgte durch Frau H. Mintenig. Für die ausgezeichnete Zusammenarbeit möchte ich mich an dieser Stelle bei ihnen herzlich bedanken.

4 LITERATUR

BLOCK, J. (1990): Ergebnisse der Stoffdepositionsmessungen in rheinland-pfälzischen Waldgebieten 1984 - 1989. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 14/90

BOSCH, C., E. PFANNKUCH, U. BAUM und K.E. REHFUESS (1983): Über die Erkrankung der Fichte in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. Forstw. Cbl. 102, S. 167-181

FREVERT, T. und O. KLEMM (1984): Wie ändern sich pH-Werte im Regen- und Nebelwasser beim Abtrocknen auf Pflanzenoberflächen? Arch. Met. Geoph. Bioclim., Ser. B 34, S. 75-81

HAUHS, M., K. ROST-SIEBERT and G. RABEN (1989): Summary of European data. In: The Role of Nitrogen in the Acidification of Soils and Surface Waters. (J.L. Malanchuk and J. Nilsson editors).

HÜTTERMANN, A. (1983): Auswirkungen saurer Deposition auf die Physiologie des Wurzelraums von Waldökosystemen. Allg. Forst Zeitung 38: 663-664

HORNTVEDT, R., G.H. DOLLARD, E. JORANGER (1980): Effects of acid precipitation on soil and forest, II. Atmospheric-vegetation interactions. In: Ecological Impact of Acid Precipitation, Drablos, D., Tollan, A. (eds.) SNSF-project Oslo-As, p. 192

MATZNER, E., P.K. KHANNA, K.J. MEIWES, E. CASSENS-SASSE, M. BREDEMEYER und B. ULRICH (1984): Ergebnisse der Flüßmessungen in Waldökosystemen. Ber. d. Forschungszentrum Waldökosysteme-Waldsterben, Göttingen, Bd. 2, S. 29-49

MEIWES, K.J., N. KÖNIG, P.K. KHANNA, J. PRENZEL und B. ULRICH (1984): Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldökosystemen. Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Bd. 7, S. 1-67

RASTIN, N. und ULRICH, B. (1990): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden über den Einfluß von Standort und Immission auf die Entstehung von Sturmschäden in den Forstämtern des Vorderhunsrücks - SIMS -". Forstl. Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz

ROST-SIEBERT, K. (1983): Aluminiumtoxizität und -Toleranz an Keimpflanzen von Fichte und Buche. Allg. Forst Zeitung 38: S. 686-689

ULRICH, B. (1983): Stabilität von Waldökosystemen unter dem Einfluß des "sauren Regens". Allg. Forst Zeitung 38: S. 670-677

ULRICH, B. und E. MATZNER (1983): Abiotische Folgewirkungen der weiträumigen Ausbreitung von Luftverunreinigungen. U.B.A. Bericht, Nr. 104 02 615

ULRICH, B., R. MAYER und P.K. KHANNA (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. Schriften Forstl. Fak. Univ. Göttingen, 58, Sauerländer Verlag.

ZECH, W. und E. POPP (1983): Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten- und Tannensterben in No-Bayern. Forstw. Cbl. 102, S. 50-55

ZÖTTL, H.W. und E. MIES (1983): Nährelementversorgung und Schadstoffbelastung von Fichtenökosystemen im Südschwarzwald unter Immissionseinfluß. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 38, 429-434

Die Zunahme von Sturmschäden in den Wäldern des Vorderen Hunsrück und ihre mögliche atmosphärische Ursache

G. Gravenhorst, J. Giesemann, H. Kreilein und
M. Raschendorfer

1 EINLEITUNG

Im Forstamt Kirchberg im "Vorderen Hunsrück" haben die Sturmschäden in den 80er-Jahren erheblich gegenüber den Vorjahren zugenommen; Baumbestände sind durch die Sturmschäden labilisiert oder aufgelöst worden, so daß auch das Potential für weitere Sturmschäden in diesen Beständen erhöht wurde. Die Sturmschadenssituation im Vorderen Hunsrück wird von HEUPEL und BLOCK (1991) ausführlich diskutiert. Die Zunahme der Sturmschäden anfangs der 80er Jahre könnte nach unserer Meinung im wesentlichen folgende Gründe haben:

1. Die meteorologischen Situationen, die für Sturmschäden verantwortlich sind, traten verstärkt und gehäuft auf.
2. Das Drehmoment, das durch den Wind und die Baumkronen auf den Wurzelbereich wirkt, kann nicht mehr durch das Rückhaltemoment der Bäume im Boden oder im Stamm kompensiert werden. Dies kann zwei Ursachen haben:
 - a) Die gefährdeten Bestände haben eine kritische Wuchshöhe überschritten, so daß das Drehmoment der Krone bei schlanken, langen Stämmen und später Durchforstung nicht durch die Bodenhaftung ausgeglichen werden kann.
 - b) Die Bodenhaftung des Wurzelwerks ist reduziert worden, da die Böden durchnäßt sind und/ oder sich die Wurzeln wegen Versauerung des Mineralbodens in den Oberboden zurückgezogen haben.

Im Folgenden soll nur der meteorologische Einfluß auf die Sturmschäden im Vorderen Hunsrück untersucht werden. Auf bodenkundliche und waldbauliche Einflußfaktoren wird in anderen Beiträgen dieses Heftes eingegangen.

Wie der Name schon sagt, sind Sturmschäden mit Stürmen, d.h. hohen Windgeschwindigkeiten, verbunden. Die hohen Windgeschwindigkeiten sind notwendig, aber nicht hinreichend, um Sturmschäden zu verursachen. Wenn erheblicher Schaden angerichtet wird, treffen die hohen Windgeschwindigkeiten auf Baumbestände, die von ihrem Aufbau und ihrer Beschaffenheit her windanfällig sind. Da in unmittelbarer Nähe der Schadensflächen im Vorderen Hunsrück keine Winddaten erhoben wurden, muß bei der Diskussion der Windverhältnisse an den Schadensflächen auf Daten von Stationen des Deutschen Wetterdienstes, die in einiger Entfernung zu den Schadensflächen liegen, zurückgegriffen werden.

Die meteorologischen Meßdaten kennzeichnen erst einmal nur den Ort, an dem sie gemessen wurden. Nur mit Vorsicht können sie auf andere Orte übertragen werden. Dies gilt auch für die Windverhältnisse, da sie sehr von lokalen Effekten beeinflußt sein können. Die absoluten Werte der Winddaten, die an den Wetterdienststellen gemessen wurden, repräsentieren daher nur sehr bedingt die Windverhältnisse an den Schadensflächen. Die relativen Änderungen der Windverhältnisse mit der Zeit an einem Ort können schon eher auf andere Orte übertragen werden, wenn keine lokalen Effekte die Messungen dominieren. Es ist daher durchaus sinnvoll, als Indiz für meteorologische Änderungen im Sturmschadensgebiet des Vorderen Hunsrück meteorologische Meßwerte von Wetterdienststellen in der Umgebung dieses Gebietes zu interpretieren.

2 WINDDATEN VON KLIMAHAUPTSTATIONEN

Bei der Diskussion, ob sich die meteorologischen Bedingungen in einem größeren Gebiet mit der Zeit geändert haben, muß gewährleistet sein, daß sich die unmittelbaren Beobachtungs- und Meßbedingungen an dem Standort nicht geändert haben. Die Datenreihen müssen also homogen sein, um als Indizien für Änderungen in anderen Gebieten hilfreich sein zu können. Schon hier beginnt ein ernstes Problem für die Situation im Vorderen Hunsrück. An den Hauptklimastationen Deuselbach, Simmern und Blankenrath in der Nähe des Vorderen Hunsrück (Abb. 1) werden die Windeigenschaften nicht gemessen, sondern aus subjektiven Beobachtungen abgeschätzt. Teilweise haben die Beobachter mit der Zeit gewechselt, teilweise sind die Stationen im Laufe der Zeit verlegt worden, so daß im gesamten Zeitraum, in dem die Winddaten erhoben wurden, keine konstanten Bedingungen herrschten.

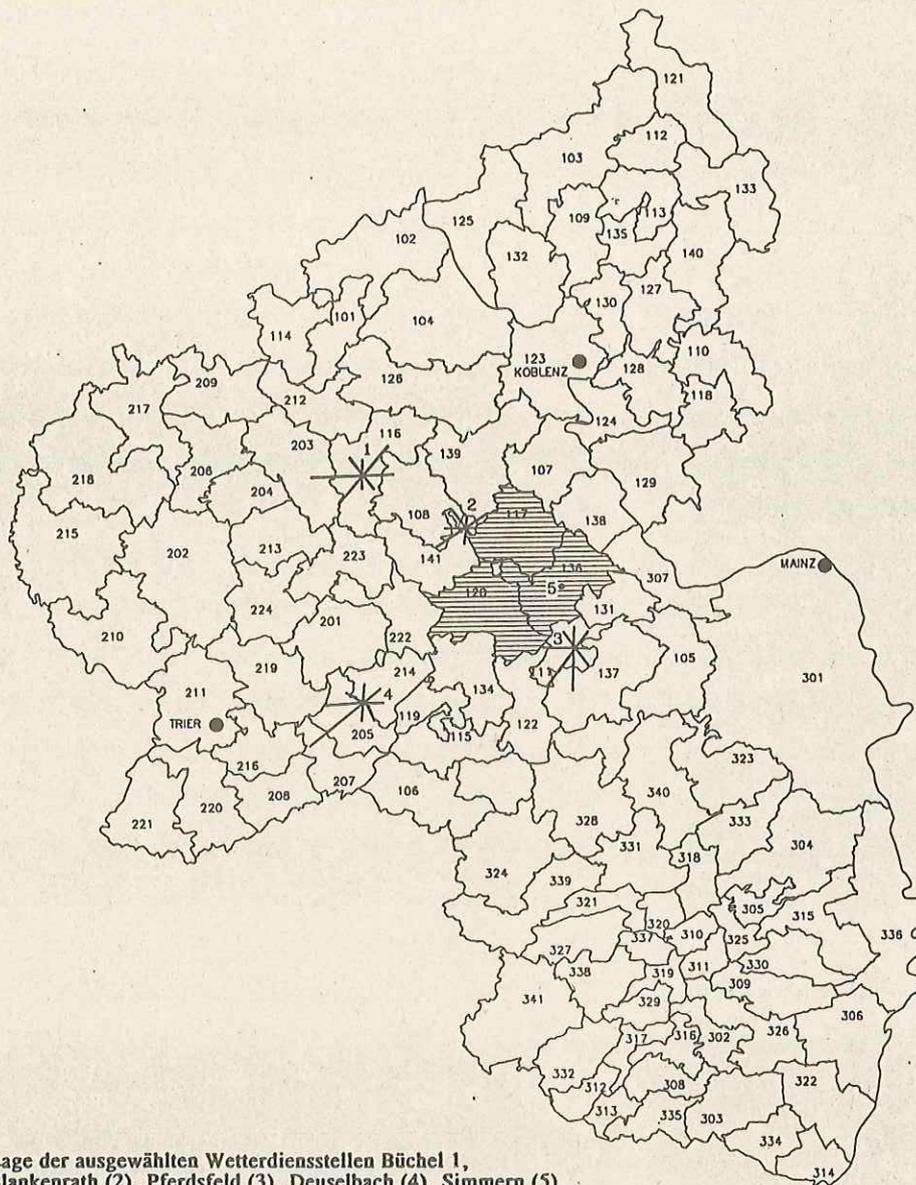


Abb. 1: Lage der ausgewählten Wetterdienststellen Büchel 1, Blankenrath (2), Pferdsfeld (3), Deuselbach (4), Simmern (5) und Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen

Zwei Beispiele für die Problematik, aus solchen Zeitreihen Änderungen der Windverhältnisse abzuleiten, zeigen Abb. 2a und 2b. Hier sind die Anzahl der beobachteten Sturmtage an den Stationen Deuselbach und Simmern als Funktion der Zeit aufgetragen. Ein Tag wird als Sturmtag definiert, wenn mindestens an einem der drei täglichen Beobachtungstermine 7:30, 14:30 oder 21:30 Uhr MOZ die Windgeschwindigkeit auf über 17,2m/sec oder Windstärke 8 und höher eingeschätzt wird. In Simmern sind deutlich drei Bereiche zu erkennen:

1. vor 1960
2. zwischen 1960 und 1979 und
3. nach 1979

Diese zwei Grenzen sind vermutlich auf zwei Änderungen zurückzuführen:

1. 1959/60 fand ein Beobachterwechsel statt und
2. 1979 wurde die Station von Simmern-Sargenroth nach Simmern-Wahlbach verlegt und gleichzeitig der Beobachter gewechselt.

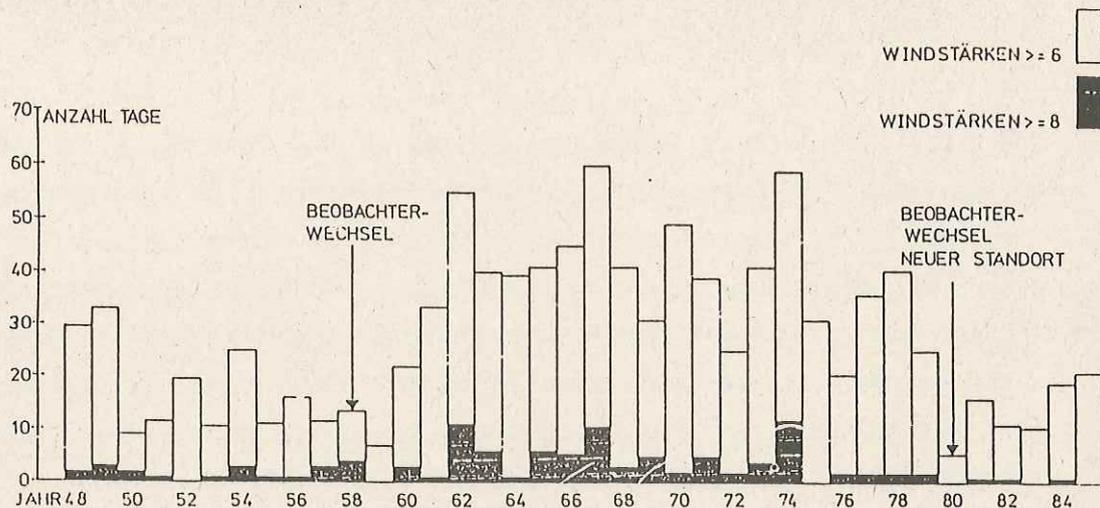


Abb. 2a: Auszählung von Sturmtagen im Rahmen des Klimadienstes nach Windstärkeeinschätzung zu den drei Terminen 07:30, 14:30 und 21:30 Uhr MOZ für die Klimahauptstation Simmern (1984 - 1985)

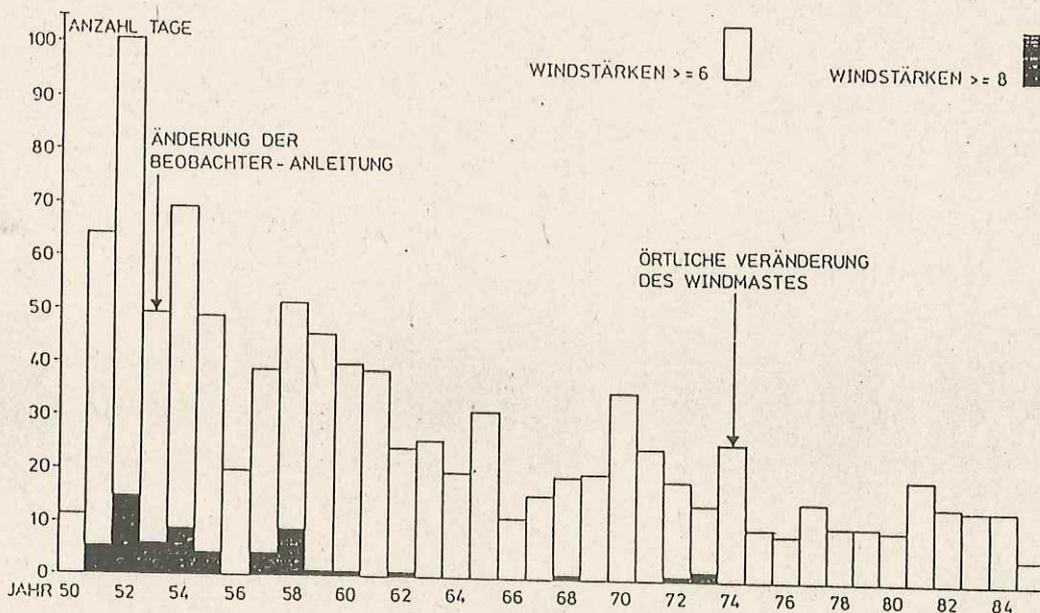


Abb. 2b: Auszählung von Sturmtagen im Rahmen des Klimadienstes nach Windstärkeeinschätzung zu den drei Terminen 07:30, 14:30 und 21:30 Uhr MOZ für die Wetterstation Deuselbach (Aug. 1950 - 1985)

In Deuselbach gibt es auch drei Zeitabschnitte, die sich deutlich unterscheiden:

1. vor 1955
2. zwischen 1955 und 1974 und
3. nach 1974

Vor 1955 sollte nach der Beobachteranleitung für Meßstationen mit Meßgeräten der momentane Windwert zur Zeit des Beobachtungstermins bestimmt werden, nach 1954 der mittlere Wert während der letzten 10 Minuten. Da in Deuselbach auch ein Windmeßgerät installiert ist, wurden vermutlich die als beobachtet gemeldeten Daten von den registrierten Werten abgelesen. 1974 wurde der Standort des Windmeßgerätes vom Dach der Station auf eine naheliegende Freifläche verlegt. Änderungen der Windsituation in den Zeitreihen an beiden Stationen sind also auf lokale Änderungen zurückzuführen, die nicht auf den Vorderen Hunsrück übertragen werden können.

An der Klimastation Blankenrath die Anzahl der Tage mit ≥ 6 Bft sind seit den 50er Jahren zurückgegangen. Aus den Beobachtungen der Klimastationen im Bereich des Vorderen Hunsrück ist daher kein Anzeichen für eine erhöhte Sturmhäufigkeit oder Sturmstärke Anfang der 80er Jahre abzuleiten.

3 WINDDATEN DER WETTERSTATIONEN

An den drei Wetterstationen Deuselbach, Büchel und Pferdsfeld im Raum des Vorderen Hunsrück (Abb. 1) wird die Windgeschwindigkeit meßtechnisch erfaßt und registriert. Subjektive Eindrücke gehen also nicht in die Meßreihen ein. Trotzdem müssen auch die dort gemessenen Reihen homogen sein, um sinnvolle Schlüsse für einen zeitlichen

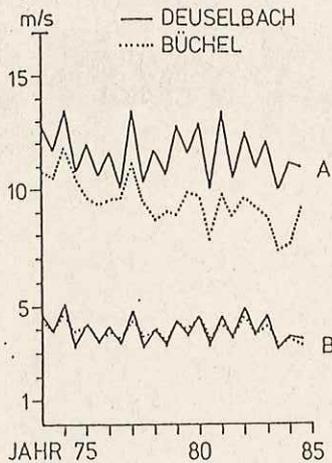


Abb. 3: Zeitreihen der Tageswindspitzen (A) und Tagesmittel (B) an den Wetterstationen Deuselbach und Büchel (1973-1985) über einen Halbjahreszeitraum (Okt./Mrz. u. Apr./Sep.) gemittelt

Trend ableiten zu können. Von 1974 an können die Winddaten für die Stationen Büchel und Deuselbach verglichen werden, für die Station Pferdsfeld seit 1975. Dieser Zeitraum ist bei den großen Variationen der Winddaten recht kurz, um signifikante Trends feststellen zu können. Die Zeitreihen der halbjährlichen mittleren Windgeschwindigkeit für den Sommer und den Winter zeigen auch keine signifikanten Veränderungen auf (Abb. 3). Trotzdem deutet sich in Büchel und Deuselbach eine Abnahme der halbjährlichen mittleren Tageswindspitze an (Abb. 3).

Erhöhte Sturmschäden werden allerdings vor allem durch singuläre Ereignisse ausgelöst. Daher sind langfristige Trends von mittleren Windeigenschaften nicht sehr geeignet, das Auftreten von Extremwerten des Windes zu beurteilen. Daher wurde der Zeitraum, in dem die Meßreihen homogen sind, in nur zwei Perioden unterteilt - 1974 bzw. 1975 bis 1979 und 1980 bis 1985. Während der ersten Periode sind relativ wenige Sturmschäden im Vorderen Hunsrück aufgetreten, in der zweiten Periode nahmen die Sturmschäden drastisch zu. Somit werden zwei Zeiträume betrachtet, die sich in ihren Sturmschäden wesentlich unterscheiden. Die mittleren Windgeschwindigkeiten für die Winter- und Sommerhalbjahre (Okt. - März. bzw. April. - Sept.) werden für die drei Stationen in den beiden Zeiträumen verglichen (Tab. 1). Die Wertepaare zeigen sowohl für den Sommer als auch für den Winter keine wesentlichen Veränderungen zwischen beiden Zeiträumen an.

Tab. 1: Langjährige Mittelwerte der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeit zweier Zeiträume: Juni/1974 bis einschließlich 1979 und 1980 bis 1985 für die Wetterstationen Pferdsfeld, Deuselbach und Büchel, angegeben in m/sec

Wetterstation	Halbjahr	Zeitraum 6/1974-1979	Zeitraum 1980-1985
Pferdsfeld	Sommer	3.4	3.3
	Winter	3.9	4.0
Deuselbach	Sommer	3.4	3.5
	Winter	4.4	4.4
Büchel	Sommer	3.7	3.6
	Winter	4.3	4.3

Mittlere Windgeschwindigkeiten über Halbjahreszeiträume können jedoch nicht die geeigneten Maßstäbe sein, um kausale Beziehungen zwischen Sturmschäden und meteorologischen Situationen in unterschiedlichen Zeitabschnitten herzustellen, da einzelne wenige Ereignisse die Sturmschäden auslösen können. Daher wurde für die Stationen Deuselbach, Büchel und Pferdsfeld die mittlere Anzahl der Tage pro Jahr in diesen beiden Zeiträumen bestimmt, an denen bestimmte Grenzwindgeschwindigkeiten erreicht oder überschritten wurden (Tab. 2).

Tab. 2: Mittlere Anzahl von Tagen pro Jahr mit Windspitzen über einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit

Zeitraum		Windspitze in m/sec bzw. Bft.			
		≤17.2 ≤8	≤20.8 ≤9	≤24.5 ≤10	≤28.5 ≤11
1974 - 1979	Deuselbach	47.0	20.5	4.3	1.2
1980 - 1985		50.7	25.0	6.8	1.7
1974 - 1979	Büchel	22.3	4.7	0.7	0.0
1980 - 1985		14.0	4.0	0.2	0.3
1974 - 1979	Pferdsfeld	14.4	3.8	1.2	0.2
1980 - 1985		13.5	4.7	0.7	0.2

In Deuselbach wurden mehr Tage mit einer Windgeschwindigkeit über bestimmten Grenzwerten im Zeitraum 1980 - 1985 gezählt als in den Jahren 1974 - 1979. In Büchel und Pferdsfeld hingegen liegen die Verhältnisse mit zwei Ausnahmen eher umgekehrt. Da die Winddaten der drei Stationen nur mit Vorbehalten auf das Sturmschadensgebiet übertragen werden können und nicht nachzuweisen ist, welche Station die Verhältnisse im Schadensgebiet am ehesten repräsentiert, kann aus diesen Ergebnissen kein Zusammenhang zwischen erhöhten Sturmschäden und der Häufigkeit verschiedener Windstärken nachgewiesen werden.

Ähnlich ergeben die mittleren monatlichen maximalen Windspitzen sowohl im Winter als auch im Sommer keine deutlichen Hinweise auf Unterschiede zwischen den beiden Zeiträumen mit unterschiedlichen Sturmschäden (Tab. 3).

Tab 3: Langjährige Mittelwerte der mittleren monatlichen maximalen Windspitze zweier Zeiträume Juni/ 1974 bis einschließlich 1979 und 1980 bis 1985 für die Wetterstationen Pferdsfeld, Deuselbach und Büchel; angegeben in m/sec

Wetterstation	Halbjahr	Zeitr. 1 6/1974-1979	Wertepaare	Zeitr. 2 1980-1985
Pferdsfeld	Sommer	10.3	>	10.1
	Winter	10.0	<	10.2
Deuselbach	Sommer	10.6	-	10.6
	Winter	12.5	-	12.5
Büchel	Sommer	9.7	>	8.7
	Winter	9.9	>	9.1

In Büchel liegen die mittleren monatlichen Windspitzen sogar im Zeitraum mit den wenigen Sturmschäden deutlich höher als im Zeitraum mit den hohen Sturmschäden. In Deuselbach findet sich kein Unterschied und in Pferdsfeld liegt der Wert in den Sommern der Schadensperiode geringfügig über und in den Wintern geringfügig unter dem Wert für die Periode mit wenig Sturmschäden. Auch aus diesem Vergleich ergibt sich kein Hinweis für eine signifikante Änderung in den Windgeschwindigkeiten, die die dramatische Schadenszunahme erklären könnte.

Neben der Höhe und Häufigkeit der Windgeschwindigkeit können auch die kurzfristigen Geschwindigkeitsänderungen einen Einfluß auf die Disposition von Baumbeständen zu Sturmschäden ausüben. Starke Windschwankungen können sich auf die Bäume übertragen und die Bäume stark beanspruchen. Tritt diese Belastung während der gesamten Wachstumszeit auf, so haben die Bäume sich durch ihr Wurzelwerk und ihre Wuchsform an diese Situationen weitgehend angepaßt. Trotzdem kann es Einzelereignisse geben, die die Belastungsgrenze der Bäume überschreiten. Diese Situation könnte eintreffen, wenn bei hoher Windgeschwindigkeit die Eigenfrequenz der Bäume etwa der Frequenz der Windböen entspricht, so daß Schwingungsresonanz auftreten kann. Eine Eigenfrequenz von 0,18 - 0,25 Hz wurde für etwa 80-jährige Fichten berichtet (MAYER 1985). Während der starken Stürme im Frühjahr 1990, bei denen verheerende Sturmschäden in weiten Teilen Deutschlands auftraten, wurde von uns für einen 30m hohen Fichtenbestand im Solling das Profil der horizontalen Windkomponente (15-Min-Mittel), über und in einem etwa 100-jährigen Fichtenbestand aufgenommen. Es zeigt, daß die Windgeschwindigkeit von 13 - 17m/sec in 25m Höhe über dem Bestand auf etwa 2m/sec in Kronenhöhe stark abnimmt. Die starke Abnahme wird dadurch verursacht, daß Impuls von der Luftströmung auf die Bäume übertragen wird.

Zwei Frequenzspektren der horizontalen kinetischen Energie des Windes während verschiedener Windgeschwindigkeiten über und in einem Fichtenbestand im Solling (RASCHENDORFER 1991) sind in Abb. 4 wiedergegeben. Die Frequenz des Energiemaximums scheint mit der mittleren Windgeschwindigkeit größer zu werden (Abb. 5). Über dem Bestand (52 m und 39 m) und im Stammraum (9 m) erreichen die Hauptfrequenzen jedoch nicht den Bereich der Eigenschwingungen von Fichten im Baumholzalter sondern liegen meistens um dem Faktor 3 darunter. Im Kronenraum (21m) jedoch können nach unseren Messungen im Solling durchaus Resonanzerscheinungen zwischen der Impulsübertragung von der Luftbewegung auf die Bäume und den Eigenschwingungen der Bäume auftreten. Solche Messungen der systematischen Variation der Windgeschwindigkeit liegen für die Stürme im Vorderen Hunsrück nicht vor, so daß keine Aussage über die Schwingungsanregung der Bäume durch die Stürme gemacht werden kann.

Eine große kurzfristige Variation der Windgeschwindigkeit könnte jedoch auch ein Indiz für verstärkte Belastung der Bäume und eine Schädigung des Wurzelwerks sein. Es wurde daher versucht, ein Maß für eine solche unstete Belastung aus den registrierten Winddaten im Vorderen Hunsrück abzuleiten und es in den beiden unterschiedlichen Schadensperioden zu vergleichen. Um diese Böigkeit des Windes zu charakterisieren, wurde eine absolute und eine relative Windgeschwindigkeitsänderung gewählt. Als ab-

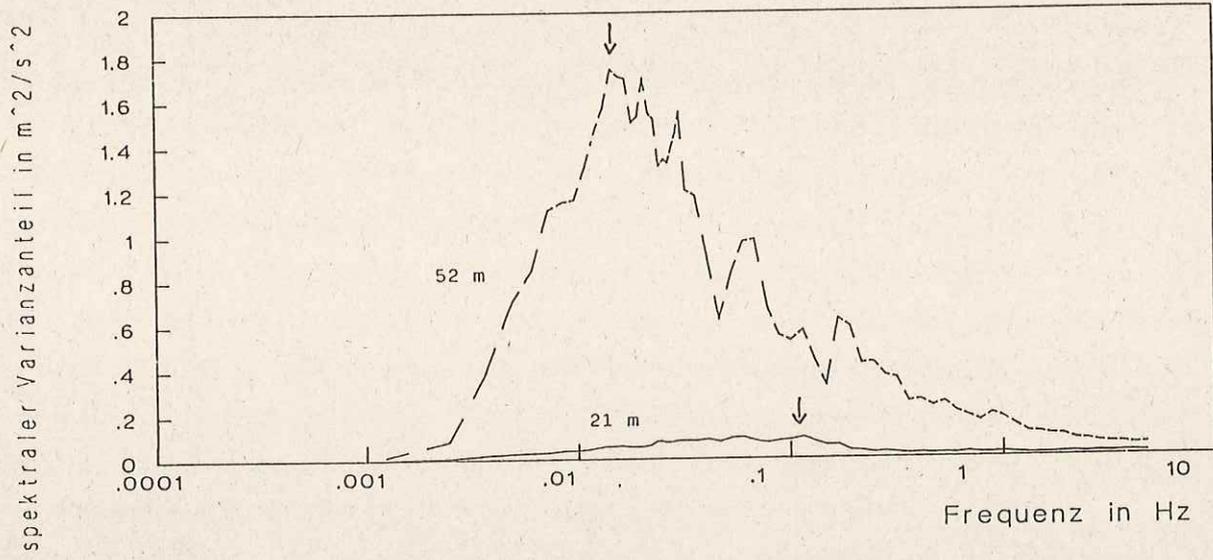


Abb. 4: Der spektrale Varianzanteil (Varianz pro Intervall einer logarithmischen Frequenzskala) ist prop. zur Volumendichte der Energie (Energie pro Volumen), die zu den turbulenten Schwankungen des Windes gehört. Diese Varianzdichte (der Windkomponente in Richtung des mittleren Windvektors) ist bezüglich eines ca. 15-minütigen Mittlungsintervalls für die beiden Meßhöhen, 21 m und 52 m, als Funktion der Schwankungsfrequenz (logarithmisch skaliert) dargestellt. Die Meßdaten sind im Feb. 1990 in einem ca. 31 m hohen Fichtenbestand im Solling aufgenommen worden. Die Windgeschwindigkeit betrug in 21 m 0.3 m/s und in 52 m 7.5 m/s. Die Pfeile kennzeichnen die Peak-Frequenzen. Die Flächen unter den Kurven entsprechen der jeweiligen gesamt Varianz und sind daher prop. zu den turbulenten Energiedichten in den entsprechenden Meßhöhen.

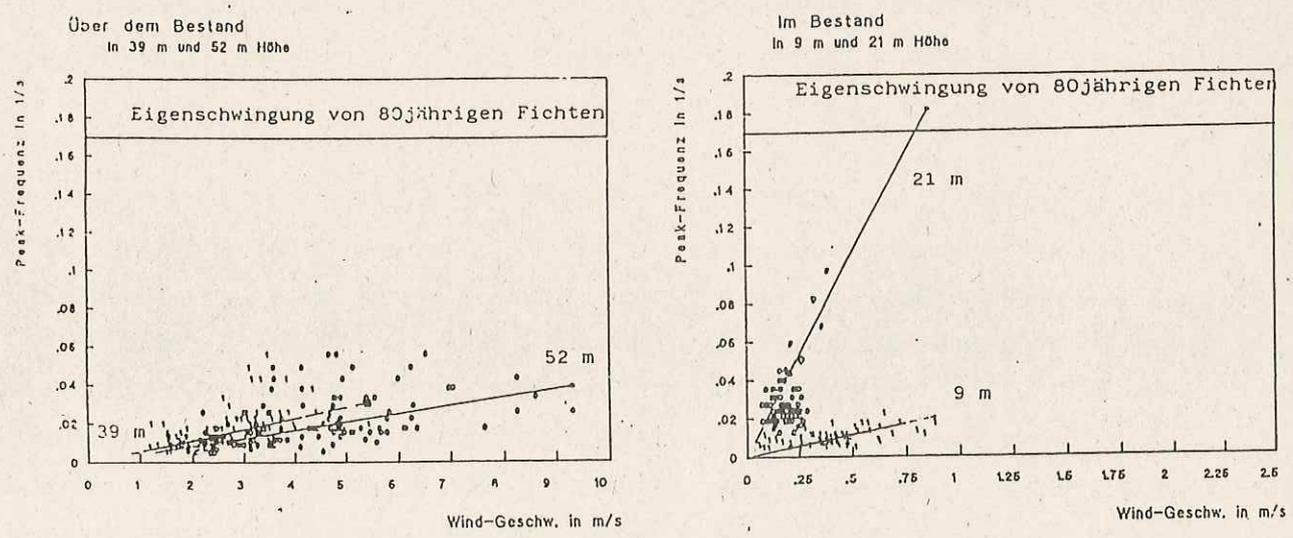


Abb. 5: Die Peak-Frequenz des Varianzspektrums der Geschwindigkeitsschwankungen in Richtung des mittleren Windvektors als Funktion der mittleren Windgeschwindigkeit (während eines Meßintervalls von ca. 30 min.) in und über einem ca. 31 m hohen Fichtenbestand im Solling. Die Meßdaten wurden im Mai und August des Jahres 1990 aufgenommen und beziehen sich auf die Meßhöhen 9 m, 21 m, 39 m und 52 m.

solute Böigkeit wurde die absolute Differenz zwischen der maximalen Windspitze an einem Tag und der mittleren Windgeschwindigkeit in der dazugehörigen Stunde gewählt. Eine Windspitze wurde nur dann als Windspitze verwendet, wenn sie einen Wert über 21kn (10,8km/sec) erreicht. Als relatives Maß wurde die absolute Böigkeit auf die mittlere Windgeschwindigkeit in dieser Stunde bezogen und in % ausgedrückt. Die absolute Böigkeit liegt maximal bei 6m/sec, die relative zwischen 80 und 190%. Aus dem mittleren Verlauf ist keine größere Böigkeit für den Zeitraum 1974 - 1979 als für den Zeitraum 1980 - 1985 abzuleiten. Eher deutet sich für Deuselbach und für Büchel an, daß die Böigkeit abgenommen hat. Auch diese Kenngröße gibt keine Hinweise, daß sich die erhöhten Sturmschäden auf ausgeprägte Änderungen der generellen atmosphärischen Bedingungen zurückführen lassen.

Baumbestände können vor dem Schadensereignis durch atmosphärische Einflüsse für Sturmschäden prädisponiert werden. Das auslösende Ereignis kann dann ganz kurzfristig auftreten. Prädisponierende Faktoren können z.B. Verletzungen des Wurzelwerks durch mechanische Beanspruchung sein oder Nässe des Bodens aufgrund von Regenfällen und damit verbundene geringere Bodenhaftung des Wurzelwerks oder eine späte Durchforstung mit Freistellung der Bäume. Starke Nässe des Waldbodens und Sturmschäden konnten oft gleichzeitig festgestellt werden (GRAVENHORST et al 1991). Langanhaltende Nässe auf Böden mit Stau- und Grundwassereinfluß führt dazu, daß die Bäume flach wurzeln und Senk- und Ankerwurzeln meist völlig fehlen. Auf diesen Böden ist die Standfestigkeit der Bäume vermindert und das Sturmschadenrisiko daher besonders groß.

Auf tiefgründigen, skelettreichen und gut durchlüfteten Böden kann die Fichte auch Pfahl- und Senkwurzeln ausbilden (KÖSTLER et al 1968). Bei Bodennässe und langanhaltenden Niederschlägen wird jedoch auch in diesen Böden die Bodenhaftung reduziert, so daß Sturmschäden eher auftreten können. So fällt im "Vorderen Hunsrück" auf, daß in den Jahren 1967 und 1984, in denen die stärksten Sturmschäden bis 1985 aufgetreten sind, die Stürme von langanhaltenden Regenfällen begleitet und die Böden dadurch tief durchnäßt waren. Die Sturmschäden können also durch ein vielfältiges Wirkungsgefüge von Sturmdauer und Windspitzen, Windböigkeit und Bodennässe verursacht sein, für deren Werte es in Waldschadensgebieten - wie hier im Vorderen Hunsrück - meistens keine quantitativen Hinweise gibt.

Eine Möglichkeit, prädisponierende Faktoren und potentielle auslösende Faktoren bei Sturmschäden in einer Untersuchung zu koppeln, könnte darin bestehen, die maximale Windspitze eines Sturmes mit der Wirkungs-dosis eines Sturmes zu korrelieren. In diesem zweidimensionalen Wertefeld könnten die Stürme mit Sturmschäden eventuell einen besonderen Bereich einnehmen. Für die Wetterstationen Deuselbach und Pferdsfeld sind solche Wertepaare in Abb. 6 und Abb. 7 eingetragen. Als Energiedichtedosis oder Staudruckdosis (SD) eines Sturmes wurde das Produkt aus kinetischer Energie des Windes pro Einheitsvolumen der Luft ($\frac{1}{2} \sigma v^2$, σ = Dichte der Luft, v = Windgeschwindigkeit) und der Zeit t , in der eine bestimmte Windgeschwindigkeit herrscht, definiert. Je länger die Zeit andauert und je höher die Windgeschwindigkeit während dieser Zeit ist, desto größer wird die gesamte Staudruckdosis:

$$SD = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \sigma v_i^2 t_i$$

Als Begrenzung für die mittlere stündliche Windgeschwindigkeit wurde $v_i \geq 10,8 \text{ m/sec}$ (entsprechend Beaufort 6) und $\sum t_i \geq 6 \text{ h}$ gesetzt. Durch die zeitliche untere Grenze wird erreicht, daß kurze sommerliche Gewitterstürme nicht erfaßt werden.

Es wird in den beiden Abbildungen deutlich, daß eine bestimmte Windspitze erreicht sein muß, ehe Sturmschaden auftritt. Diese hier benutzte Windspitze wurde an der Wetterstation gemessen und nicht am Schadensort. Auch ist nicht bekannt, ob diese Windspitze zu Windwürfen und Windbrüchen geführt hat. Sie kann auch dort im Wald ganz andere Werte erreichen. In Pferdsfeld mußte mindestens eine Windgeschwindigkeitsspitze von etwa 22m/sec auftreten, ehe im Vorderen Hunsrück Sturmschaden beobachtet wurde. In Deuselbach sind Spitzenwerte von etwa 30m/sec bei kurzer Staudruckdosis ($< 1000 \text{ Pa} \cdot \text{h}$) und von etwa 25m/sec bei hoher Staudruckdosis ($> 2000 \text{ Pa} \cdot \text{h}$) nötig, um Sturmschäden im Vorderen Hunsrück zu verursachen. Diese Stürme sind in diesem Zeitraum nur im Winter aufgetreten, so daß die wintergrüne Fichte hauptsächlich von Sturmschäden betroffen wurde.

Es gibt also einen ziemlich eindeutigen Wertebereich von Windspitze und Staudruckdosis, in dem Sturmschäden auftraten. Im Zeitraum 1974 - 1979 waren dies in Pferdsfeld vier Situationen im Vergleich zu fünf im Zeitraum 1980 - 1985. In Deuselbach konnten vier Stürme mit Sturmschäden für die Jahre 1974 - 1979 und sieben Stürme für die Jahre 1980 - 1985 ermittelt werden. Es deutet sich daher an, daß Stürme mit Werten über

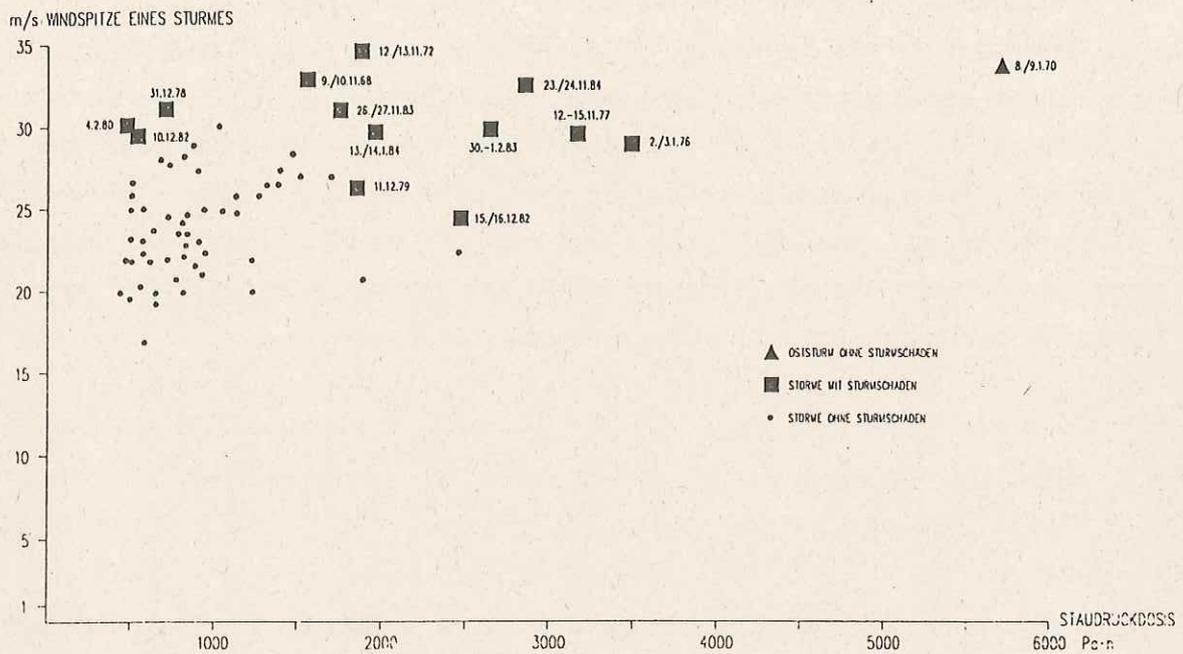


Abb. 6: Beziehungen zwischen Staudruckdosis und Windspitzen von Stürmen mit und ohne Sturmschäden im Forstamt Kirchberg im Zeitraum 1969-1985 an der Station Deuselbach

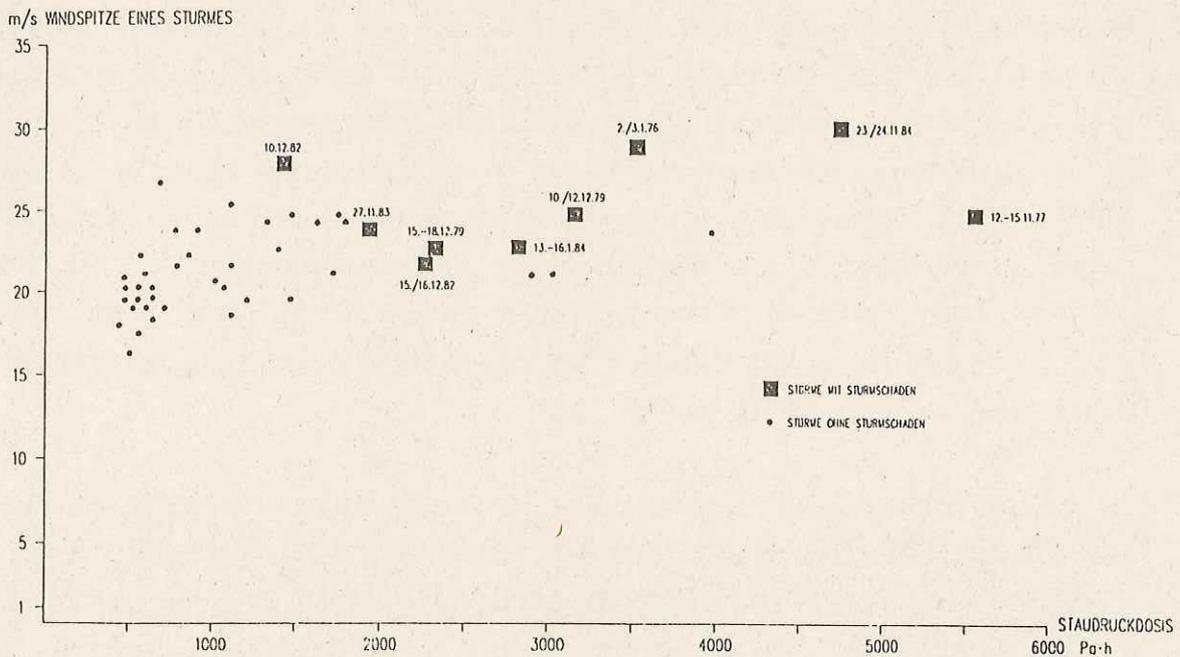


Abb. 7: Beziehung zwischen Staudruckdosis und Windspitzen von Stürmen mit und ohne Sturmschäden im Forstamt Kirchberg im Zeitraum Juni/1974-1985 an der Wetterstation Pferdsfeld

einer kritischen Staudruckdosis und einer kritischen Windspitze im Zeitraum 1980 - 1985 etwas häufiger auftraten als im Zeitraum 1974 - 1979. Die Stürme mit Sturmschäden unterschieden sich jedoch in den 70er Jahren nicht deutlich in Staudruckdosis oder Windspitze.

Ein extrem starker Sturm ohne Sturmschäden wurde im Januar 1976 in Deuselbach, aber nicht in Pferdsfeld registriert. Während dieses Sturms herrschte eine östliche Windrichtung vor, die anscheinend zu einer bevorzugten Kanalisierung und Verstärkung des Windes bei Deuselbach durch das Relief führt. Nur in Deuselbach treten gehäuft hohe Windgeschwindigkeiten bei Winden aus Südost auf. Bei westlichen- und südwestlichen Richtungen treten meistens an allen drei Stationen gleichzeitig hohe Windgeschwindigkeiten auf. Nach der Windrichtungsverteilung bei Windstärken über 10,8m/sec (= 6 Bft) (Abb. 8) kamen die Winde, die die Sturmschäden verursachten, aus den Richtungen, die bei hohen Windgeschwindigkeiten bevorzugt werden. Unerwartete Windrichtungen, für die waldbaulich die Bestandesstruktur nicht vorbereitet sein könnte, können daher nicht für die hohen Sturmschäden verantwortlich sein.

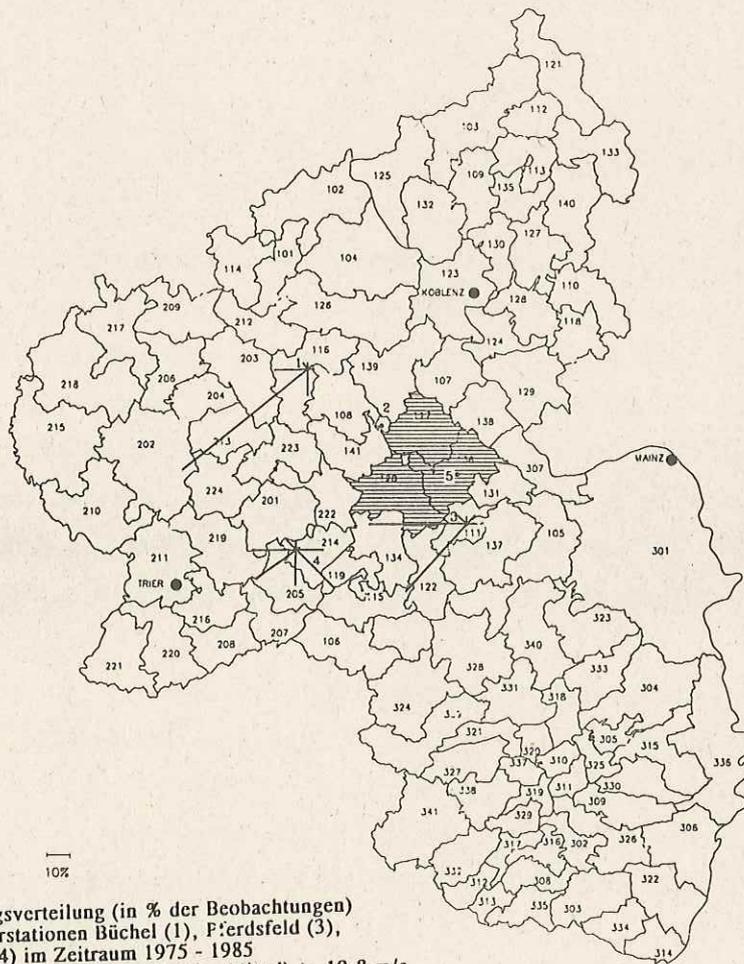


Abb. 8: Windrichtungsverteilung (in % der Beobachtungen) an den Wetterstationen Büchel (1), Pferdsfeld (3), Deuselbach (4) im Zeitraum 1975 - 1985 bei Windgeschwindigkeiten (10 Min. Mittel) > 10,8 m/s (schraffiert "Vordere Hunsrück")

Bei dieser Zuordnung von Sturmschäden im Vorderen Hunsrück zu gemessenen Windspitzen und Staudruckdosen bleibt offen, wie gut die Meßwerte der Wetterstationen im größeren Umkreis von etwa 50km die Schadensgebiete realistisch charakterisieren und ob die maximale Windspitze überhaupt verantwortlich für den Sturmschaden ist. Auch die Staudruckdosis berücksichtigt nicht, daß der Schaden im Verlauf und nicht am Ende des Sturmes aufgetreten sein kann. Da in den forstlichen Aufzeichnungen über Sturmschäden oft keine genauen Zeitangaben gemacht werden - manchmal gibt es nur Hinweise auf das Forstwirtschaftsjahr, in dem der Sturmschaden auftrat - so können die genaue Belastungsdauer vor einem Sturmschaden und die Windgeschwindigkeiten, die zum Windwurf oder Windbruch geführt haben, nachträglich nicht mehr ermittelt werden.

Sommerstürme sind meist räumlich und zeitlich sehr begrenzt ausgedehnt. Die an einer Wetterstation erfaßten Daten während eines Sommersturmes können daher kaum für entfernte Waldgebiete gelten. Sommerstürme wurden aus diesem Grunde in diese Auswertungen nicht einbezogen. So wurde der Sturm vom 26.07.1985, der kurzfristig Böen bis zu 34,5m/sec an der Station Deuselbach erreichte und im Bereich der Forstdirektion Koblenz zu erheblichen Schäden führte, nicht berücksichtigt.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Um die Windverhältnisse im Vorderen Hunsrück im Zusammenhang mit den forstlichen Sturmschäden beschreiben zu können, wurden für diesen Raum homogene Windmeßreihen des Deutschen Wetterdienstes ermittelt. Die an den Wetterstationen Büchel, Deuselbach und Pferdsfeld gemessenen Winddaten können erst seit 1974 verglichen werden. Für zwei Zeiträume, die sich in den Sturmschäden stark unterschieden (1974 - 1979 geringer Schaden, 1980 - 1985 erheblicher Schaden), wurden charakteristische Windgrößen verglichen. Es ergaben sich keine Hinweise, daß die erhöhten Sturmschäden in der ersten Hälfte der 80er Jahre verursacht wurden durch:

1. eine höhere mittlere Windgeschwindigkeit
2. eine erhöhte Anzahl von Tagen mit Windspitzen über Beaufort 8
(17,2m/sec)
3. eine Zunahme der mittleren monatlichen Windspitzen
4. eine veränderte absolute und relative Böigkeit des Windes

Es konnte jedoch gezeigt werden, daß Sturmschäden im Vorderen Hunsrück unter den jetzigen forstlichen Bedingungen auftreten, wenn an den Wetterstationen Deuselbach und Pferdsfeld bestimmte kritische Windspitzen und Staudruckdosen für einen Sturm aus westlichen Richtungen überschritten werden. Diese Bedingungen traten im Durchschnitt etwa einmal pro Jahr ein, so daß Fichtenwälder auf nassen Böden im Vorderen Hunsrück im Baumholzalder stets gefährdet sind, durch Windwurf geschädigt zu werden. Es ist daher eine vordringliche Aufgabe, bei der Pflanzenauswahl, dem Begründen von Beständen und der Durchforstung das Sturmschadenspotential so gering wie möglich zu halten. Das Zusammenwirken von meteorologischen, bodenkundlichen und waldbaulichen Faktoren bei den Sturmschäden müssen deshalb weiter aufgeklärt werden. Eine wesentliche Hilfe hierzu wären langfristige Informationen über Windeigenschaften in potentiellen Sturmschadensgebieten und genauere Informationen über Sturmschadensereignisse.

Danksagung

Die Winddaten wurden uns vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt. Wir danken für die Unterstützung.

Dieses Vorhaben war ein Teilvorhaben des Forschungsprojektes "Sturm und Immissionsschäden im Vorderen Hunsrück" und wurde von der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz finanziell unterstützt.

5 Literatur:

GALLUS, M. (1987): Feststellung von Bewertungen zwischen Sturmschäden, Standort und Bestandesstruktur bei der Baumart Fichte im Rahmen des Projektes "SIMS", unveröffentlichtes Manuskript, Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Trippstadt

GRAVENHORST, G., GIESEMANN, J., KREILEIN, H. (1991): Feststellung von Beziehungen zwischen Sturmschäden und außergewöhnlichen meteorologischen Einflüssen im "Vorderen Hunsrück", Endbericht eines Teilprojektes von "Sturm und Immissionsschäden im Vorderen Hunsrück, Inst. f. Bioklimatologie der Universität Göttingen

HEUPEL, M. u. BLOCK, J. (1991): Untersuchungen zum Einfluß des Standortes und der Bestandesstruktur auf das Ausmaß von Sturmschäden im Vorderen Hunsrück; in diesem Heft

KÖSTLER, J. N., BRÜCKNER, E., BIEBELRIETHER, H. (1968): Die Wurzeln der Waldbäume, Paul Parey Verlag

NIELSEN, N. (1988): Eine quantitative Untersuchung über den Einfluß der Durchforstung auf die Sturmfestigkeit der Fichte in Norddeutschland und Dänemark, Projektbericht Teil 1 - 3, Forstl. Fachber. d. Univ. Göttingen

MAYER, H. (1985): Baumschwingungen und Sturmgefährdung des Waldes, Münchner Universitätschriften, Fakultät für Physik

Untersuchungen zum Einfluß des Standortes und der Bestandesstruktur auf das Ausmaß von Sturmschäden im Vorderen Hunsrück

M. Heupel und J. Block

1 ZIELE

Das Sturmwurfisiko in Waldbeständen variiert in Abhängigkeit von morphologischen und pedologischen Gegebenheiten sowie der Struktur der Waldgebiete und Einzelbestände erheblich. Ziel dieses Teilprojektes war es daher, Beziehungen zwischen Standorts- und Bestockungsparametern und dem Ausmaß der Sturmschäden im Vorderen Hunsrück herzuleiten und die Wirksamkeit von waldbaulichen Maßnahmen zur Sturmschadensminderung zu überprüfen. Soweit dies mit einer großflächigen Erhebung realisierbar erscheint, sollten die Einflüsse der Baumart bzw. der Baumartenmischung, des Altersklassenaufbaus, des Standortes (insbesondere der Standortsgrundform) auf das Sturmschadensrisiko sowie die Wirksamkeit von Laubholzriegeln zur Reduktion der Sturmschäden abgeschätzt werden.

2 METHODIK

Die Erhebung der Sturmschadens-, Bestockungs- und Standortdaten erfolgte schwerpunktmäßig im Forstamt Kirchberg, da für dieses Forstamt zu Projektbeginn im Jahre 1986 aktuelle Forsteinrichtungsunterlagen, insbesondere Grundkarten im Maßstab 1:10 000, zur Verfügung standen. Zudem ist das Forstamt Kirchberg in besonderem Maße von Sturmschäden betroffen.

Für vier besonders sturmgeschädigte Reviere dieses Forstamtes (Brauschied, Buschied, Kappel, Womrath) wurden ab dem Forstwirtschaftsjahr 1955 bzw. 1957 alle Sturmholtzanfälle und Sammelhiebsmengen bestandesbezogen anhand der Revierbücher oder sonstiger Unterlagen aufgenommen, Sturmflächen aus Luftbildmaterial und Felderhebungen kartiert und hieraus eine Genese der Sturmschäden in diesem Gebiet abgeleitet. Mit Hilfe der Betriebswerke wurde der Altersklassenaufbau der Fichtenbetriebsklasse für die letzten 30 Jahre soweit als möglich rekonstruiert. Standorts- und Bestockungsparameter wurden den Forsteinrichtungs- und Standortkartierungswerken des Forstamtes Kirchberg entnommen. Alle wesentlichen Sturmschadens-, Bestockungs- und Standorts-

daten wurden bestandesweise in den Forstgrundkarten vermerkt und in Tabellenwerken zusammengefaßt. Darüberhinaus wurde mit Hilfe von Luftbildern mehrerer Befliegungsjahre und einer terrestrischen Sturmflächenkartierung aus den Jahren 1986/87 die Entwicklung von flächigen Sturmwürfen in Abhängigkeit von Standortgrundform, Baumart und Bestandeslagerung in Form einiger Fallstudien kartiert.

Eine umfassende Dokumentation aller erhobenen Daten enthält GALLUS u. HEUPEL (1987).

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Alterklassenentwicklung und Schadausmaß in Fichtenreinbeständen

In den Jahren 1957 bis 1986 wurden in den vier untersuchten Forstrevieren auf etwa 2600 ha Waldfläche ca. 208.000 Efm o. R. Sturmholz, also durchschnittlich 2,7 Efm je Jahr und ha Wirtschaftswald und ca. 30.000 Efm o.R. Sammelhiebsholz (0,35 Efm o. R./ha • Jahr) verbucht. Bis 1960 wurden nur geringe Sturmholzanfälle registriert. In die Periode 1961 bis 1967 fielen einige Jahre mit bereits merklichen Sturmholzanfällen von 2 - 4 Efm/ha. In den 70er Jahren wurden nur kleine Sturmholzanfälle verbucht. Im Jahr 1983 stiegen die Sturmholzquoten dann allerdings drastisch an und erreichten im Forstwirtschaftsjahr 1985 als Folge des Orkans am 23./24.11.1984 ein Maximum von nahezu 20 Efm/ha (Abb. 1).

Das Sturmholz fiel nahezu ausschließlich bei der Baumart Fichte an. Die Fläche der Fichtenreinbestände (> 85 % Fichtenanteil; Blößen nicht berücksichtigt) in den vier Revieren ist von 1544 ha in 1955 auf 1741 ha in 1980 leicht angestiegen und nahm dann infolge der gewaltigen Flächenwürfe durch den Orkan vom 23./24.11.1984 auf 1298 ha ab. Die Alterklassenverteilung der Fichtenreinbestände zeigte 1955 einen erheblich Überhang der I. bis III. Altersklasse (Abb. 2). Über 60-jährige Bestände nahmen weniger als ein Viertel der Fichtenfläche ein.

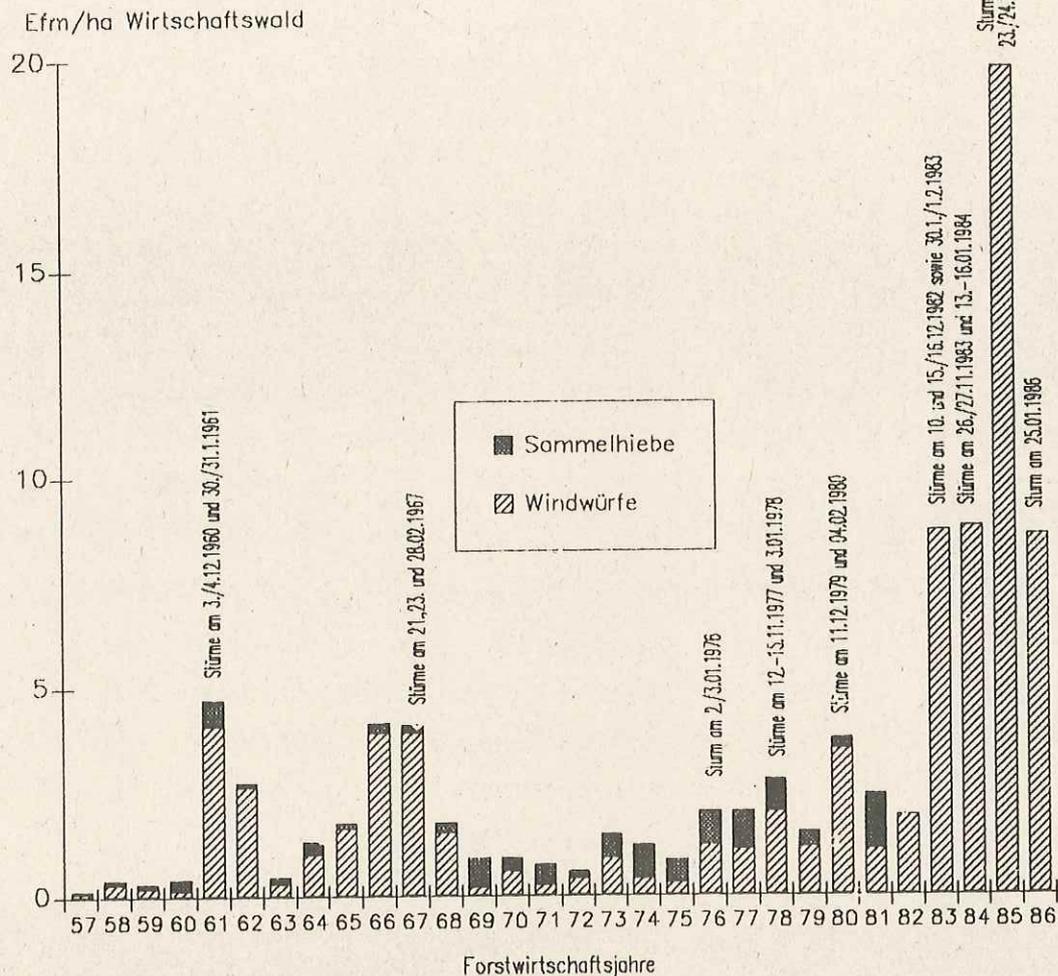


Abb. 1: "Außerordentliche" Hiebsonfälle in den Revieren Brauschied, Buschied, Kappel und Wornroth des Forstamtes Kirchen in den Forstwirtschaftsjahren 1957 bis 1986; in Jahren mit außergewöhnlich hohen Sturmholzanfällen sind bekannte Sturmereignisse aufgeführt.

Bis 1980 hat sich die Altersklassenverteilung deutlich in Richtung auf einen höheren Anteil in den älteren Altersklassen verschoben. Der Anteil der jüngsten und in der Regel noch nicht sturmwurfgefährdeten Altersklasse ging von 29 % in 1955 auf 14 % in 1980 zurück. Der Anteil der Altersklassen V und VI stieg im gleichen Zeitraum von 6 auf 20 % an. Diese deutlichen Altersklassenverschiebung dürfte mit einer kontinuierlichen Zunahme der Gefährdung der Fichtenbestände gegenüber Sturmschäden einhergegangen sein.

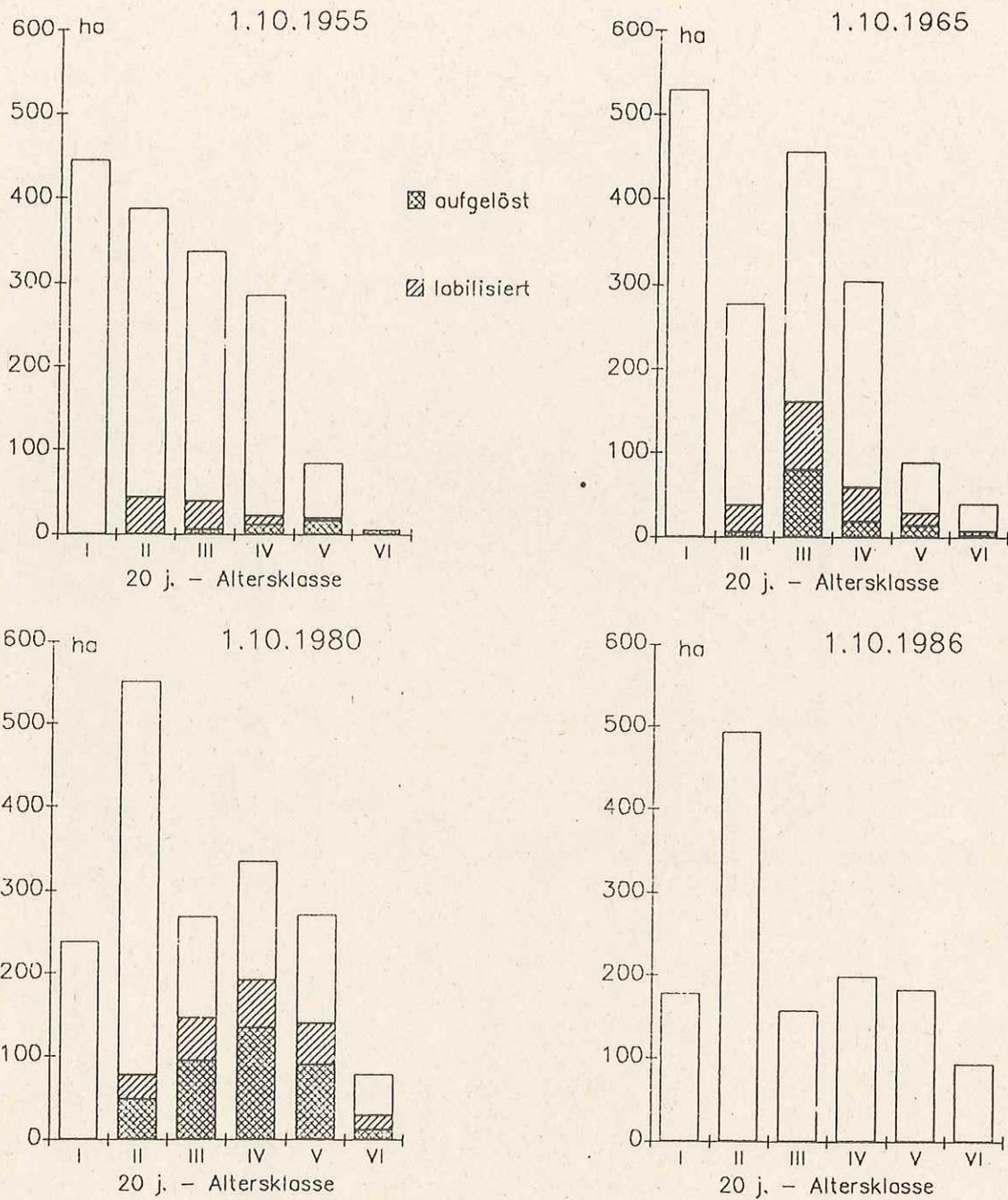


Abb. 2: Altersklassenverteilung der Fichtenreinbestände der Reviere Brauschied, Buschied, Kappel und Womrath an den Stichtagen 01.10.1955, 01.10.1965, 01.10.1980 und 01.10.1986 sowie Anteile der in den jeweiligen Altersklassen bis zum jeweils nachfolgenden Stichtag labilisierten und aufgelösten Bestände (Erläuterungen siehe Text)

Mit dem Hineinwachsen in höhere Altersklassen nahm entsprechend auch der Anteil der durch Sturmwürfe labilisierten und aufgelösten Fichtenbestände zu. Als labilisiert, das heißt gegenüber weiteren Sturmschäden besonders disponiert, wurde ein Bestand angesehen, wenn er mehr als 20 % seines Vorrates verloren hatte. Bei derartigen Vorratsverlusten beschränkt sich der Sturmwurf in der Regel nicht mehr auf Einzelwürfe, sondern es treten bereits Gruppen- und Nesterwürfe auf, die Angriffsflächen für spätere Stürme bieten. Als "aufgelöst" wurde ein Bestand eingruppiert, wenn mehr als 90 % der Bestandesfläche dem Sturm zum Opfer gefallen waren.

Von 1955 bis 1965 hielten sich die Bestandesverluste mit 37 ha (ca. 2 % der Fichtenfläche) noch in Grenzen (Abb. 2). In dieser Zeitspanne wurden darüberhinaus etwa 92 ha (6 % der Fichtenfläche) labilisiert. Im nachfolgenden Zeitraum 1965 bis 1980 stieg der Anteil der durch Sturmwürfe aufgelösten Bestände bereits auf 120 ha (7 % der Fichtenfläche) an. Etwas mehr als 10 % der Fichtenfläche wurden in diesem Zeitraum durch sturmwurfbedingten Vorratsverlust von über 20 % labilisiert.

Die Stürme Anfang der 80er Jahre trafen somit auf inzwischen in gefährdete Altersklassen hineingewachsene Fichtenbestände, die zudem in erheblichem Umfang durch vorangegangene Sturmschäden labilisiert worden waren.

Im Zeitraum 1980 bis 1986 wurden etwa 375 ha Fichtenbestände, das sind mehr als ein Fünftel der gesamten Fichtenfläche, durch Sturmwurf vernichtet. In den älteren Altersklassen (ab IV) ging mehr als ein Drittel der Fichtenfläche verloren. Darüberhinaus wurden über 200 ha durch Vorratsverluste von über 20 % für weitere Sturmwürfe disponiert.

3.2 Einfluß des Standortes auf das Sturmschadensrisiko

Zur Ermittlung des Einflusses des Standortes auf die Sturmanfälligkeit von Fichtenreinbeständen wurden die Altersklassenverteilungen (1955, 1965, 1980, 1986) und die Anteile der in den jeweiligen Zeiträumen labilisierten und aufgelösten Bestände für die Standortgrundformen \leq VII (Braunerde und Pseudogley-Braunerde), VIII (Braunerde-Pseudogley) und \geq IX (Pseudogley) getrennt erhoben.

In den Abbildungen 3a bis c sind beispielhaft die Altersklassenverteilung für den Stichtag 1.10.1980 und die Sturmschäden sowie deren Verteilung für den Zeitraum 1980 bis 1986 dargestellt. Von den 1741 ha im Jahr 1980 vorhandenen Fichtenreinbeständen lagen 620 ha auf Grundform \leq VII, 773 ha auf Grundform VIII und 348 ha auf

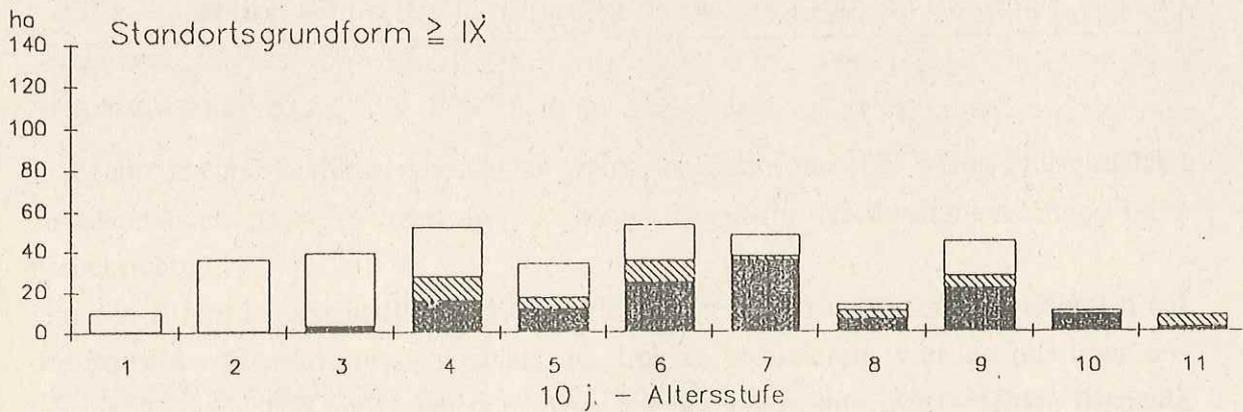
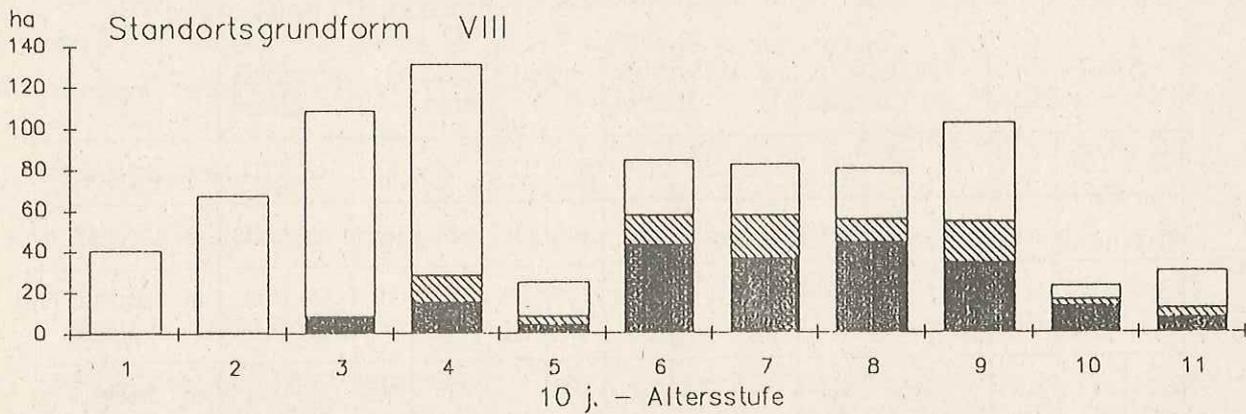
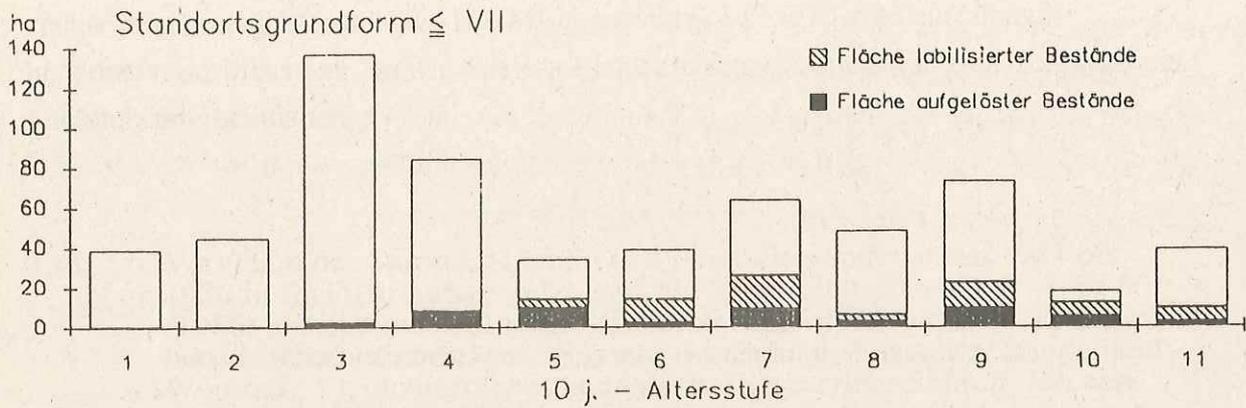


Abb. 3: Verteilung der Fichtenreinbestände der Reviere Brauschied, Buschied, Kappel und Womrath auf 10-jährige Altersstufen, getrennt für die Standortgrundformen \leq VII, VIII, und \geq IX am Stichtag 01.10.1980 sowie Anteile der in den jeweiligen Altersstufen im Zeitraum 1.10.1980 bis 1.10.1986 labilisierten und aufgelösten Bestände (Erläuterungen siehe Text)

Grundform \geq IX. Die Altersverteilung zeigt auf den pseudovergleyten Böden (Grundform \geq VIII) einen geringfügig höheren Anteil an über 30-jährigen und damit sturmwurfdisponierten Beständen.

In den Forstwirtschaftsjahren 1980 bis 1986 gingen auf den Standorten der Grundform \leq VII 48 ha (8 % der Fichtenfläche auf dieser Standortsgrundform), auf Grundform VIII 203 ha (26 %) und auf der Grundform \geq IX 123 ha (35 %) durch Sturmwürfe verloren. Diese deutlich höheren Schäden auf den pseudovergleyten Standorten sind nicht allein durch die dort geringfügig höheren Anteile älterer Bestände im Vergleich zur Standortsgrundform \leq VII zu erklären, da auch innerhalb der einzelnen Altersklassen deutliche Unterschiede bestehen. So beträgt der jeweilig höchste Anteil geworfener Bestände innerhalb einer Altersklasse bei der Standortsgrundform \leq VII 29 %, bei Grundform VIII 55 % und bei Grundform \geq IX 73 %. Auch der relative Anteil von Beständen, die 1986 zwar noch nicht flächig geworfen, aber bereits mehr als 20 % ihres Vorrates durch Sturmwurf verloren hatten, ist auf den pseudovergleyten Standorten höher als auf der Braunerde bzw. nur leicht stauwasserbeeinflussten Böden.

Das beträchtliche Ausmaß der Schäden auf den staunässebeeinflussten Standorten wird in der Beobachtung deutlich, daß auf der Grundform VIII nur 37 % und auf der Grundform \geq IX sogar nur 29 % der Fichtenfläche weitgehend unbehelligt blieb. Dagegen zeigten auf den Braunerdeböden (\leq VII) 1986 immerhin noch etwa drei Viertel der Fichtenfläche keine oder nur geringe Sturmschäden ($<$ 20 % Vorratsverlust).

Die Sturmschäden sind auf den Pseudogley-Braunerden und den Pseudogleyen nicht nur vom Ausmaß her deutlich gravierender als auf der Braunerde, sondern setzten auch bereits bei einem geringeren Bestandesalter ein. Merkliche Bestandesverluste sind auf der Standortsgrundform \leq VII ab der Altersstufe 30 - 40 Jahre, bei den Grundformen VIII und \geq IX bereits ab der Altersstufe 20 - 30 Jahre zu verzeichnen.

3.3 Einfluß der Baumart und der Baumartenmischung auf das Sturmschadensrisiko

Zur Ermittlung des Einflusses der Baumart bzw. der Baumartenmischung auf das Sturmschadensausmaß bei unterschiedlichen Standortsgrundformen wurden die Anteile deutlich geschädigter (Vorratsverlust $>$ 20 %) und aufgelöster Flächen von Fichtenreinbeständen ($>$ 85 % Fichtenanteil), Laubholz-Fichtenbeständen (Fichtenanteil 10 - 50 %), Fichten-Laubholzbeständen (Fichtenanteil 50 - 85 %), Kiefern-Fichtenbeständen (Fichtenanteil 10 - 50 %) und Fichten-Kiefernbeständen (Fichtenanteil 50 - 85 %) miteinander verglichen (Tab. 1). Bei den Laubholz-Fichtenbeständen

bzw. Fichten-Laubholzbeständen handelt es sich meist um Buchen - seltener Stieleichen - Fichtenmischungen. Die Fichte dürfte hier vor allem durch Auspflanzen von Verjüngungslücken eingebracht worden sein und ist dementsprechend i.d.R. um 1 bis 3 Jahrzehnte jünger als das Laubholz. Die Mischungsform ist i.d.R. eine einzelbaum- bis horstweise Mischung. In den Kiefern-Fichtenmischbeständen war zum Teil auch ein Laubholzanteil enthalten.

Tab. 1: Vergleich der Sturmschäden in den Forstwirtschaftsjahren 1981 bis 1986 in Fichtenreinbeständen und Fichtenmischbeständen ab Alter 60 (1986) auf unterschiedlichen Standortsgrundformen im Forstamt Kirchberg (Fichtenreinbestände: Reviere Brauschied, Buschied, Kappel und Womrath; Fichtenmischbestände zusätzlich Reviere Sohren, Büchenbeuren und Oberkostenz)

Standortsgrundform	Fichtenreinbestände			Laubholz-Fichtenbestände			Fichten-Laubholzbestände			Kiefern-Fichtenbestände			Fichten-Kiefernbestände			
	≤ VII	VIII	≥ IX	≤ VII	VIII	≥ IX	≤ VII	VIII	≥ IX	≤ VII	VIII	≥ IX	≤ VII	VIII	≥ IX	
a) Fläche	ha	242	317	124	75	94	38	10	19	5	64	68	37	34	33	3
b) deutlich geschädigt	ha (%)	47 (19)	60 (19)	19 (15)	3 (4)	2 (2)	4 (10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (5)	5 (7)	1 (3)	2 (6)	24 (73)	1 (33)
c) aufgelöst	ha (%)	28 (12)	134 (42)	71 (57)	1 (1)	3 (3)	3 (8)	0,1 (< 1)	0,4 (40)	2 (40)	0,2 (< 1)	2 (3)	1 (3)	0,7 (2)	0 (0)	0,6 (20)

In Laubholz- und Kiefernreinbeständen waren insgesamt nur sehr wenig Sturmschäden zu verzeichnen. Daher wurden diese Bestandesformen in der Zusammenstellung nicht berücksichtigt.

Um den Effekt unterschiedlicher Altersverteilungen in den verschiedenen Gruppen auf die Sturmwurfdisposition so weit als möglich zu reduzieren, wurden nur über 60-jährige (Fichtenalter) und somit vom Alter her besonders sturmwurfanfällige Bestände in die Auswertung einbezogen.

Erfasst wurden die Sturmschäden in 683 ha Fichtenreinbeständen und 480 ha Mischbeständen im Forstamt Kirchberg. Die Verteilung der Mischbestände auf die verschiedenen Standortsgrundformen ist derjenigen der Fichtenreinbestände sehr ähnlich (Mischbestände: ≤ VII: 38 %, VIII: 45 %, ≥ IX: 17 %; Fichtenreinbestände: ≤ VII: 36 %, VIII: 46 %, ≥ IX: 18 %).

Während in den Fichtenreinbeständen über alle Standortgrundformen hinweg mehr als ein Drittel der Fläche durch Sturmwurf verloren ging, war in den Mischbeständen nur ein Flächenanteil von 3 % aufgelöster Bestände zu verzeichnen. Auch der Anteil deutlich geschädigter Bestände (Vorratsverlust > 20 %) war in den Mischbeständen mit 9 % der Fläche deutlich geringer als in den Fichtenreinbeständen (18 % der Fläche). Wie bei den Fichtenreinbeständen sind auch bei den Mischbeständen die Sturmschäden auf den stauwasser beeinflussten Standorten weitaus gravierender, erreichen aber bei weitem nicht das Ausmaß der Schäden in den Fichtenreinbeständen. Während auf der Grundform \geq IX in den Fichtenreinbeständen 57 % der Fläche durch Sturmwurf vernichtet und weitere 15 % stark geschädigt wurden, waren es in den Mischbeständen nur 9 % aufgelöste und 8 % stark geschädigte Bestände.

Innerhalb des Kollektivs der Mischbestände ist das Schadausmaß in den Beständen mit hohen Fichtenanteilen deutlich größer. Dies ist erklärbar, da auch in den Mischbeständen überwiegend Fichten geworfen wurden. Die Frage, ob die Beimischung von Laubholz und Kiefern dazu beiträgt, auch die Fichtenanteile an der Bestockung zu stabilisieren, läßt sich aus dem vorliegenden Datenmaterial nicht beantworten. Auch sind weitere Differenzierungen in der Sturmwurfgefährdung zwischen den verschiedenen Mischbestandsgruppen aufgrund der zu geringen Besetzung der einzelnen Zellen in Tabelle 1 leider nicht möglich.

3.3 Fallstudie zur Genese von Sturmschäden

Mit Hilfe von 10 Fallstudien in besonders stark von Sturmwürfen betroffenen Revierteilen des Forstamtes Kirchberg wurde versucht, die zeitliche und räumliche Entwicklung der Sturmwürfe in Abhängigkeit von Standort, Baumart und Bestandeslagerung transparent zu machen.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft den Verlauf der Sturmschäden in den Abteilungen 66, 67, 70 und 71 des Reviers Brauschied für den Zeitraum 1977 bis 1986. In Luftbild 1977 zeigten sich bereits kleinere Sturmwurfblöcher und -gassen in 60- bis 85-jährigen Fichtenbeständen auf den Grundformen VIII und \geq IX. In Abteilung 71 begann der Sturmwurf auf einer kleinen Fläche der Standortgrundform \geq IX und breitete sich in den Folgejahren rasch aus. Bis 1981 haben sich die Sturmschäden ausgehend von den

Grundformen

- ≤ VII
- VIII
- IX & X

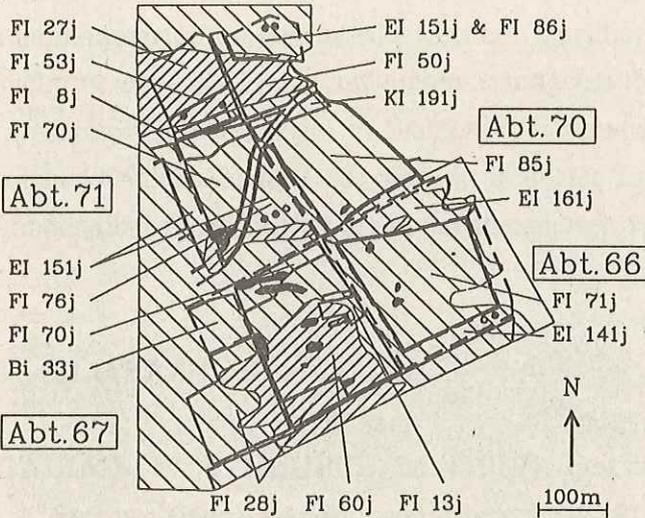
Baumarten

- Fichte
- Laubholz

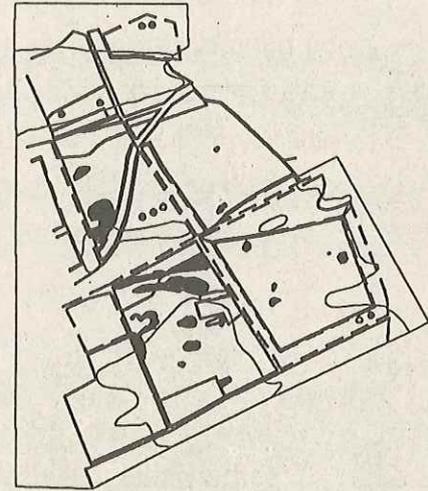
Sturmwurf

- Einzelwurf Fi
- Einzelwurf Lh
- Flächenwurf

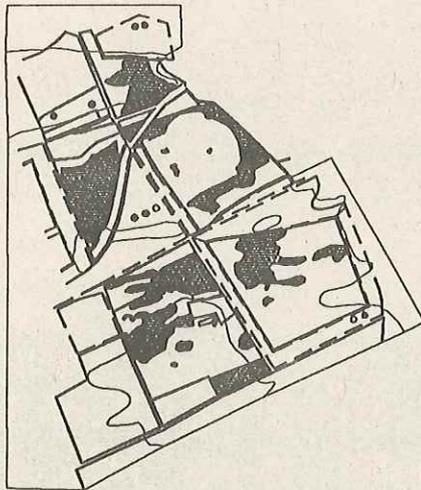
Stand 1977



Stand 1981



Stand 1984



Stand 1986

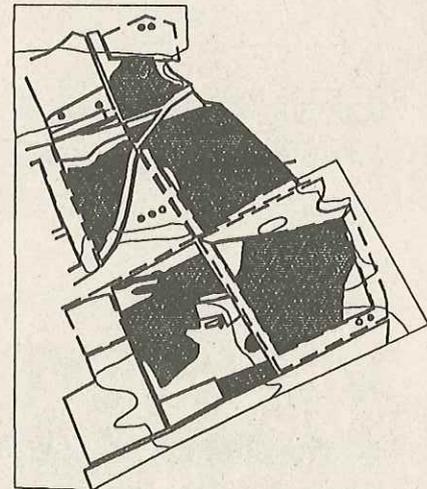


Abb.4: Genese der Sturmschäden in den Abt. 66, 67, 70 und 71 des Forstreviers Brauschied von 1977 bis 1986

bereits 1977 vorhandenen Löchern etwas ausgeweitet. Bis zum Sommer 1984 wurden der zu diesem Zeitpunkt 57-jährige Fichtenbestand im Norden der Abteilung 70 auf Grundform \geq IX und der 77-jährige Fichtenbestand in Abteilung 71 auf Grundform VIII nahezu vollständig geworfen. Auch in den übrigen Beständen auf den Standortsgrundformen VIII und \geq IX haben sich die Sturmwürfe 1981 bis 1984 deutlich ausgedehnt. An den Laubholzbeständen und -riegeln stoppten die Windwurfkeile. Allerdings konnten die Laubholzbestände und -riegel nicht den Sturmwurf in nachgelagerten älteren Fichtenbeständen verhindern. Dies dürfte auch darauf zurückzuführen sein, daß die 70- bzw. 85-jährigen Fichtenbestände zum Zeitpunkt des Sturmwurfes die 150-jährigen Eichenbestände in der Höhe bereits überragten. Die Übersicht über den Stand 1986 zeigt das gewaltige Ausmaß der Sturmschäden in diesem Bereich. Nahezu alle über 50-jährigen Fichtenbestände wurden flächig geworfen. Die Laubholzbestände und auch die Altkiefern in Abteilung 70 blieben weitgehend unversehrt. Lediglich im Eichenaltheil in Abteilung 71 gab es einzelne Würfe bei Eichen. Diese blieben aber unter 20 Efm/ha. Dagegen wurden in Laubholzbestände eingemischte ältere Fichten nahezu vollständig herausgeworfen.

Die übrigen Fallstudien (hier nicht dargestellt, vgl. Dokumentation Heupel/Gallus) zeigen vor allem, daß der Sturmwurf oft von der Standortsgrundform VIII und insbesondere \geq IX beginnt und dann auch auf die Standortsgrundformen \leq VII übergreifen kann. Auf den Grundformen VIII und \geq IX wurden häufig bereits verhältnismäßig junge Fichtenbestände geworfen, während auf benachbart gelegenen Standorten der Grundform \leq VII deutlich ältere Bestände standhielten.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Erhebungen zum Einfluß von Standortparametern und der Struktur von Waldgebieten und Einzelbeständen auf das Sturmschadensausmaß im Vorderen Hunsrück belegen, daß das seit den 80er Jahren deutlich ansteigende Ausmaß der Sturmschäden mit einem Hineinwachsen der Fichtenbestände in höhere, sturmwurffälligere Altersklassen einhergeht. Vor dem katastrophalen Sturmwurf im November 1984 waren zudem große Teile der Fichtenbestände durch vorangegangene, schwächere Stürme aufgerissen und damit für weitere Sturmschäden labilisiert worden.

Pseudovergleyte Standorte zeigten sich deutlich sturmwurffälliger als nicht oder nur schwach staunässebeeinflusste Standorte. In den Fichtenreinbeständen gingen auf den Staunässestandorten mehr als die Hälfte der Bestände durch Sturmwurf verloren. Dabei zeigten sich auch die Braunerde-Pseudogleye (Standortsgrundform VIII) bereits als sehr sturmwurffällig. Angesichts der weiten Verbreitung derartiger Standorte im Vorderen

Hunsrück dürfte der Aufbau einer annähernd "normalen" Altersklassenverteilung in der Fichte auch in der Zukunft erhebliche Schwierigkeiten bereiten, wenn nicht sogar unmöglich sein.

Da Laubbaumarten und Kiefern in diesem Raum deutlich weniger sturmwurfanfällig sind, waren auch in den Mischbeständen mit diesen Baumarten nur weitaus geringere Sturmschäden zu verzeichnen.

Um die Sturmschäden im Vorderen Hunsrück zu reduzieren, sollte der Anbau der Fichte auf den Braunerde-Pseudogleyen und den Pseudogleyen deutlich zugunsten von Laubbaumarten eingeschränkt werden. Darüberhinaus sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, die Fichte auf diesen Standorten durch waldbauliche Maßnahmen zu stabilisieren. Laubholzriegel in Fichtenreinbestandskomplexen alleine können keinen ausreichend Schutz bieten. Sie sind zwar in der Lage, Sturmwurfkeile zu unterbrechen, können aber nicht Sturmwurf in nachgelagerten Fichtenbeständen verhindern.

5 LITERATUR

GALLUS, M. u. HEUPEL, M. (1987): Feststellung von Beziehungen zwischen Sturmschäden, Standort und Bestandesstruktur bei der Baumart Fichte im Rahmen des Projekts "SIMS", unveröffentlichte Untersuchung der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Trippstadt

Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wipfelköpfungen auf Pseudogleyböden

M. Heupel und J. Block

1 EINLEITUNG

Die Wipfelköpfung von Randfichten ist eine in Rheinland-Pfalz vielfach angewandte Maßnahme zur vorsorgenden Sicherung sturmwurfgefährdeter oder zur Stabilisierung bereits angebrochener Fichtenbestände. Allein in den Jahren 1985 bis 1987, also nach dem verheerenden Novembersturm 1984, wurden Wipfelköpfungen im Gemeinde- und Privatwald mit etwa 300 000,-- DM von der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz gefördert. Es war daher von erheblichem Interesse, die Wirksamkeit dieser Maßnahme festzustellen. Hierzu boten sich die umfangreichen Aufnahmen zur "Feststellung von Beziehungen zwischen Sturmschäden, Standort und Bestandesstruktur bei der Baumart Fichte" (GALLUS und HEUPEL 1987) im Rahmen des SIMS-Projektes an. Aufbauend auf diesen Daten und eine Erweiterung der Datenbasis auf wipfelgeköpfte Bestände auch außerhalb des Vorderen Hunsrück soll mit der vorliegenden Untersuchung die Wirksamkeit der Wipfelköpfung und deren Wirkungsdauer sowie die Abhängigkeit der Wirksamkeit und der Wirkungsdauer von Parametern wie Standort, Bestandesalter, Ausführungsmodus oder anderen Einflußgrößen waldbautechnischer Natur überprüft werden.

2 MATERIAL UND METHODEN

Da experimentell ausgerichtete Versuchsreihen zur Ermittlung der Wirksamkeit von Wipfelköpfungen nicht zur Verfügung stehen, muß auf die Möglichkeit einer massenstatistischen Auswertung von Erhebungen in geköpften und ungeköpften Fichtenbeständen abgehoben werden.

In die Auswertung wurden 256 Bestände mit Wipfelköpfungsmaßnahmen in den Forstämtern Boppard, Entenpfuhl, Kastellaun, Kirchberg, Montabaur, Rennerod, Rhaunen, Simmern, St. Goar und Zell einbezogen. Für die geköpften Bestände wurden die Ausführungsnachweise der Köpfungsmaßnahmen erfaßt und die Revierleiter dazu befragt. Folgende Parameter wurden aufgenommen:

- Zeitpunkt der Maßnahme
- Bestandesalter zum Zeitpunkt der Köpfung
- nach der Köpfung erfolgte Sturmwürfe
- standörtliche Verhältnisse
- ertragskundliche Daten
- Ausführungsmodus (z.B. entnommene Kronenanteile, Tiefe der Köpfungszone, Zusatzastungen, Nachköpfungen)
- allgemeine Fragen (z.B. räumliche Ordnung, biotische Schäden, allgemeine Sturmwurf-situation).

Mit Hilfe der engagierten Mitarbeit der Amtsleiter und Revierbeamten konnten Köpfungsmaßnahmen bis Ende der 50er Jahre zurück rekonstruiert werden. Die überwiegende Mehrzahl der Maßnahmen erfolgte allerdings nach 1970.

Weiterhin standen die Daten von 600 unbehandelten Beständen aus einer Vollerhebung des Forstamtes Kirchberg durch GALLUS und HEUPEL (1987) zur Verfügung.

Alle in die Erhebung einbezogenen Bestände wurden nach den Merkmalen "geworfen/nicht geworfen", "geköpft/nicht geköpft", "Altersklasse zum Zeitpunkt der Köpfung" und "Standortsgrundform (\leq VII, VIII, \geq IX) klassifiziert. Ein Bestand wurde als "geworfen" eingestuft, sofern er mindestens 30 % des Vorrates durch Sturmwurf eingebüßt hatte. Dieser Wert wurde etwas höher angesetzt als der von THOMASIUS (1973) ermittelte Wert für den Grundflächenverlust von 15 %, oberhalb dessen es zu Zuwachsverlusten kommt.

Die Auswertung der Daten erfolgte sowohl mit Hilfe eines von HÜTTE (1983) angewandten Quotenvergleichsverfahrens ("geworfen/nicht geworfen") als auch über ein an der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz angepaßtes statistisches Analyseverfahren für diskrete Daten (Logit-Modelle) (WUNN 1989).

Das Quotenvergleichsverfahren bezieht sich ausschließlich auf die Grundgesamtheit der geköpften Bestände. Als "mit Erfolg behandelt" gelten in Anhalt an HÜTTE (1983) hier alle Köpfungsbestände, die zum Zeitpunkt der Aufnahme (hier 1986/87) nicht geworfen sind.

Bei der statistischen Auswertung mit Hilfe sogenannter loglinearer Modelle wurden dagegen auch nicht geköpft Bestände in die Auswertung einbezogen. Die verschiedenen in die Auswertung einfließenden Parameter wie Altersklasse, Standortsgrundform, Standfestigkeit und Behandlung werden mit diesen Modellen auf Wechselbeziehungen und Abhängigkeiten überprüft. Der gewählte Modellansatz ermöglicht die Aufdeckung auch mehrdimensionaler Abhängigkeiten, das heißt, es werden auch Merkmalskombina-

tionen in die Beurteilung einbezogen. Die einzelnen Parameter werden auf Signifikanz getestet; Wechselwirkungen, die keinen Einfluß besitzen, werden aus dem Modellansatz eliminiert.

3 ERGEBNISSE

Der tabellarische Quotenvergleich zeigt eine "Erfolgsquote" von 73 % auf den Standortsgrundformen \leq VII, 48 % auf Standortsgrundform VIII und 35 % auf den Standortsgrundformen \geq IX (Tab. 1). In jüngeren Beständen scheint die Erfolgsquote bei den Standortsgrundformen \leq VII zu überwiegen.

**Tab. 1: Wirkung der Wipfelköpfung (Quotenvergleich) mE = mit Erfolg
oE = ohne Erfolg**

Standorts- grundform	A L T E R S K L A S S E								Standortsgrundform			
	II		III		IV		V		mE		oE	
	mE	oE	mE	oE	mE	oE	mE	oE	abs.	rel.	abs.	rel.
\leq VII	22	6	17	9	14	5	8	2	61	73	22	27
VIII	12	9	6	11	8	6	4	7	30	48	33	52
\geq IX	19	22	12	24	4	18	4	7	39	35	71	65
abs. (Stck)	53	37	35	44	26	29	16	16	130		126	
Σ rel. (%)	59	41	44	56	47	53	50	50		51		49

Zur statistischen Auswertung unter Einbeziehung der Daten auch nichtgeköpfter Bestände wurde ein Logit-Modell an die nachfolgende Kontingenztafel angepaßt (Tab. 2). In dieser Tabelle sind die wesentlichsten Daten aller Untersuchungsbestände zusammengefaßt.

Das nach Eliminierung nicht signifikanter Effekte resultierende Modell sowie die Modellparameter sind detailliert in HEUPEL u.a. 1989 beschrieben. Im Wesentlichen brachte die Modellanpassung folgende Ergebnisse:

- geköpft Bestände werden trotz dieser Sicherungsmaßnahme zu einem höheren Anteil geworfen als ungeköpft;

- Bestände der zweiten Altersklasse sind deutlich weniger gefährdet als ältere Bestände;
- Bestände auf den Grundformen \leq VII werden weit seltener geworfen als Bestände auf den Grundformen VIII und \geq IX.

Tab. 2: Kontingenztafel aller aufgenommenen Bestände (arabische Zahlen = Anzahl Fichtenbestände)

a) Standfestigkeit : geworfen Wipfelköpfung : geköpft			Altersklasse			
	n_{k1}		II	III	IV	V
Standorts- grund- form	\leq VII		6	9	5	2
	VIII		9	11	6	7
	\geq IX		22	24	18	7
a) Standfestigkeit : geworfen Wipfelköpfung : nicht geköpft			Altersklasse			
	n_{k1}		II	III	IV	V
Standorts- grund- form	\leq VII		1	5	13	9
	VIII		3	36	46	31
	\geq IX		11	35	25	12
a) Standfestigkeit : nicht geworfen Wipfelköpfung : geköpft			Altersklasse			
	n_{k1}		II	III	IV	V
Standorts- grund- form	\leq VII		22	17	14	8
	VIII		12	6	8	4
	\geq IX		19	12	4	4
a) Standfestigkeit : nicht geworfen Wipfelköpfung : nicht geköpft			Altersklasse			
	n_{k1}		II	III	IV	V
Standorts- grund- form	\leq VII		53	22	25	30
	VIII		47	24	19	18
	\geq IX		22	13	4	4

Neben diesen Einzeleinflüssen der Parameter "Köpfung", "Altersklasse" und "Standortsgrundform" zeigte sich eine zusätzliche Mehrfachwechselwirkung zwischen Köpfung und Altersklasse einerseits und dem Erfolg der Köpfung andererseits. Junge geköpft Bestände scheinen leichter geworfen zu werden als andere.

Um den Einfluß einer unterschiedlichen regionalen Herkunft der Daten der geköpften Bestände (10 Forstämter im nördlichen Teil des Landes Rheinland-Pfalz) und der nicht geköpften Vergleichsbestände (nur Forstamt Kirchberg/Hunsrück) zu überprüfen, wurde eine zweite statistische Analyse ausschließlich mit Daten aus dem Forstamt Kirchberg durchgeführt. Sie erbrachte jedoch keine abweichenden Ergebnisse (vgl. HEUPEL u.a. 1989).

Eine Wipfelköpfung muß betriebswirtschaftlich als zweckmäßig angesehen werden, wenn der Sturmwurf mit Hilfe der Köpfung so lange herausgezögert werden kann, daß der Bestandeswertzuwachs auf der geschützten Fläche die Kosten der Köpfung deutlich übersteigt. Der hierzu benötigte Zeitraum variiert in Abhängigkeit von Ertragsklasse, Bestandesalter zum Zeitpunkt der Köpfung und dem Flächenverhältnis zwischen Köpfungszone und nachgelagertem Hauptbestand (vgl. ROEDER und DEINET 1989). Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung auch der Frage nachgegangen, wie lange ein geköpfter Bestand in Abhängigkeit vom Bestandesalter zum Zeitpunkt der Köpfung und den Standortverhältnissen stehen bleibt.

Über alle Standorte sind etwa 60 bis 80 % der Sturmwürfe in Köpfungsbeständen bereits innerhalb von 5 Jahren, zum Teil bereits innerhalb von 2 Jahren nach der Maßnahme aufgetreten. Bestände auf stärker vernäbten Standorten (Grundformen VIII, IX und X) sind nicht nur in größerem Umfang, sondern auch eher nach der Köpfungsmaßnahme geworfen worden als auf nicht oder weniger wasserbeeinflusste Standorten (Grundformen \leq VII). Von 173 geköpften Beständen auf vernäbten Standorten (Grundformen \geq XIII) sind 63 Bestände innerhalb von zwei Jahren dem Sturm zum Opfer gefallen. Auf nicht vernäbten Standorten haben dagegen nur 13 der insgesamt 84 geköpften Bestände die ersten zwei Jahre nach der Köpfung nicht überstanden.

Ältere Bestände wurden meist etwas stärker und auch rascher nach der Maßnahme von Sturmwürfen betroffen als jüngere Bestände.

Um den Einfluß der Ausführungsmodalitäten auf den Köpfungserfolg zu bewerten, wurden die tatsächlichen Ausführungsmodi mit den diesbezüglichen Empfehlungen des Instituts für Waldbautechnik der Universität Göttingen (1969) verglichen.

Im Durchschnitt über alle Köpfungsmaßnahmen wurden etwa 50 % der Kronenlänge entnommen. Entnahmeanteile von \leq 40 % wurden in etwa 20 % der untersuchten Köpfungsbestände festgestellt. Hiervon sind 33 % von Sturmwürfen betroffen worden,

also etwas weniger als der Durchschnitt der Köpfungsbestände. Entnahmen von mehr als 60 % der Kronenlänge sind in 18 % der untersuchten Bestände festzustellen. Jeder Dritte dieser Bestände ist durch Borkenkäfer befallen, allerdings nur vereinzelt mehr als 10 % der geköpften Stämme.

Zur Tiefe der Köpfungszone liegen für 96 der 256 untersuchten Köpfungsbestände Angaben vor. 18 % der Köpfungszonen weisen nicht die erforderliche Tiefe einer Baumlänge auf.

In keinem der untersuchten Köpfungsbestände sind Hinweise auf die auf Pseudogley-Standorten empfohlene Köpfung von vorwüchsigen Fichten im Hauptbestand zu finden. Nachköpfungen gibt es lediglich in 3 von 256 Beständen. Zusatzastungen konnten in 6 Fällen nachgewiesen werden, wobei jedoch eine entsprechende Dokumentation häufig fehlt. Die empfohlene Schnittflächenbehandlung mit Holzteer o.ä. ist nur bei 10 Maßnahmen durchgeführt worden. Eine Vitalitätsdüngung zur Vorbereitung des Bestandes auf die Köpfung bzw. nach der Maßnahme wurde an 4 Beständen vorgenommen.

Zusammenfassend ergab die Analyse der Ausführungsmodi, daß in der Mehrzahl der Fälle die Empfehlungen des Instituts für Waldbautechnik der Universität Göttingen beachtet wurden. Allerdings unterblieben Nachköpfungen und Vorwuchsköpfungen auf labilen Standorten fast immer. Ob die unterlassenen Nachköpfungen einen Einfluß auf die Wirksamkeit der Maßnahmen insgesamt hatten, konnte aufgrund der Struktur des Datenmaterials nicht abgesichert werden. Dieser Einfluß ist jedoch wenig wahrscheinlich, da in der Mehrzahl der Fälle die Sturmwürfe bald nach der Köpfung eingetreten sind.

4 DISKUSSION

Bei der Beurteilung der Wirksamkeit von Wipfelköpfungen ergibt sich die grundsätzliche Frage, was als wirksam gewertet werden soll. Beim Quotenvergleich "geworfen/nicht geworfen" werden nur geköpfte Bestände berücksichtigt. Als "mit Erfolg behandelt" werden Bestände bezeichnet, die eine bemessene Anzahl von Jahren ohne gravierende Sturmschäden überstehen (HÜTTE 1983). Dies impliziert jedoch, daß die Bestände ohne Behandlung innerhalb dieses Zeitraumes geworfen worden wären, was kaum zweifelsfrei nachzuweisen ist.

Andererseits ist der Vergleich zwischen Kollektiven geköpfter und

nicht geköpfter Bestände auch mit Problemen behaftet, da die zu köpfenden Bestände in der Praxis nicht nach dem Zufallsprinzip, sondern gezielt nach dem Kriterium "besonders sturmwurfgefährdet" ausgewählt werden.

Dieses Grundproblem läßt sich kaum befriedigend lösen. Trotz dieser Einschränkungen können aus der vorliegenden großstatistischen Untersuchung eine Reihe wesentlicher Hinweise in Bezug auf die Ausgangsfragestellung abgeleitet werden.

Von 251 beurteilten Maßnahmen weisen zum Aufnahmezeitpunkt 1986/87 nur 51 % der behandelten Bestände keine sturmwurfbedingten Vorratsverluste von ≥ 30 % auf. Diese Erfolgsquote ist deutlich ungünstiger als die von HÜTTE (1983) ermittelte Quote von 91 % unversehrter Bestände bei 186 untersuchten Köpfungsmaßnahmen. Besonders ausgeprägt sind die Unterschiede beider Untersuchungen bei den deutlich stauwasserbeeinflussten Standorten. Während HÜTTE auf Standorten mit Stauhohizont in weniger als 40 cm Bodentiefe von 21 geköpften Beständen 13 (62 %) unversehrt findet, hielten nach der vorliegenden Untersuchung auf solchen Standorten nur 40 % der geköpften Bestände dem Windangriff stand.

Die statistische Auswertung des Datenmaterials unter Einbeziehung nicht geköpfter Bestände zeigt, daß geköpfte Bestände eine höhere Ausfallquote haben als nicht geköpfte Bestände. Dieses Ergebnis wird sicherlich durch die besondere Gefährdungssituation der zur Wipfelköpfung ausgewählten Bestände beeinflusst. Dies wird besonders deutlich an der Beobachtung, daß junge geköpfte Bestände leichter geworfen werden als alle anderen (vgl. Kap. 3). Da nicht anzunehmen ist, daß die Köpfungsmaßnahme als solche ein erhöhtes Wurfrisiko herbeiführt, dürfte dieses Ergebnis darauf zurückzuführen sein, daß junge Bestände nur bei einer besonders hohen Gefährdungslage geköpft werden. Durch die Wipfelköpfung gelingt es jedoch nicht, die besondere Gefährdungssituation der geköpften Bestände auf das "normale" Maß zu reduzieren. Da als Vergleichskollektiv nur Bestände aus dem besonders sturmwurfbetroffenen Forstamt Kirchberg verwendet werden, ist das Ergebnis eher konservativ. Im Forstamt Kirchberg dürfte das Sturmwurfrisiko auch für unbehandelte Bestände durch die Gemengelage vernäbter und nicht vernäbter Standorte und die extrem häufigen Sturmwurfanrisse im Vergleich zu den anderen in diese Untersuchung einbezogenen Forstämtern besonders hoch sein.

Die Standortsgegebenheiten üben einen entscheidenden Einfluß auf die Sturmfestigkeit der Bestände und auf die Wirksamkeit der Wipfelköpfungen aus. Auf den wenig oder nicht stauwasserbeeinflussten Standorten sind von den ungeköpfen Beständen weniger als ein Fünftel, von den geköpften Beständen ein Viertel vom Sturm geworfen worden. Auf den mäßig stauwasserbeeinflussten Standorten (Grundform VIII) sind es bei beiden

Kollektiven bereits die Hälfte, auf den stark stauwasserbeeinflussten Standorten zwei Drittel der in die Erhebung einbezogenen Bestände. Auch HÜTTE (1983) stellte fest, daß die Wirksamkeit der Wipfelköpfung vom Standort abhängt. Nach seinen Untersuchungen werden geköpftete Bestände nur bei hoch anstehendem Stauhorizont geworfen.

Die Einflüsse von unsachgemäßer oder unvollständiger Ausführung der Köpfungsmaßnahmen auf deren Wirksamkeit können aus der vorliegenden Arbeit nicht hinreichend abgeschätzt werden. Der entnommene Kronenanteil und die Tiefe der Köpfungszone war bei der überwiegenden Zahl der untersuchten Maßnahmen angemessen. Andererseits sind Zusatzastungen und Nachköpfungen in aller Regel unterblieben. Da insgesamt aber mehr als zwei Drittel der Sturmwürfe in den geköpften Beständen bereits innerhalb von 5 Jahren nach der Maßnahme auftraten, ist ein gravierender Einfluß der unterlassenen Nachköpfungen eher unwahrscheinlich.

Nach der vorliegenden Untersuchung zeigen Wipfelköpfungen vor allem auf staunassen Standorten einen erheblich geringeren Wirkungsgrad als bislang angenommen (STOCK 1926, HÜTTE 1964, 1967, 1983, MASCHER 1965, von JENA 1967, OEHLER 1969). Auf vernässten Standorten überdauerte nur jede dritte Maßnahme die bis 1986/87 aufgetretenen Stürme. Wie Berechnungen von ROEDER u. DEINET (1989) zeigen, spricht dieses Ergebnis jedoch nicht generell gegen Wipfelköpfungen. Allerdings sollten die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bei Kosten/Nutzen-Analysen von Wipfelköpfungen berücksichtigt werden. ROEDER u. DEINET (1989) haben hierzu entsprechende Wahrscheinlichkeitstabellen entwickelt, in denen die Risikolage für staunasse und stabile Standorte gesondert betrachtet wird. Diese Tabellen sollten zur Entscheidungsfindung, ob im konkreten Fall eine Wipfelköpfung zweckmäßig ist oder nicht, herangezogen werden. Generell zeigen sie, daß auf staunassen Standorten ab einem Köpfungsalter von 50 Jahren der Nettonutzen stark abfällt und bereits im Alter 70 die absolute Nutzwelle unterschreitet.

5 LITERATUR

GALLUS, M. u. HEUPEL, M. (1987): Feststellung von Beziehungen zwischen Sturmschäden, Standort und Bestandesstruktur bei der Baumart Fichte im Rahmen des Projektes "SIMS", unveröffentlichte Untersuchung der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Trippstadt

HEUPEL, M., BLOCK, J., DEINET, A., WUNN, U. (1989): Empirische Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wipfelköpfungen von Fichtenbeständen auf Pseudogleyböden. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 11/89, S. 1-45

HÜTTE, P. (1964b): Sturmschutz in Fichtenbeständen. Allg. Forst Zeitung 19: S. 356-358

HÜTTE, P. (1967b): Möglichkeiten und Grenzen der Absicherung angebrochener Fichtenbestandesränder. Forsttechn. Informationen, S. 87-93

HÜTTE, P. (1983): Die Absicherung angebrochener Fichtenbestandesränder gegen Sturmschäden in Abhängigkeit von Durchforstungsstärke und Standort. Forstw. Cbl., S. 343-349

INSTITUT FÜR WALDBAUTECHNIK DER UNIVERSITÄT GÖTTINGEN (1969): Merkblatt über die Absicherung angebrochener Fichtenbestände mittels Kronenentwipfelung. Waldarbeit (Straßenhaus) 20 (9): S. 237

JENA, K.-E. v. (1967): Erfahrungen mit Wipfelköpfung von Fichten in einem Privatrevier des Westharzes. Forsttechn. Informationen, S. 94-96 u. (12) S. 104

MASCHER, R. (1965): Die Sicherung sturmgeschädigter Fichtennachwuchsbestände durch Wipfelköpfung. Der Forst- u. Holzwirt 20: S. 284

OEHLER, H. (1967): Die Sturmgefährdung der Fichte. Allg. Forst Zeitung 22: S. 312-313

OEHLER, H. (1969): Künftige Behandlung durch den Sturm aufgerissener Bestände und Wiederaufforstung der Sturmflächen. Allg. Forst Zeitung 24: S. 567-568

ROEDER, A. u. DEINET, A. (1989): Betriebswirtschaftliche Untersuchungen zur Wipfelköpfung von Fichte (*Picea abies* (L.) KARST). Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 11/89, S. 1-59

STOCK (1926): Technische Sturmsicherung. Silva, S. 137-141

THOMASIUS, (1973): Studie über das weitere Wachstum und die Regenerationsfähigkeit sturmgeschädigter Fichtenbestände im Mittelgebirge. *Soz. Forstwirtschaft* 23, S. 170-175

WUNN, U. (1989): Die Analyse diskreter Daten mit Hilfe von loglinearen Modellen. *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz*, Nr. 11/89, S. 1-14

Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf Braunerde-, Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyböden im Vorderen Hunsrück

N. Rastin

1 EINLEITUNG

Nach der traditionellen Interpretation des Wirkens von Staunässe auf Wurzeln der Fichte ist Sauerstoffmangel in den tiefen, vernähten Horizonten verantwortlich für die Flachwurzelligkeit der Fichte (KÖSTLER et al. 1968). Ziel dieses Teils der Untersuchungen war es, festzustellen, ob der Wassergehalt des Bodens der einzige begrenzende Faktor für die Flachwurzelligkeit der Fichte auf Pseudogleyböden ist.

2 ALLGEMEINES ÜBER DIE UNTERSUCHTEN FLÄCHEN

Die drei untersuchten Flächen liegen im Wuchsbezirk Östliche Hunsrückhochfläche, im Forstamt Simmern, Forstrevier Kisselbach, in einer Höhe von 440-455 m über NN (submontan). Es handelt sich um etwa 80jährige Fichtenbestände (*Picea abies* [L.] Karst.) auf schluffigem Lehm mit ähnlichem geologischen Ausgangssubstrat (devonische Tonschiefer, überlagert von unterschiedlich mächtigen und heterogen strukturierten Deckschichten), aber unterschiedlichen Trockenraumdichten und hydrologischen Verhältnissen. Eine der untersuchten Flächen ist ein Pseudogley (Grundform IX). Bei der zweiten Fläche handelt es sich um einen Braunerde-Pseudogley (Grundform VIII), und die dritte Fläche ist eine Braunerde (Grundform III).

Die Flächen VIII und IX befinden sich in Abteilung 10 und sind etwa 30 m voneinander entfernt. Fläche III liegt in Abteilung 21 a in einer Entfernung von etwa 150 m bzw. 180 m von Grundform VIII bzw. IX.

Bei den Grundformen III und IX handelt es sich um die gleiche Fläche, in der die Depositionsmessungen erfolgten (RASTIN 1991a), bei Grundform VIII jedoch um eine andere Fläche, die etwa 30 m entfernt von Standortgrundform IX liegt.

3 MATERIALIEN UND METHODEN

3.1 Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung

Die Durchwurzelungstiefe und -verteilung der drei untersuchten Standorte wurden an 15 - 20 m langen und 1.5 - 2 m tiefen Schurfgräben untersucht. Bei der Anlage der Gräben auf den drei untersuchten Flächen wurde darauf geachtet, daß sich in bezug auf Standplatz, Bestockungsgrad, Zahl und Verteilung der Bäume um die Gräben etwa vergleichbare Verhältnisse ergaben.

Die Erfassung der Durchwurzelungstiefe und -verteilung erfolgte nach dem Verfahren von BÖHM (1979). Dabei wurde ein Metallgitter (1 x 1 m) an der Profilwand befestigt und die Fein- (1-2 mm), Schwach- (2-5 mm), Grob- (5-10 mm) und Starkwurzeln (über 10 mm) am Schurfgraben innerhalb kleiner Flächen (1 x 1 dm) gezählt. Bei Feinwurzeln wurden nur lebende, bei Schwach-, Grob- und Starkwurzeln zusätzlich auch die toten Wurzeln gezählt.

3.2 Bodenchemischer Zustand

Da der bodenchemische Zustand in den obersten Bodenhorizonten innerhalb weniger Zentimeter stark variieren kann und da die Intensivwurzelschicht auf die obersten 40 cm Bodentiefe konzentriert ist, wurden für die Ermittlung des bodenchemischen Zustands der drei untersuchten Standortvarianten vor dem Anlegen der Schurfgräben je Fläche 10 Bohrproben ($\phi = 8$ cm) genommen. Die Probenahme erfolgte von 0-5, 5-10, 10-20 und 30-40 cm Bodentiefe (MURACH 1984). Die Proben von je drei Bohrkernen wurden zu je einer Mischprobe vereinigt. An jeder Probe wurden $\text{pH}_{(\text{CaCl}_2)}$, Gesamtgehalt an C, N und P, die effektive Austauschkapazität und die austauschbaren Kationen ermittelt (MEIWES et al. 1984).

Zusätzlich zu den o.g. Untersuchungen wurden am Schurfgraben (14-20 m lang; 1.5 - 2 m tief) ebenfalls Bodenproben genommen. Die Probenahme erfolgte im Abstand von je 2 Meter entlang des Schurfgrabens, getrennt nach den Bodenhorizonten. Die entnommenen Proben von je 4 m wurden zu einer Mischprobe vereinigt und auf die o.g. chemischen Parameter untersucht.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in RASTIN und ULRICH (1990 a und b) und RASTIN (1991b) ausführlich beschrieben worden. Hier werden daher nur die wichtigsten Ergebnisse kurz mitgeteilt.

4.1 Bodenchemische Verhältnisse

In allen drei Standorten waren die Oberböden stark versauert. Im Bereich der Intensivwurzelschicht (die obersten 40 cm) lagen die pH-Werte mit Werten zwischen 3.1 bis 3.9 (Tab. 1) im Aluminium/Eisen- bzw. Aluminium-Pufferbereich. Entsprechend der niedrigen pH-Werte zeigten die säurebildenden Kationen H, Al, Fe, Mn sehr hohe Anteile an der effektiven Austauschkapazität.

Die basenbildenden Kationen K, Ca und Mg lagen dagegen extrem niedrig und machten zusammen 4 bis maximal 7 % der effektiven Austauschkapazität aus. Alle o.g. Merkmale, zusammen mit dem hohen C-Gehalt im Oberboden, wiesen auf Huminstoffinfiltration (Podsolierung) in allen drei untersuchten Standortgrundformen hin.

Bei der Braunerde war der Boden stark versauert und arm an den Nährelementen K, Ca und Mg. Beim Braunerde-Pseudogley und dem Pseudogley waren dagegen die Böden in tieferen Horizonten (ab etwa 50 cm Bodentiefe) mit den Nährelementen Ca und besonders Mg gut versorgt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß alle drei untersuchten Flächen im Oberboden sehr arm an den Nährelementen Ca und Mg waren, jedoch eine etwas bessere K-Versorgung zeigten. Im Unterboden dagegen wiesen die vernäßten Flächen trotz niedriger pH-Werte eine wesentlich höhere Basensättigung auf als die Braunerde.

Tab. 1: Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen am Schurfgraben
(Mittelwerte von je 3 bis 5 Wiederholungen)

Standort	Horizont (cm)	Austauschbare Kationen (% an AKe)								AKe umol (eq)/g	pH CaCl ₂		
		H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al				
Braunerde	A	0-5	10.6	0.5	1.5	3.7	1.7	7.4	3.0	71.6	105.3	3.30	
		-10	0.3	0.8	1.8	1.3	1.2	1.4	8.7	84.5	67.0	3.70	
		-20	0.2	0.8	2.3	1.2	1.2	0	5.8	88.6	54.8	3.80	
		-30	0.3	0.8	3.2	1.2	1.2	0	5.3	87.9	61.5	3.75	
		-40	1.2	0.8	3.5	1.3	1.3	0	5.2	86.5	65.3	3.75	
	B _v	-84	1.1	0.7	2.8	2.5	2.3	0	2.6	86.5	80.4	3.80	
	Braunerde-Pseudogley	AS _w	0-5	6.4	0.8	1.7	2.8	1.0	1.7	9.6	75.0	87.9	3.35
			-10	0	1.9	2.7	1.3	0.8	0.4	13.7	79.5	58.3	3.75
			-20	0	1.0	3.5	1.4	0.8	0	14.4	78.6	50.0	3.93
			-30	0	1.4	4.5	1.6	0.8	0	12.0	79.7	42.9	3.95
-40			0	1.3	5.2	1.9	0.9	0	9.2	81.6	42.5	3.97	
S _a		-110	1.6	1.2	2.6	9.4	19.2	0	2.6	63.5	78.9	3.94	
Pseudogley		AS _w	0-5	16.8	0.4	1.2	5.5	1.3	5.5	5.5	63.6	99.4	3.07
	-10		6.5	0.6	1.8	1.6	0.9	1.5	6.6	80.6	53.5	3.47	
	-20		2.5	0.6	2.2	1.5	1.1	0.1	8.9	83.0	48.0	3.65	
	-30		4.1	0.9	2.6	2.1	2.2	0.1	4.1	83.9	63.9	3.52	
	-40		4.1	0.6	2.7	3.1	4.0	0	3.0	82.3	76.7	3.50	
	S _w	-57	1.9	0.8	2.2	1.8	1.7	0	2.9	88.7	63.2	3.76	
	S _a	-150	2.1	1.7	1.9	20.7	33.8	0	1.3	38.7	85.7	4.13	

4.2 Wurzelverteilung und Durchwurzelungstiefe

Feinwurzeln

In allen drei Flächen waren die Humusaufgabe und die obersten 10 cm Bodentiefe von einem dichten Feinwurzelfilz besetzt (Tab. 2). Dabei zeigt der Braunerde-Pseudogleyboden eine deutlich höhere Feinwurzelintensität als die Braunerde und der Pseudogley. Die gewöhnlich starke Anreicherung der Feinwurzeln der Bäume im Oberboden ist auf den hohen, mit zunehmender Tiefe aber meist rasch abnehmenden Humusgehalt und bessere Nährstoffversorgung zurückzuführen. Dabei spielen zusätzlich die Wärme und gute Durchlüftung eine Rolle. Bis zu 40 cm Tiefe waren die Böden verhältnismäßig gut durchwurzelt. Danach nahm die Zahl der Feinwurzeln stark ab, so daß ab 70 cm Tiefe die Feinwurzeln nur noch vereinzelt zu finden waren. Die am tiefsten reichenden Feinwurzeln wurden bei der Braunerde in 120 cm, beim Braunerde-Pseudogley in 110 cm und beim Pseudogley in 150 cm Tiefe gefunden, also in einem Bereich, der längere Zeit unter direktem Stauwassereinfluß steht. Dieses widerspricht den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen mit einjährigen Fichtensämlingen in Einzelbeobachtungskästen (LEIBUNDGUT et al. 1963). Die Bestimmung der Durchwurzelungstiefe und -verteilung wurde Anfang Oktober durchgeführt, in einer Zeit, in der der Boden sehr trocken war. Daß dichter Ton (ohne Pseudovergleyung) leicht durchwurzelt wird, ist in der Literatur bekannt und wird dadurch erklärt, daß die feinen Bodenteilchen des Tones von den Wurzelspitzen beiseitegeschoben werden (KÖSTLER et al. 1968). Aussagen über den mechanischen Widerstand, den ein Boden den Wurzeln gegenüber aufweist, oder über die "mechanische Energie" von Wurzeln basieren jedoch auf vergleichenden Beobachtungen und indirekten Schlußfolgerungen und sind noch weitgehend ungeklärt. Beim Durchdringen der Fein- und Schwachwurzeln in den S_d -Horizont spielt sehr wahrscheinlich die Mykorrhiza eine wichtige Rolle. Bei unseren Untersuchungen über die Zahl der mykorrhizierten Wurzelspitzen haben wir in Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyböden in wasserbeeinflußten Horizonten Mykorrhizen beobachtet, die sich morphologisch von denen in Braunerdeböden deutlich unterscheiden. Weitere Untersuchungen über die Mykorrhizaformen und ihre physiologische Bedeutung auf Pseudogleyböden könnten wertvolle Ergebnisse liefern.

Die Zahl der Feinwurzeln im S_d -Horizont im Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyboden war im Vergleich zum B-Horizont im Braunerdeboden verhältnismäßig gering (Abb. 1a - c). Die Feinwurzeln waren auch entlang der Gräben nicht so gleichmäßig verteilt wie im B-Horizont, sondern kamen konzentriert in kleinen Flächen vor, die

Tab. 2: Summen der gezählten Wurzeln in verschiedenen Tiefen entlang einem 13 m langen Schurfgraben bei den Grundformen III, VIII und IX

Tiefe	Feinwurzel (1-2 mm)				Schwachwurzel (2-5 mm)				Grobwurzel (5-10 mm)				Starkwurzel (über 10 mm)								
	III		IX		III		IX		III		IX		III		IX						
	leb	tot	leb	tot	leb	tot	leb	tot	leb	tot	leb	tot	leb	tot	leb	tot					
Humus	1019	1544	1014		341	295	346		19	2	42	1	34	1	11	4	27	2	32		
0-10	474	1194	703		170	144	84	122	69	10	24	15	51	14	17	7	10	13	8	2	16
-20	279	401	411		75	55	61	44	68	38	3	18	13	17	6	7	4	5	3	8	
-30	161	193	234		33	36	40	24	49	8	4	2	6	3	11	3	4	5	2	1	
-40	72	118	152		28	4	35	6	34	3	4	1	5	4	2	4	4	2	1		1
-50	72	45	66		16		4	1	19		1		1	1	2	1	2				
-60	41	55	74		6	20			11		2	1				1	2				
-70	22	47	17		7	8			7		1										
-80	11	9	11		3	1			2		2										
-90	6	2	3		3	2			3		3										
-100	6	4	12		1				2		2										
-110		3	5						3		3										
-120	8		1		1				2		2										
-130			2						1		1										
-140			4						1		1										
-150									1		1										

sich morphologisch nicht von den anderen Flächen unterschieden. Es handelte sich also nicht um lockere Stellen oder frühere Wurzelkanäle. Der Pseudogleyboden zeigte trotz starker Wasserbeeinflussung eine verhältnismäßig gleichmäßigere Feinwurzelverteilung als der Braunerde-Pseudogley- und Braunerdeboden (Abb. 1a-c, siehe auch RASTIN und ULRICH (1990a und b) und RASTIN 1991b).

Schwachwurzeln

Die Zahl der Schwachwurzeln nahm in allen drei Flächen im Vergleich mit den Feinwurzeln stark ab (über 3faches) (Tab. 2, Abb. 2a - c); die Schwachwurzeln zeigten aber etwa gleiche Verteilungsmuster wie die Feinwurzeln mit dem Unterschied, daß Braunerde-Pseudogley-Böden in der Humus-Auflage geringer durchwurzelt waren als auf den anderen zwei Standorten. Die Intensivwurzelschicht lag hier auch bei etwa 30-40 cm Tiefe. Die Schwachwurzeln stießen weit in den marmorierten Bereich vor und erreichten wie die Feinwurzeln den S_d -Horizont. Ihre Zahl war jedoch gering. Auffallend war, daß trotz der extremen Stauwasserverhältnisse keine toten Schwachwurzeln in diesem Horizont gefunden wurden, wie dies bei anderen Untersuchungen an Fichten auf Pseudogley-Böden festgestellt wurde (KÖSTLER et al. 1968).

Der Anteil der toten Schwachwurzeln lag dagegen in der obersten 30cm Bodentiefe sehr hoch. Dabei zeigen erstaunlicherweise Braunerde-Böden die höchste (42-52 %) und Pseudogley-Böden die geringste (14-36 %) Mortalität.

Grob- und Starkwurzeln

Das Grob- und Starkwurzelsystem war nicht nur im Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyboden, wo die Tiefe der Durchwurzelung im wesentlichen durch den Wasserspiegel bestimmt wird, flach ausgebildet, sondern auch im Braunerdeboden, wo dieser begrenzende Faktor fehlt (Tab. 2). Auch lag die Zahl der Grob- und Starkwurzeln im Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyboden im allgemeinen höher. Die Grob- und Starkwurzeln erreichten aber im Braunerdeboden - obwohl vereinzelt - die größeren Tiefen (80 bzw. 50 gegenüber 60 bzw. 40 und 50 bzw. 30 cm Bodentiefe). Auffallend war in allen drei Flächen der hohe Anteil der toten Grob- und Starkwurzeln im Mineralboden, die in fast allen Tiefen die Anteile der lebenden Wurzeln überschritten. In der H-Lage zeigte nur der Braunerdeboden eine höhere Mortalität (10-27 %). Auch in der obersten 20 cm-Bodentiefe war die Mortalität der Grob- und Starkwurzeln im Braunerdeboden sehr hoch (71-86 % bzw. 59-78 %). Hier zeigten aber auch der

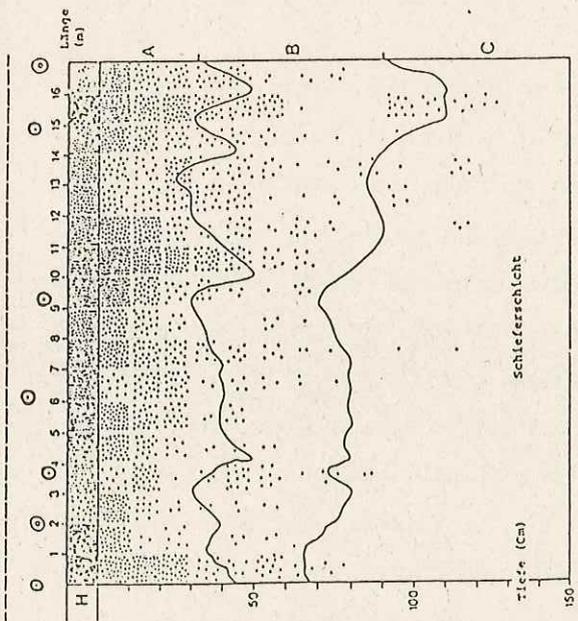


Abb. 1a: Feinwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform III

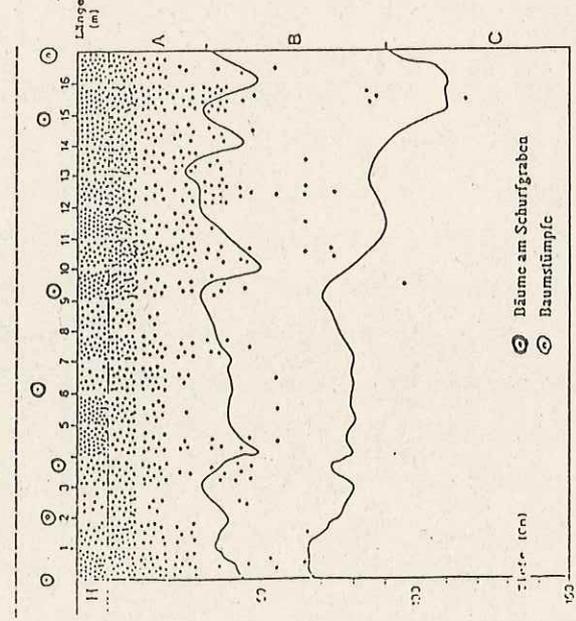


Abb. 2a: Schwachwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform III

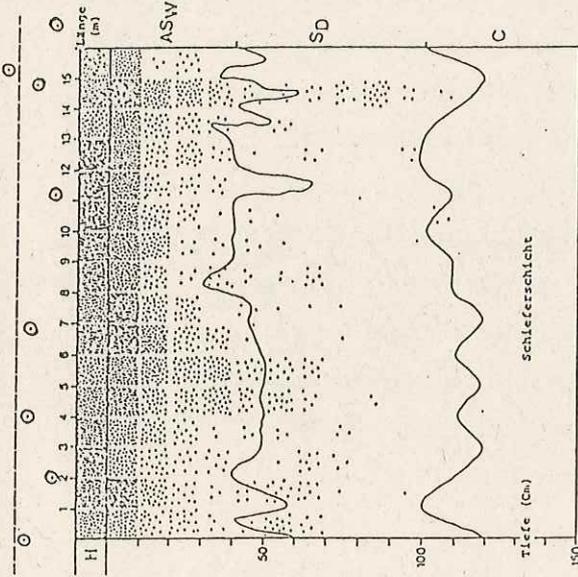


Abb. 1b: Feinwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform VIII

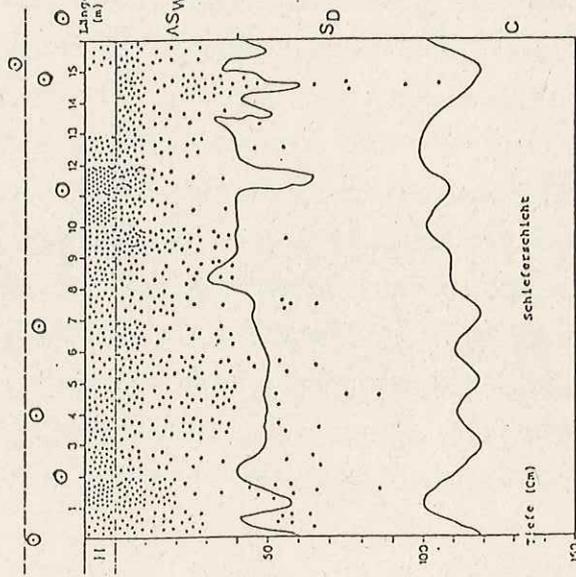


Abb. 2b: Schwachwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform VIII

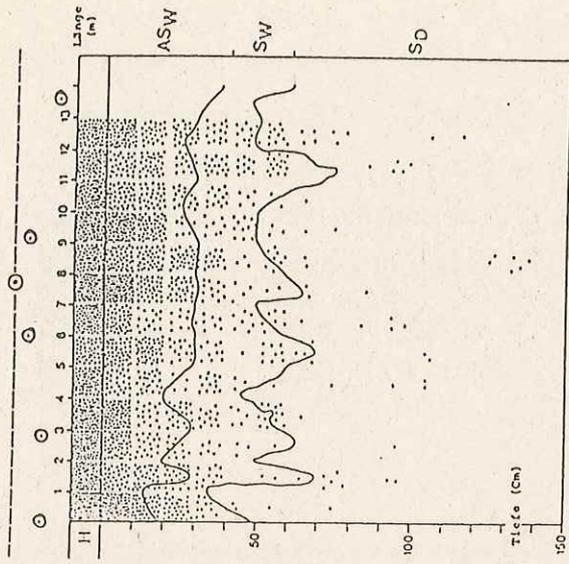


Abb. 1c: Feinwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform IX

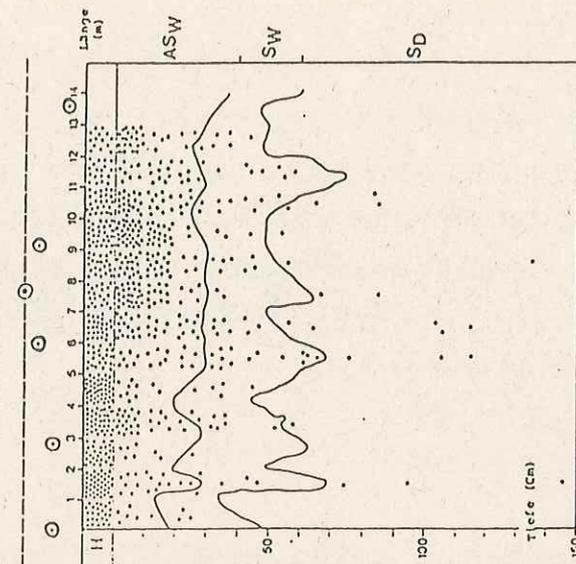


Abb. 2c: Schwachwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform IX

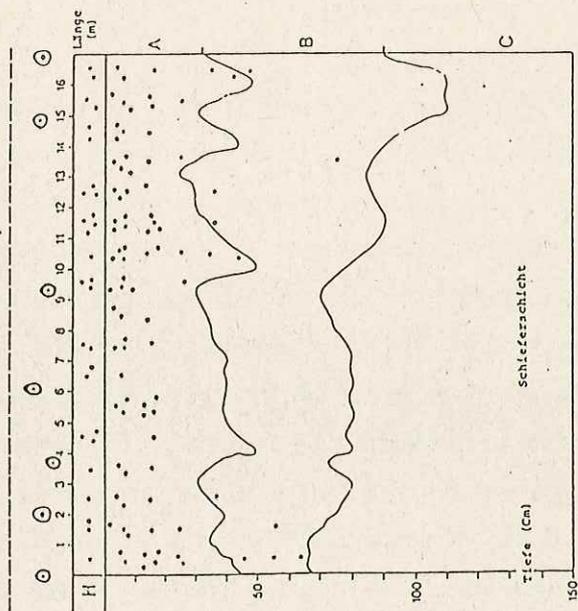


Abb. 3a: Grobwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform III

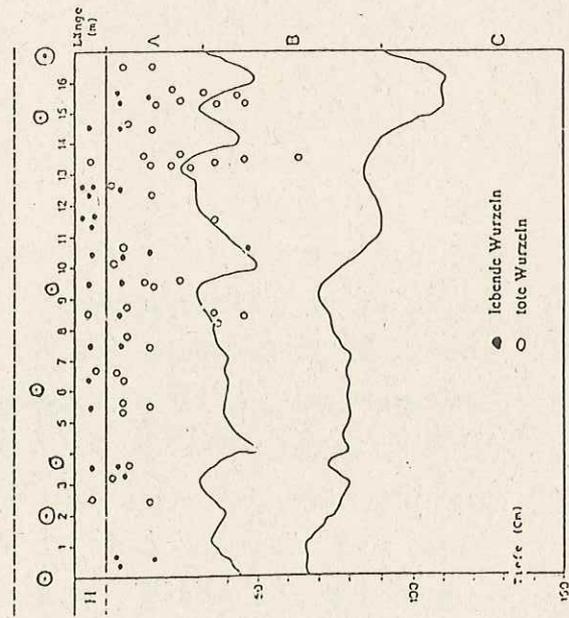


Abb. 3b: Stark- und Schrötkwurzverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform III

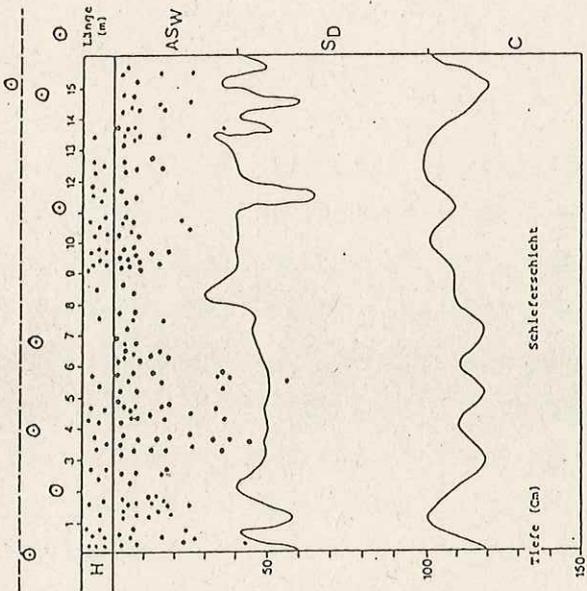


Abb. 3b: Grobwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform VIII

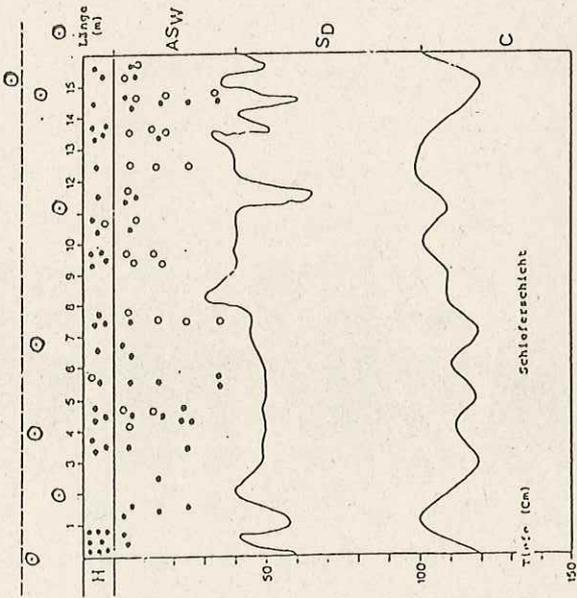


Abb. 4b: Stark- und Schrötkwurzverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform VIII

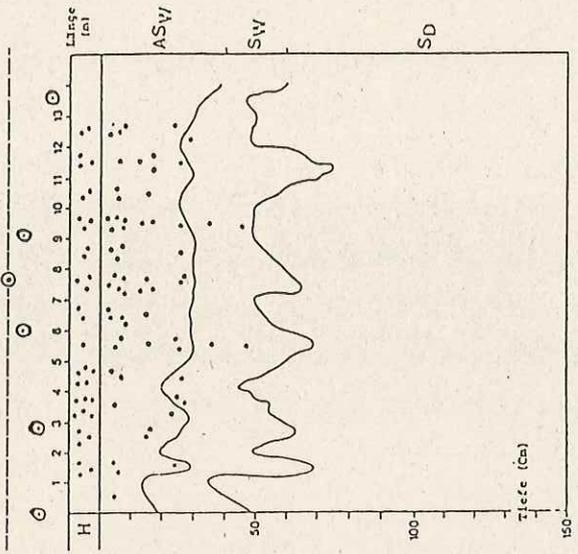


Abb. 3c: Grobwurzelverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform IX

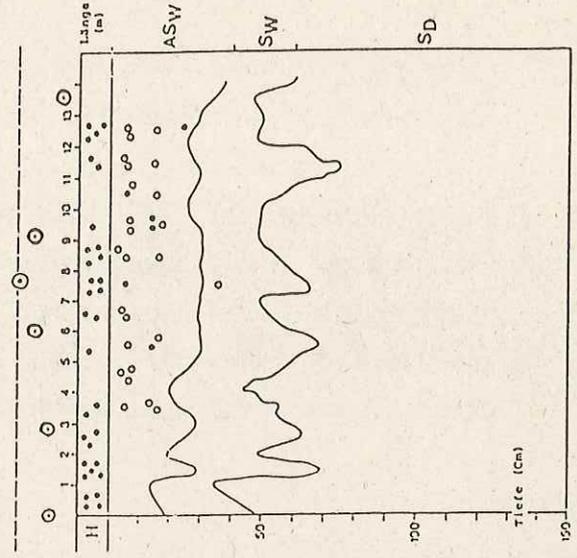


Abb. 4c: Stark- und Schrötkwurzverteilung am Schurfgraben in Standortgrundform IX

Braunerde-Pseudogley und besonders der Pseudogleyboden hohe Anteile an toten Grob- und Starkwurzeln (57-72 % bzw. 38-56 % und 55 % bzw. 73-89 %). Die toten Wurzeln stammten zum größten Teil von den vorhandenen Baumstümpfen. Das ändert aber nichts an der Tatsache, daß die Bäume früher auf diesen Standorten und besonders im Braunerde- und Pseudogleyboden tiefer gewurzelt hatten (Abb. 3a - c und 4a - c). Es zeigte sich deutlich, daß die Zahl der Starkwurzeln bei der Braunerde vom unteren Wurzelbereich in die obere Wurzelebene gerückt war. Dieser Standort zeigte in den unteren Bodenhorizonten den ungünstigsten bodenchemischen Zustand (Tab. 1).

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

In der Literatur (KÖSTLER et al. 1968) wird die Wurzelentwicklung bei der Fichte auf Pseudogley-Böden wie folgt beschrieben:

"In der Jugendphase wurzeln die Bäume bei stärkerer Vernässung auf der Freifläche flach. Mit beginnendem Dickungsschluß und im Stangenholzalter nimmt der Wasserbedarf des Bestandes zu, gleichzeitig halten die Kronen große Teile des Niederschlagswassers vom Boden fern; die Vernässung wird gemildert, und die Senker beginnen in den Boden vorzudringen. So ist auf Pseudogleyen in Fichtenbeständen mittleren Alters i.a. die tiefste Vertikalbewurzelung festzustellen. Im sich lichterstellenden Altbestand geht der Wasserverbrauch des Bestandes wieder zurück, es kommt mehr Niederschlagswasser auf den Boden; Vernässung und O₂-Mangel verstärken sich. Die Senker beginnen meist von der Tiefe her abzusterben, und die Altfichten reduzieren ihr Wurzelwerk schließlich auf flache Wurzelteller. Man hat das Gefühl, daß die Bäume nur auf dem Boden stehen und nicht wurzeln."

Wäre die Wasserbeeinflussung der einzige Grund für die Flachwurzeligkeit der Fichte, so sollten im Braunerdeboden die alten Senker noch leben. Die Ergebnisse zeigen jedoch, daß die Starkwurzeln im Braunerde-Pseudogleyboden besser verteilt waren (RASTIN und ULRICH 1990a) und tiefer durchwurzelten (Tab. 2) als im Braunerdeboden, wo bis auf eine lebende Starkwurzel in 50 cm Tiefe die Wurzeln nur auf die oberste 20 cm Bodentiefe beschränkt waren. Die Flachwurzeligkeit der Fichte im Braunerde-Boden ist höchst wahrscheinlich eine Folge der ungünstigen bodenchemischen Verhältnisse (Tab. 1): Auf Braunerdeboden in einem anderen Gebiet (Kisselbach) mit günstigeren bodenchemischen und physikalischen (Wasserversorgung) Verhältnissen war der Boden tief durchwurzelt (vgl. RASTIN und ULRICH 1990a und b). Hier wurden Senker bis zu 110 cm Bodentiefe gefunden. Die bessere Durchwurzelungstiefe

und -verteilung der Bäume im Braunerde-Pseudogley ist sehr wahrscheinlich durch die geringe Mächtigkeit des S_d -Horizontes und die damit nur kurz andauernde Staunässe bedingt. Dabei spielt die gute Nährstoffversorgung im Unterboden (Tab. 1) eine wichtige Rolle.

Die physikalischen Bedingungen des Bodens, der Wasserhaushalt, sowie die Luft- und Nährstoffverhältnisse sind oft stark voneinander abhängig und wirken komplex auf die Ausbildung der Wurzeln im Boden ein. Dies gilt besonders für Pseudogleyböden. Welche der verschiedenen Faktoren letzten Endes für die Ausbildung der Wurzeln entscheidend sind, ist bisher nicht geklärt. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß nicht nur die Vernässung, sondern auch die bodenchemischen Verhältnisse bei der Flachwurzeligkeit der Fichte eine wichtige Rolle spielen.

Danksagung

Herrn Dipl. Forstw. D. Pirouzpanah danke ich herzlich für die gute Zusammenarbeit bei der Durchführung der Geländeuntersuchungen.

6 LITERATUR

BÖHM, W. (1979): Methods of Studying Root Systems. Springer Verlag, 188 pp.

KÖSTLER, J.N., BRÜCKNER, E. und BIBELRIETHER, H. (1968): Die Wurzeln der Bäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 284 S.

LEIBUNDGUT, H., DAFIS, SP. und RICHARD, F. (1963): Untersuchungen über das Wurzelsystem verschiedener Baumarten. Zweite Mitteilung: Das Wurzelwachstum in einem Tonboden. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 114, S. 621-646

MURACH, D. (1984): Die Reaktion von Fichtenwurzeln auf zunehmende Bodenversauerung. Gött. Bodenkundl. Ber. 72, 128 S.

MEIWES, K.J., KÖNIG, N., KHANNA, P.K., PRENZEL, J. und ULRICH, B. (1984): Chemische Untersuchungen für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldökosystemen. Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Bd. 7, S. 1-67

RASTIN, N. (1991a): Immissionsbelastung der SIMS-Standorte. In diesem Heft

RASTIN, N. (1991b): Influence of waterlogging on root distribution, fine-root biomass and mycorrhizal number of Norway Spruce. In: Plant Roots and Their Environment (B.L. McMichael and H. Persson, Eds.), Elseviers, 319-332 pp.

RASTIN, N. und ULRICH, B. (1990a): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden über den Einfluß von Standort und Immission auf die Entstehung von Sturmschäden in den Forstämtern des Vorderhunsrücks-SIMS-"

RASTIN, N. und ULRICH, B. (1990b): Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf drei unterschiedlichen Standorten, Forst und Holz 22, S. 665-668

Untersuchungen zur Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität auf Braunerde-Pseudogleyen im Vorderen Hunsrück in Abhängigkeit von Baumart und Bestandessirukturparametern

H. Fölster, M. Degenhardt, T. Flor und M. Lux

1 EINLEITUNG

Um der Frage nachzugehen, inwieweit sich die Durchwurzelung auf Braunerde-Pseudogley-Standorten (Grundform VIII) durch unterschiedliche waldbauliche Behandlung beeinflussen läßt, wurden im Sommer 1989 in Zusammenarbeit der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz mit der Universität Göttingen drei Diplomarbeiten begonnen, die folgende Einzelaspekte betrachten:

Untersuchung der Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität

1. eines 60jährigen Fichtenreinbestandes (I,1. Ekl.) in Abhängigkeit von der Bestandesdichte und oberirdischen Parametern im Forstamt Simmern, Revierförsterei Kisselbach (LUX 1990). Der Untersuchungsbestand ist aus einer Pflanzung im 1,3m-Quadratverband hervorgegangen. Aufgrund von Pflanzenausfall und nachfolgendem Schneebruch entwickelte sich ein inhomogener Bestand mit dichten, lockeren und lückigen Bestandesteilen.
2. eines Fichten-Buchen-Mischbestandes in einzelstammweiser Baumartenmischung im Forstamt Simmern, Revierförsterei Wahlbach (FLOR 1990). Die 60jährigen Fichten (I,5. Ekl.) und 95 bzw. 160jährigen Buchen (III,5. Ekl.) befinden sich im Übergangsbereich eines reinen Fichtenaltholzes zu einem Buchen-Eichen-Mischbestand.
3. eines Mischbestandes in horstweiser Baumartenmischung von etwa 50jähriger Buche (I. Ekl.) und Fichte (I Ekl.) sowie 65jähriger Traubeneiche (II. Ekl.) im Forstamt Kirchberg, Revierförsterei Brauschied (DEGENHARDT 1990). Die Fichtenhorste sind durch Ausbesserung derjenigen Stellen entstanden, an denen die Buchen-Eichen-Naturverjüngung ausgeblieben ist.

Die Untersuchungsbestände stocken alle auf lockeren Staublehmdecken (20-40cm) über verdichteten Fließerden aus Devonschiefer mit eingelagertem Taunusquarzit. Durch den Dichteunterschied vom Ober- zum Unterboden entwickelten sich hieraus Braunerde-Pseudogleye (Grundform VIII), die inzwischen tiefreichend versauert sind. Die Ergebnisse der drei Arbeiten sollen im einzelnen vorgestellt werden.

2 METHODISCHER ANSATZ

Die Wurzelzählungen erfolgten mit Hilfe der von KRAUSS et al. (1939) sowie anderen Autoren beschriebenen Profilwandmethode. Hierzu wurden mehrere Meter lange und 1,80m tiefe Gräben in definierter Streichrichtung (Südost-Nordwest) entlang von 2 bis 4 Bäumen gezogen, deren Stammfüße 50cm von der Profilwand entfernt waren. Diese wurde so präpariert, daß die Wurzeln, die das Profil verließen, rasterweise (10x10cm) gezählt und sowohl zur Profillänge, als auch zur Profiltiefe exakt zugeordnet werden konnten. Die lebenden Wurzeln wurden getrennt nach Baumarten aufgenommen und in folgende Durchmesserklassen eingeteilt:

1- 2mm	Feinwurzeln	10-20mm	} Grobwurzeln
2- 5mm	Schwachwurzeln	20-50mm	
5-10mm	Mittelwurzeln	>50mm	

Zur Kontrolle der Homogenität der Profile hinsichtlich der Bodenparameter wurde an jedem Profil die Bodendichte mittels Stechzylinderproben bestimmt. Desweiteren wurden jeweils Mischproben zur chemischen Bodenanalyse entnommen sowie eine Profilsprache durchgeführt. Weiterhin wurden in jedem Bestand mehrere Probekreise angelegt, mit Hilfe derer die Grundfläche und gegebenenfalls der Mischungsanteil der einzelnen Baumarten festgestellt wurde. Zusätzlich wurden die Brusthöhendurchmesser, soweit sie noch nicht bei der Probekreisaufnahme erfaßt waren, und die Höhen der direkt um die Profile stehenden Bäume gemessen. In Kisselbach (Fichtenreinbestand) wurden außerdem noch die Astdurchmesser aller Äste im Stammabschnitt von 2,5m bis 4m Höhe der direkt um die Profile stehenden Bäume gemessen.

3 ERGEBNISSE

3.1 Fichtenreinbestand in Kisselbach

Im Untersuchungsbestand wurden insgesamt sechs Profile angelegt, anhand derer die Durchwurzelung unterschiedlich dichter Bestandesteile und von Bestandeslücken (Durchmesser bis 12m) erfaßt werden sollte. Es konnte für die Lücken aufgezeigt werden, daß diese nicht wesentlich schlechter, teilweise sogar besser als die angrenzenden

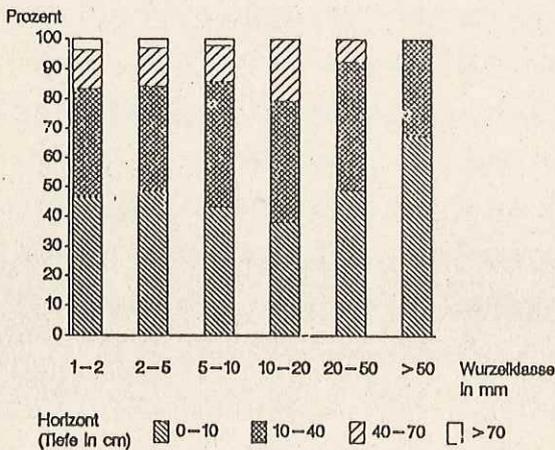


Abb. 1: Prozentuale Verteilung der einzelnen Wurzelklassen auf die Horizonte

geschlossenen Bestandesteile durchwurzelt waren. Die Wurzelzählung ergab weiterhin, daß im Untersuchungsbestand durchweg rund 45% der Wurzeln in Auflagehumus und Ah-Horizont zu finden waren. Rund 80% der Wurzeln befanden sich oberhalb des Stauwasserleiters (40cm), während der Staukörper (Sd > 70cm) nur von weniger als 5% der Wurzeln erreicht wurde (Abb. 1). Allerdings konnten einige Absenker bis in den Sd-Horizont hinein festgestellt werden. Die tiefste lebende Wurzel, eine Feinwurzel, wurde in 1,7m Tiefe gefunden. Gut 70% aller Wurzeln in Kisselbach sind Feinwurzeln. Feinwurzeln und Schwachwurzeln machen zusammen 93,5% aus.

Um den Einfluß von Bestandesdichte und oberirdischen Parametern auf die Durchwurzelung zu untersuchen, hat es sich als sinnvoll erwiesen, nicht jedes Profil einzeln zu betrachten, sondern alle Profile zusammenzufassen. Hierzu wurden die Profile in 10cm-Segmente aufgeteilt, denen jeweils die drei nächsten Bäume mit ihren oberirdischen Parametern zugeordnet wurden. So konnte für jedes Profilstück der durchschnittliche Abstand der drei nächsten Bäume als Weiser für die derzeitige Bestandesdichte berechnet werden. Der durchschnittliche BHD der nächsten drei Bäume sollte die Standraumverhältnisse in jüngerer Vergangenheit darstellen (KRAMER 1988). Da der maximale Astdurchmesser bzw. der durchschnittliche Astdurchmesser der drei stärksten Äste je Baum in 2,5m bis 4m Höhe linear mit der Pflanzverbandsweite steigen (MERKEL 1967), wurden diese als eindeutige Parameter für den Standraum in früherer Jugend benutzt. Sowohl der durchschnittliche Abstand als auch die durchschnittli-

chen Parameter der drei nächsten Bäume wurden profilübergreifend zu Klassen zusammengefaßt, in denen für die zugeordneten Profilsegmente Durchschnittswerte der Durchwurzelung errechnet wurden.

Aus Abb. 2 geht hervor, daß die Feinwurzeldichte unterhalb 10cm Bodentiefe mit zunehmendem Abstand (von 2m bis 4m) der drei nächsten Bäume vom jeweiligen Profilsegment um 20% zurückgeht, während Auflagehumus und Ah-Horizont absolut gleichmäßig durchwurzelt werden.

Die Schwach- und Mittelwurzeldichte waren im Untersuchungsbestand weitgehend unabhängig vom durchschnittlichen Stammabstand. Die Schwachwurzeldichte nahm in den weiteren Abstandsklassen sogar leicht zu. Zudem ist hervorzuheben, daß sich die Verteilung der Schwachwurzeln auf die Tiefe mit zunehmendem Abstand kaum veränderte. Nur die Grobwurzelzahl war in der 4m-Klasse deutlich geringer als in den anderen beiden Abstandsklassen. Es zeigt sich also auch hier, was sich bereits bei der Lückendurchwurzelung andeutete, daß nämlich die Fichte weite Abstände mit ihren Wurzeln gut zu erschließen vermag und daß die Durchwurzelungsintensität in lockeren Bestandesteilen nicht geringer als in den dichter bestockten ist.

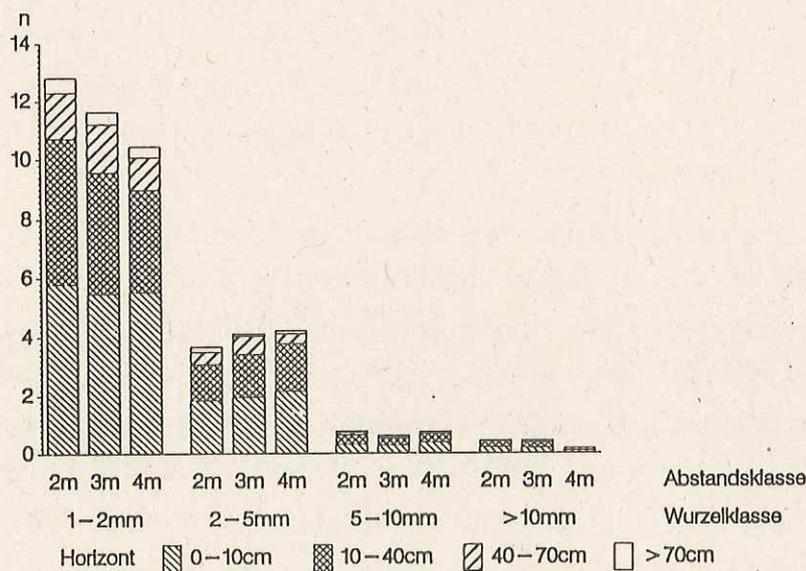


Abb. 2: Wurzeldichte und -verteilung in Stück pro 10 cm Profillänge und Zuordnung zu den Horizonten in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Abstand der nächsten drei Bäume

In Zusammenhang mit den oberirdischen Parametern stellte sich heraus, daß die Durchwurzelungsintensität und Tiefendurchwurzelung dort am größten waren, wo am Profil Bäume standen, die frühzeitig einen großen Standraum zur Verfügung hatten. Dies wird in Abb. 3 anhand der Feinwurzel-dichte und -verteilung in Abhängigkeit vom maximalen Astdurchmesser dokumentiert. Erstaunlich ist, daß sich die Wurzelsumme je 10cm-Segment von den niedrigsten bis zum höchsten Astdurchmesser in den Abstandsklassen 2 und 3 verdoppelt. Der leichte Ausreißer in der Abstandsklasse 4 darf nicht überbewertet werden, da sich in dieser Klasse vergleichsweise wenig Beobachtungen befanden.

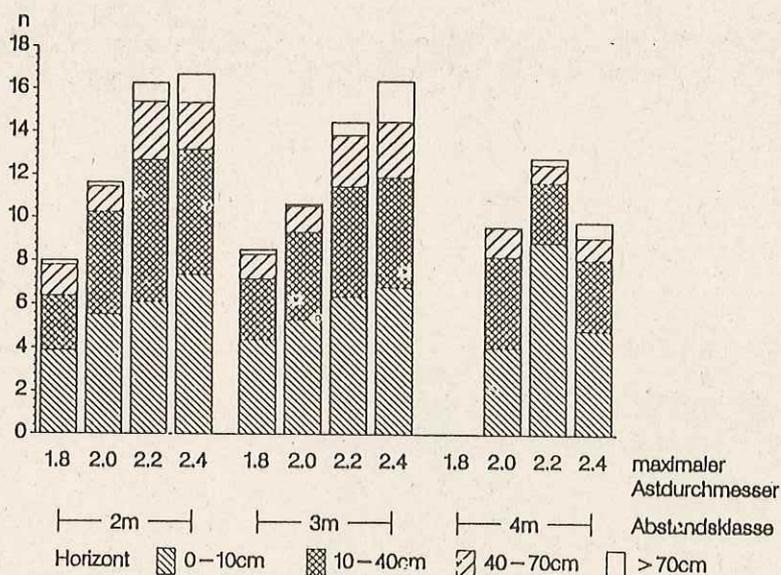


Abb. 3: Feinwurzel-dichte und -verteilung in Abhängigkeit vom Abstand und vom maximalen Astdurchmesser in cm der nächsten drei Bäume

Weiterhin war bei den Feinwurzeln in allen Abstandsklassen eine Zunahme der Tiefendurchwurzelung mit steigendem Astdurchmesser festzustellen. In den anderen Wurzelklassen ist diese Tendenz weniger stark ausgeprägt, aber noch deutlich vorhanden. Der Zusammenhang zwischen Astdurchmesser und Durchwurzelung nimmt ab, je stärker die betrachteten Wurzeln sind. Es muß hier noch angemerkt werden, daß es in der Abstandsklasse 4 keine Baumkollektive gab, die einen durchschnittlichen Astdurchmesser bis 1,8cm besaßen.

Der Zusammenhang zwischen BHD und Durchwurzelung war weniger ausgeprägt als beim maximalen Astdurchmesser, aber dennoch eindeutig erkennbar. Eine frühzeitige Freistellung hat also einen größeren Einfluß auf die Ausbildung eines intensiven Wurzelsystems als ein ausreichender Standraum im späteren Bestandesleben.

Da sich sowohl zwischen BHD und Durchwurzelung, als auch zwischen Astdurchmesser und Durchwurzelung eine positive Beziehung zeigte, soll abschließend eine gemeinsame Betrachtung dieser beiden Parameter in Beziehung zur Durchwurzelung erfolgen. Dies wird in Abb. 4 am Beispiel der Schwachwurzeln stellvertretend für alle Wurzelklassen dargestellt. Als Astparameter wurde hierzu der Durchschnitt der drei stärksten Äste pro Baum (Dreiast) genommen.

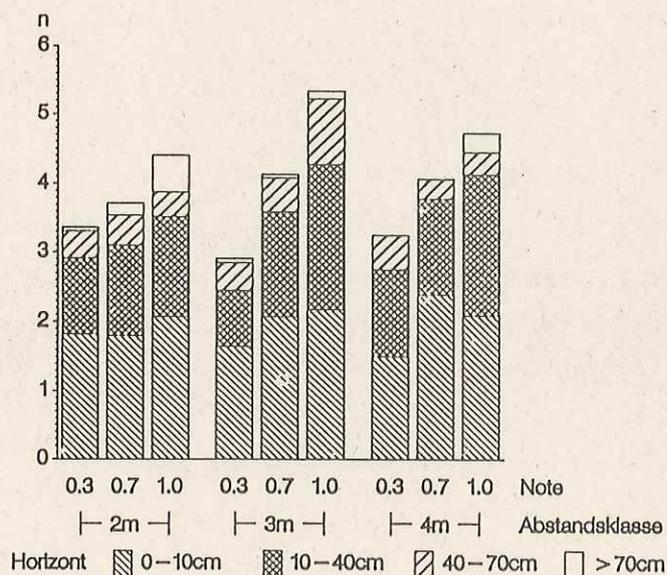


Abb. 4: Schwachwurzeldichte und -verteilung in Abhängigkeit vom Abstand und der BHD/Drei-Note der nächsten drei Bäume

Die beiden verwendeten Parameter wurden zunächst von 0-1 standardisiert (0= schwächster, 1= stärkster BHD bzw. Dreiast), anschließend gemittelt und bildeten die BHD/Dreiast-Note. Es ist ersichtlich, daß in allen Wurzel- und Abstandsklassen eine deutliche Zunahme (30-80%) von Durchwurzelungsintensität und -tiefe mit Verbesserung der Note erfolgt.

Man kann also sagen, daß im Untersuchungsbestand dort die beste Durchwurzelungsintensität und Tiefendurchwurzelung gefunden wurde, wo die umstehenden Bäume sowohl in frühester Jugend als auch im späteren Bestandesleben den größten Standraum besaßen.

3.2 Fichten-Buchen-Mischbestand (einzelstammweise Mischung) in Wahlbach

Um die Durchwurzelung eines Fichten-Buchen-Mischbestandes im Falle einzelstammweiser Mischung zu untersuchen, wurden entlang von insgesamt fünf Fichten-Buchen-Paaren Profile angelegt, an denen die Wurzeln baumartenweise gezählt wurden.

Trotz gewisser Schwankungen in der Durchwurzelung der einzelnen Profile konnte überall beobachtet werden, daß die Wurzeln von Fichte und Buche eine grundsätzlich unterschiedliche vertikale und horizontale Verteilung aufweisen. Da die bodenchemischen Verhältnisse und die Bodendichten unter beiden Baumarten als einheitlich anzusehen sind, können diese nicht der Grund für das unterschiedliche Wurzelverhalten sein.

Der Verlauf der Tiefendurchwurzelung jeweils im Mittel aller fünf Profile ist in Abb. 5 am Beispiel der Feinwurzeln mit absoluten Zahlenwerten, bezogen auf dm^2 , und in Abb. 6 als prozentuale Verteilung aller Wurzelklassen auf die einzelnen Horizonte, dargestellt. Die Fichte konzentriert demnach über die Hälfte (60%) ihrer Wurzeln in Auflagehumus und Ah-Horizont. Bis zu einer Tiefe von 40cm sind bereits 90% der Wurzeln ausgebildet, während mit Beginn des Sd-Horizontes bei ca. 60 - 70cm Tiefe die Durchwurzelung bereits als abgeschlossen zu betrachten ist. Im untersuchten Fi-Bu-Mischbestand war somit ein noch höherer Anteil der Fichtenwurzeln im Oberboden zu finden, als dies im Fichtenreinbestand in Kisselbach beobachtet werden konnte. Dort befanden sich nämlich nur 45% der Wurzeln im Auflage- und Ah-Horizont. Damit

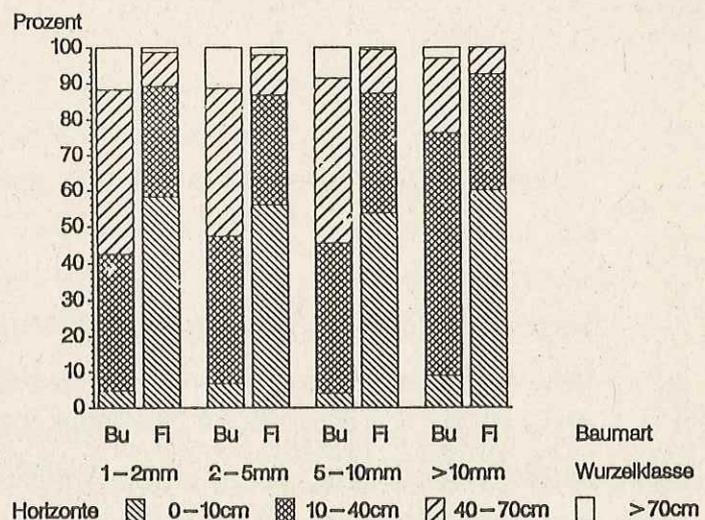
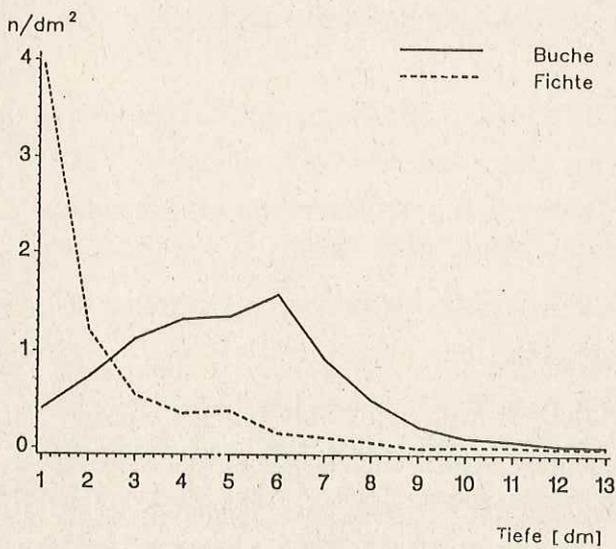


Abb. 5: Verteilung der Feinwurzeln auf die Tiefe (Stück/ dm^2)

Abb. 6: Prozentuale Verteilung der Wurzelklassen auf die Horizonte

wird deutlich, daß der Boden von der Fichte im Mischbestand nicht tiefer, sondern weniger tief erschlossen wird als im Reinbestand und die Durchwurzelung des Sd-Horizontes hier sogar noch geringer ist. Dieser Unterschied zwischen Reinbestand und einzelstammweiser Baumartenmischung im Hinblick auf die vertikale Wurzelverteilung der Fichte konnte auch im unten folgenden Bestand in Kirchberg gefunden werden.

Die Buche meidet im Gegensatz zur Fichte den humosen obersten Horizont, durchwurzelt jedoch den darunter liegenden Mineralboden mit fortschreitender Tiefe zunehmend intensiver. Die höchste Wurzeldichte war unmittelbar an der Grenze zum Verdichtungshorizont zu finden, wobei beobachtet werden konnte, daß die Wurzeln zum Teil netzförmig miteinander verwachsen dem Staukörper auflagen. Obwohl mit Erreichen des Sd-Horizontes ein deutlicher Rückgang der Durchwurzelungsintensität zu erkennen war, drang die Buche mit teilweise über 10% ihrer Wurzeln weitaus intensiver in den Verdichtungshorizont ein, als dies bei der Fichte zu beobachten war. Selbst die Grobwurzeln (Wurzeln > 10mm) erreichten noch tiefere Bodenbereiche bis 70cm.

Insgesamt gesehen war die Buche auf dem Braunerde-Pseudogley des Untersuchungsbestandes durchaus in der Lage, den Boden tiefreichend und mit einer hohen Durchwurzelungsintensität zu erschließen. Es konnte aber nicht gefunden werden, daß die Fichte durch die damit verbundene Verbesserung des Bodenhohlraumsystems veranlaßt wurde, ebenfalls ein tieferreichendes Wurzelsystem auszubilden. Ferner zeigte sich, daß nur ein geringer Anteil (5%) der Fichtenwurzeln in Wurzelkanälen vorlag, was die Ergebnisse anderer Autoren (WIEDEMANN 1942, BONNEMANN 1970) bestätigt. Lediglich in einem Profil lag der Anteil der Wurzeln, die sich in alten Wurzelröhren befanden, gering über 10%. Es handelte sich hierbei jedoch nicht um Wurzelkanäle der Buche, sondern um die vermoderten Wurzeln eines direkt am Profil befindlichen alten Eichenstubbens.

Ein Vergleich mit Kisselbach zeigt, daß die Gesamtdurchwurzelungsintensität bei Fein- und Schwachwurzeln als Summe beider Baumarten um rund 20% höher als im Fichtenreinbestand war. Die Mittel- und Grobwurzelintensität war sogar dreimal so hoch wie im Fichtenreinbestand. Ungefähr zwei Drittel aller Wurzeln in Wahlbach waren Feinwurzeln, während nur 5% aller Wurzeln zu der Klasse der Grobwurzeln gehörten. Erstaunlicherweise war dies bei beiden Baumarten gleich.

Bei gemeinsamer Betrachtung der Wurzelsysteme der beiden Baumarten kommt man zu dem Schluß, daß diese sich im Hinblick auf die Tiefendurchwurzelung gegenseitig ergänzen und den Boden bis in 70cm Tiefe recht intensiv erschließen, wobei sie sich den Wurzelraum jedoch vertikal aufteilen. In einer Tiefe von 20-30cm hielten sich Fichten- und Buchenwurzeln, absolut gesehen, die Waage, während in der Zone darüber die Fichte und darunter die Buche dominierte.

Zur Darstellung der Zwischenflächendurchwurzelung (Abb. 7.1-4) wurde der Abstand zwischen den fünf Fichten-Buchen-Paaren standardisiert und die entsprechenden Profilssegmente in das Intervall von 0 (Standplatz der Buche) bis 1 (Standplatz der Fichte) eingeteilt, sowie in Stufen von 0,1 Einheiten untergliedert. Für die einzelnen Einheiten wurde die durchschnittliche Durchwurzelung der fünf Profile berechnet.

Aus den Abbildungen geht hervor, daß die Zwischenflächen nicht gleichmäßig durchwurzelte waren. Die Fichte durchwurzelte den Ah-Horizont im gesamten Zwischenflächenbereich sehr intensiv (Abb. 7.1).

Die niedrigen Wurzelzahlen im unmittelbaren Stammbereich lassen sich damit erklären, daß hier sehr viele Grobwurzeln zu finden waren, die stellenweise den ganzen Ah-Horizont ausfüllten. Die Buche durchwurzelte diesen Horizont hingegen nur sehr schwach, wobei in der Nähe des Stammfußes der Fichte gar keine Wurzeln mehr vorhanden waren. In der Tiefenstufe 10-40cm (Abb. 7.2) durchwurzelte die Buche den näheren Stammbereich der Fichte genauso stark wie die Fichte den der Buche. Jedoch hat die Buche ihren Bereich nahezu doppelt so intensiv erschlossen, wie dies die Fichte in ihrem Bereich vermocht hat. Interessant ist, daß sich die beiden Baumarten genau in der Mitte der Zwischenfläche im Hinblick auf die Durchwurzelungsintensität sowohl bei den Fein- als auch bei den Schwachwurzeln die Waage halten. In Tiefen unter 40cm und besonders unter 70cm erschloß die Buche die Zwischenfläche eindeutig besser als die Fichte. Unterhalb 70cm, dort, wo fast keine Fichtenwurzeln mehr vorhanden waren, durchwurzelte die Buche den gesamten Zwischenflächenbereich auch direkt unter der Fichte gleichmäßig. Die Fichte bildet folglich ein weitreichendes Flachwurzelsystem aus, während das Wurzelsystem der Buche, welches sich vor allem auf den näheren Stammbereich konzentriert, als typisches Herzwurzelsystem anzusehen ist.

3.3 Buchen-Fichten (Eichen)-Mischbestand (horstweise Mischung) in Kirchberg

Um die Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität von Buche, Fichte und Eiche in verschiedenen Mischungsformen vergleichen zu können, wurden jeweils drei Profile in Fichten- und Buchenhorste, ein Profil entlang von drei Traubeneichen in einem Laubholzhorst mit Traubeneiche, Buche, Hainbuche und Bergahorn (Eichen-ALh-Horst) sowie ein Profil entlang eines Buchen-Fichten-Paares angelegt.

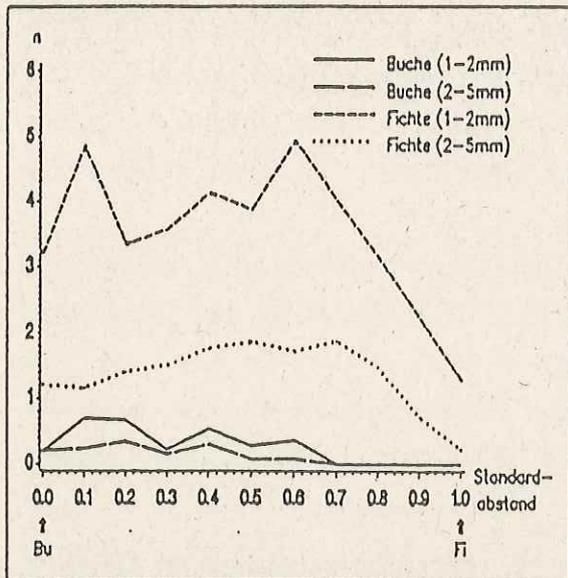


Abb. 7.1 Bodentiefe 0-10cm

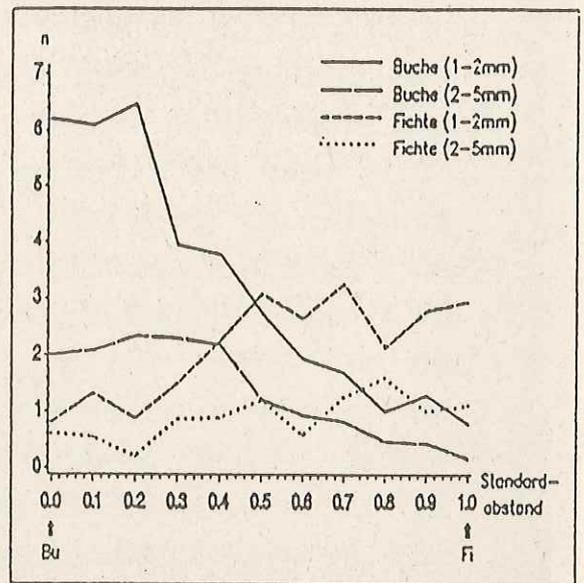


Abb. 7.2 Bodentiefe 10-40cm

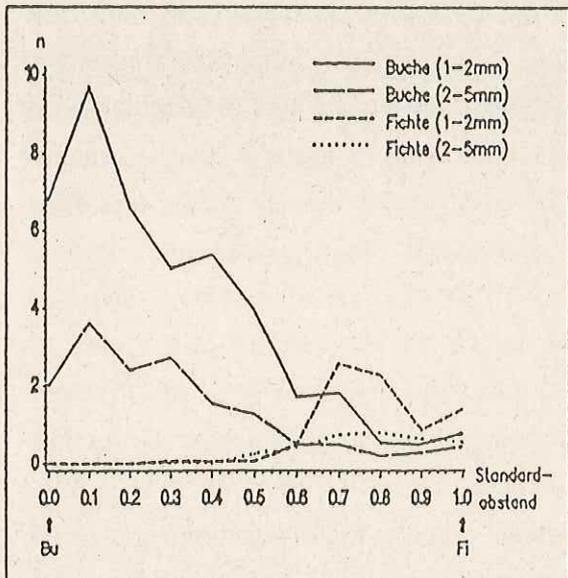


Abb. 7.3 Bodentiefe 40-70cm

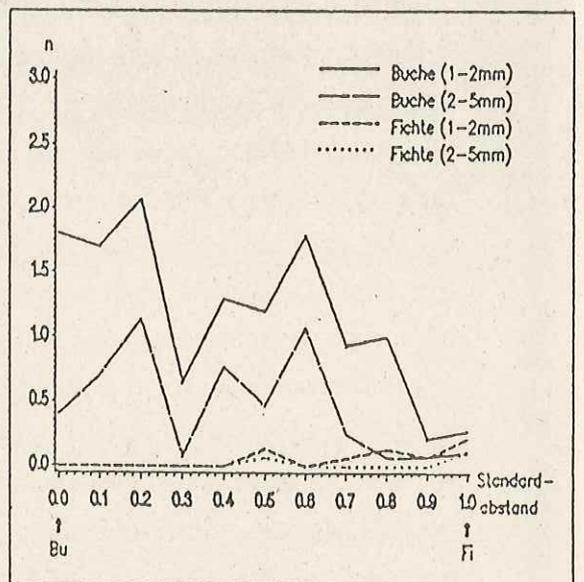


Abb. 7.4 Bodentiefe >70cm

Abb. 7.1-4: Durchwurzelung der Zwischenfläche durch Fein- und Schwachwurzeln der beiden Baumarten in den verschiedenen Horizonten in Stück pro 10 cm Profillänge

Horstweise Baumartenmischung von Fichte und Buche

Bei den bodenkundlichen Untersuchungen stellte sich heraus, daß die Fichten auf einem wesentlich stärker stauwasserbeeinflußten Boden stockten als die Buchen. Auch zwischen den Fichtenprofilen wurden Unterschiede in der Stauwasserbeeinflussung und im Nährelementgehalt gefunden, wobei der Nährelementgehalt des Oberbodens mit zunehmender Pseudovergleyung immer höher wurde.

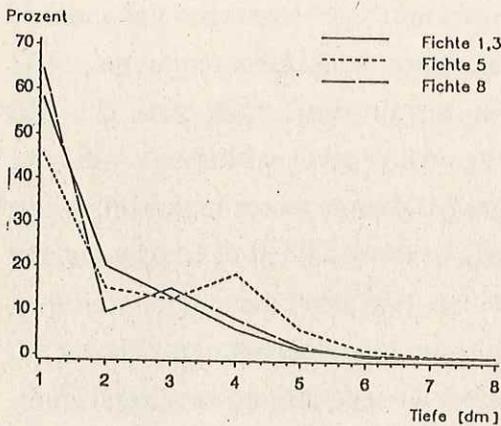


Abb. 8: Prozentuale Verteilung der Fichtenfeinwurzeln auf die Tiefe
Horstweise Mischung:
Profile 1, 3, 5
Einzelstammweise Mischung:
Profil 8

Dies ist vermutlich auf eine geringere Nährstoffauswaschung aus dem Oberboden zurückzuführen. Allen Fichtenprofilen in Kirchberg war gemeinsam, daß sich ein großer Teil (45-65%) der Wurzeln im Auflage- und Ah-Horizont befand, was in Abb. 8 ersichtlich ist. Aus dieser Abbildung wird auch deutlich, daß mit zunehmender Tiefe die Durchwurzelung bis auf wenige Ausnahmen stetig abnahm und mit Beginn des Sd-Horizontes (60cm) nahezu abgeschlossen war.

Das Wurzelklassenverhältnis stimmt im wesentlichen mit dem der anderen Untersuchungsbestände überein und soll hier nicht gesondert dargestellt werden. Die stärker stauwasserbeeinflußten Profile (1, 3) wie

sen trotz gleicher Durchwurzelungsdichte pro dm² ein stärker in den Oberboden verlagertes Wurzelsystem auf als das weniger stauwasserbeeinflußte Fichtenprofil (5) (Abb. 8). Dies ist vermutlich eine Folge der hohen Sauerstoffbedürftigkeit der Fichtenwurzeln (KREUTZER 1961). Desweiteren wäre es denkbar, daß die Fichte bei höherem Nährelementgehalt im Oberboden deswegen nicht tiefer wurzelt, weil der Bedarf an Nährstoffen bereits im Oberboden gedeckt werden kann (KERN, MOLL und BRAUN 1961). Der Einfluß der horstweisen Mischung mit Buche auf die Durchwurzelung der Fichte sollte durch einen Vergleich mit dem Fichtenreinbestand in Kisselbach ergründet werden. Hierbei stellte sich heraus, daß die Fichten in Kisselbach, vermutlich wegen der geringeren Nährelementgehalte im Oberboden und wegen der geringeren Stauwasserbeeinflussung, ein tiefergehendes Wurzelsystem ausgebildet haben als die Fichten am günstigsten Profil in Kirchberg. Es kann also unabhängig von der Mischungsform (Reinbestand, horstweise Mischung) festgestellt werden, daß bei den hier vorliegenden

Böden die Tiefendurchwurzelung umso schwächer wird, je stärker die Pseudovergleyung und je höher der Nährelementgehalt des Oberbodens wird. Daher sind auch in

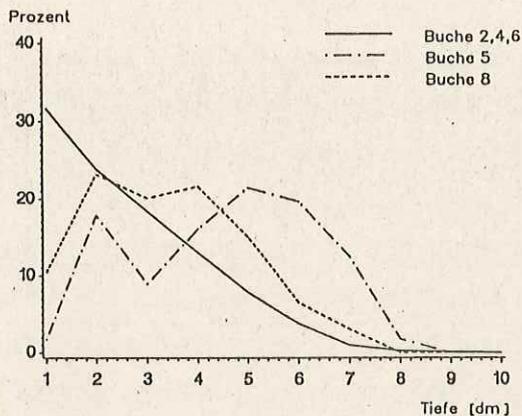


Abb. 9: Prozentuale Verteilung der Buchenfeinwurzeln auf die Tiefe
Horstweise Mischung:
 Profile 2, 4, 6
Einzelstammweise Mischung:
 Profile 5, 8

horstweiser Mischung mit Buche auf Pseudogleystandorten der Grundform VIII die Staunässe und die Nährelementversorgung des Bodens die, die Fichtendurchwurzelung maßgeblich bestimmenden Faktoren. Die Durchwurzelung der Buche in horstweiser Mischung nahm vom Ober- zum Unterboden stetig ab und war mit Beginn des Sd-Horizontes nahezu abgeschlossen (Abb. 9). Die tiefste lebende Buchenwurzel, eine Feinwurzel, wurde in 1m Tiefe gefunden. Wie bereits oben angeführt, ist ein direkter Vergleich der Durchwurzelung von Fichte und Buche wegen der unterschiedlichen Bodenverhältnisse in den Horsten in Kirchberg nicht uneingeschränkt möglich. Daher wurde die Durchwurzelung der Buchenhorste mit derjenigen des Fichtenreinbestandes

in Kisselbach verglichen, der auf einem bezüglich der Bodenverhältnisse sehr ähnlichen Standort stockt. Zunächst kann herausgestellt werden, daß die Wurzeldichte der Buche insgesamt höher war als die der Fichte. Bei der Fichte war der Anteil der Wurzeln im Auflage- und Ah-Horizont mit 45% ca. 10% höher als bei der Buche, die ihrerseits etwas mehr Wurzeln in die darunterliegende Zone bis 40cm Tiefe entsandte. Unterhalb 40cm war die Durchwurzelung beider Baumarten ähnlich intensiv. Folglich sind keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Tiefenerschließung beider Baumarten festzustellen. Es muß jedoch angemerkt werden, daß die hier 50jährige Buche nach KÖSTLER (1968) im höheren Alter sowohl die Tiefendurchwurzelung als auch die Durchwurzelungsintensität erhöhen kann, während bei der gleichalten Fichte eher das Gegenteil der Fall ist, da die gebildeten Senker im höheren Alter oftmals absterben und sich das Wurzelsystem verflacht.

Einzelstammweise Baumartenmischung von Fichte und Buche

Die Durchwurzelung von Fichte und Buche in einzelstammweiser Mischung wurde an einem Profil untersucht, welches so angelegt war, daß es sowohl durch einen Fichtenhorst (5) als auch entlang eines Fichten-Buchen-Paares (8) verlief. Somit konnten an ein und demselben Profil sowohl die Durchwurzelung eines Fichtenhorstes, als auch die Durchwurzelung in einzelstammweiser Baumartenmischung erfaßt werden. Es kann also davon ausgegangen werden, daß die Rahmenbedingungen (Boden, Alter, Kleinklima) für das Wurzelwachstum an beiden Profilteilen gleich waren und daher Unterschiede in der Durchwurzelung vor allem auf die unterschiedliche Mischungsform zurückzuführen sind.

Die Fichte bildete in einzelstammweiser Mischung mit Buche ein wesentlich flacheres Wurzelsystem aus, als in horstweiser Mischung (Abb. 8). Bei der Buche hingegen zeigte sich, daß sie in einzelstammweiser Mischung mit Fichte ein stärker in den Unterboden verlagertes Wurzelsystem aufwies als in horstweiser (Abb. 9). Die im Fichtenprofil 5 vereinzelt auftretenden Buchenwurzeln waren fast genauso auf die Tiefe verteilt wie die des Buchen-Fichten-Paares. Erstaunlicherweise stimmt die horizontale und vertikale Verteilung der Fichten- und Buchenwurzeln in einzelstammweiser Mischung mit derjenigen, die im 30km entfernten Wahlbach gefunden wurde, fast genau überein. Daher soll auf eine gesonderte Darstellung insbesondere der horizontalen Verteilung an dieser Stelle verzichtet werden. Als eine mögliche Ursache für die unterschiedliche Durchwurzelung in den beiden Mischungsformen wird, da die wesentlichen Parameter gleich sind, eine Wurzelkonkurrenz zwischen Fichte und Buche bei einzelstammweiser Mischung angesehen.

Eichen-ALh-Profil

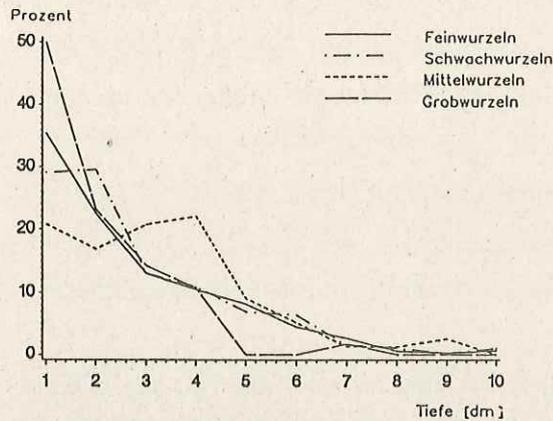


Abb. 1: Prozentuale Verteilung der einzelnen Wurzelklassen auf die Horizonte

Die maximale Durchwurzelungstiefe der Eiche lag mit 160cm deutlich über der der anderen Baumarten, was mit den Ergebnissen anderer Autoren übereinstimmt. Weiterhin hat die Eiche im Gegensatz zu den anderen Baumarten den Unterboden nicht nur durch Fein- und Schwachwurzeln erschlossen, sondern bis zu einer Tiefe von 1m auch durch Mittelwurzeln (Abb. 10). Obwohl die Anzahl insbesondere der stärkeren Wurzelklassen im Unterboden gering war, können die nach der Verrottung der Wurzeln die nach der Verrottung der Wurzeln entstehenden Wurzelkanäle für die

Tiefendurchwurzelung der nachfolgenden Fichte von großer Bedeutung sein. Dies konnte im Untersuchungsbestand bestätigt werden, da sich in einem Fichtenprofil 30-40% der Fein- und Schwachwurzeln unterhalb 40cm Tiefe in Wurzelkanälen befanden, die von vermoderten Eichenwurzeln stammten. Auch in Wahlbach konnte die Ausnutzung derartiger Wurzelkanäle festgestellt werden.

4 ZUSAMMENFASSUNG

1. Im Fichtenreinbestand konnte dann die intensivste Durchwurzelung auch tieferer Bodenzonen gefunden werden, wenn die umstehenden Bäume sowohl starkastig waren als auch einen hohen BHD aufwiesen. Demnach führen weite Ausgangsverbände in Verbindung mit weitständiger Bestandeserziehung zu einer intensiveren Bestandesdurchwurzelung.

2. Bestandeslücken im Fichtenreinbestand mit Durchmessern bis 12m wurden von Fein-, Schwach- und Mittelwurzeln gleichmäßig erschlossen.

3. Im Reinbestand durchwurzelte die Fichte den Auflage- und Ah-Horizont mit rund 45% der Wurzeln. Bis 40cm Bodentiefe, also bis zum Beginn des Sw-Horizontes, befanden sich 80% der Wurzeln. Der Sd-Horizont (ab 70cm Tiefe) wurde von 5% der Wurzeln erreicht.

4. Die Fichtendurchwurzelung wurde auf Braunerde-Pseudogleyen durch die einzelstammweise Beimischung der Buche nicht verbessert. Im Gegenteil, die Fichte konzentrierte ihr Wurzelsystem noch stärker in den Oberboden (bis 10cm Tiefe ca. 60%, bis 40 cm Tiefe 90% aller Wurzeln), als es im Reinbestand und in horstweiser Mischung mit Buche der Fall war. Mit Beginn des Sd-Horizontes war bei ihr die Wurzelbildung als abgeschlossen zu betrachten. Es hat sich nicht bestätigt, daß die Fichte der Buche mit ihren Wurzeln in tiefere Bodenbereiche folgt.

5. Es konnte unabhängig von der Mischungsform festgestellt werden, daß die Fichte Wurzelkanäle vermoderter Eichenwurzeln mit Fein- und Schwachwurzeln erschließt und somit tiefere Bodenzonen erreichen kann.

6. Die Buche mied in einzelstammweiser Mischung mit Fichte den Ah-Horizont, durchwurzelte jedoch den darunterliegenden Mineralboden bis zu einer Tiefe von 60-70cm recht intensiv. Auch der Sd-Horizont wurde von der Buche mit einem Anteil von rund 10% ihrer Wurzeln deutlich intensiver erschlossen, als dies bei der Fichte zu beobachten war. Sie ist demnach auf mäßig wechselfeuchten Standorten in einzelstammweiser Mischung mit Fichte durchaus in der Lage, den Boden tiefreichend und mit einer hohen Durchwurzelungsintensität zu erschließen.

7. Fichten und Buchen teilten sich in einzelstammweiser Mischung den Wurzelraum vertikal und horizontal auf. Sie ergänzten sich im Hinblick auf die Tiefenerschließung des Bodens, so daß dieser bis in 70cm Tiefe intensiver erschlossen wurde als im Fichtenreinbestand bzw. in horstweiser Mischung von Fichte, Buche und Eiche. Die vertikale Aufteilung des Wurzelraumes wird als Folge von Wurzelkonkurrenz aufgefaßt, wenngleich dies im Rahmen dieser Arbeiten nicht bewiesen werden konnte.

8. In horstweiser Mischung mit Buche sind die Staunässe und die Nährelementversorgung des Bodens die, die Fichtendurchwurzelung maßgeblich bestimmenden Faktoren. Die Buche wies in horstweiser Mischung keine wesentlich intensivere Tiefendurchwurzelung auf als die Fichte im Reinbestand. Allerdings war die Buche erst 50 Jahre alt, sodaß im Gegensatz zur gleichalten Fichte mit einer Intensivierung der Durchwurzelung zu rechnen ist. Sowohl bei der Fichte als auch bei der Buche war die Durchwurzelung in horstweiser Baumartenmischung an der Grenze zum Sd-Horizont als abgeschlossen zu betrachten.

9. Die Eiche wies zwar eine extensivere Durchwurzelung als die anderen Baumarten in horstweiser Mischungsform auf. Die maximale Durchwurzelungstiefe von 160cm sowie ein besonders hoher Mittelwurzelanteil im Sd-Horizont wurden jedoch weder von der Fichte noch von der Buche auch nur annähernd erreicht.

5 LITERATUR

- BONNEMANN, A. (1970):** Zum Anbau der Fichte auf staunassen Böden. Forstarchiv 41: S. 217-221
- DEGENHARDT, M. (1990):** Vergleich der Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität von Buche, Fichte und Eiche in verschiedenen Mischungsformen auf einem Braunerde-Pseudogley im Forstamt Kirchberg (Hunsrück). Diplomarbeit. Inst. f. Bodenk. u. Waldernähr. d. Univ. Göttingen
- FLOR, T. (1990):** Untersuchung der Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität eines Fichten-Buchen-Mischbestandes im Falle einzelstammweiser Baumartenmischung auf einem Braunerde-Pseudogley der Grundform VIII im Forstamt Simmern (Hunsrück). Diplomarbeit. Inst. f. Bodenk. u. Waldernähr. d. Univ. Göttingen
- KERN, K.G., MOLL, W., BRAUN, H.J. (1961):** Wurzeluntersuchungen in Rein- und Mischbeständen des Hochschwarzwaldes (Vfl. Todtmoos 2/I-IV). Allg. Forst u. Jagd Zeitung, S. 241-259
- KÖSTLER, J.N., BRÜCKNER, E., BIBELRIETHER, H. (1968):** Die Wurzeln der Waldbäume. Paul Parey; Hamburg und Berlin. 284 S.
- KRAMER, H. (1988):** Waldwachstumslehre. Paul Parey; Hamburg und Berlin. 374 S.
- KRAUSS, G., MÜLLER, K., GÄRTNER, G. (1939):** Standortsgemäße Abkehr von der Fichtenwirtschaft im nordwestsächsischen Niederland. Tharandter Forstl. Jb. (90.): S. 481-715
- KREUTZER, K. (1961):** Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. Forstwiss. Cbl.: S. 357-391
- LUX, M. (1990):** Bestandesdurchwurzelung eines Fichtenreinbestandes auf einem Braunerde-Pseudogley in Abhängigkeit von der Bestandesdichte und oberirdischen Parametern. Diplomarbeit. Inst. f. Bodenk. u. Waldernähr. d. Univ. Göttingen
- MERKEL, O. (1967):** Der Einfluß des Baumabstandes auf die Aststärke der Fichte. Allg. Forst u. Jagd Zeitung 138: 113-125
- WIEDEMANN, E. (1942):** Der gleichaltrige Buchen-Fichten-Mischbestand. Mitt. Forstwirt. Forstwiss. 13: S. 1-88

Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Küstentanne (*Abies grandis*) und Fichte (*Picea abies*) auf vernässten Standorten

H. Fölster, Y. Xu

1 EINLEITUNG

Auf vernässten Standorten muß mit Windwürfen und reduziertem Wachstum gerechnet werden. Dies erschwert in der Forstpraxis die Entscheidung für die Wahl einer Baumart zur Waldbegründung, die ökologische und ökonomische Aspekte auf lange Zeit berücksichtigen muß. Die Küstentanne weist eine große ökologische Plastizität auf (RÖHRIG 1978) und ist bereits auf solchen Standorten gepflanzt worden. Ob sie hierfür eine langfristig waldbauliche Alternative ist, hängt wesentlich von dem Verhalten ihrer Wurzeln unter staunassen Bedingungen ab. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung konzentriert sich deshalb auf die Frage, inwieweit die Staunässe mit ihren verschiedenen Ausprägungen und den daraus resultierenden bodenchemischen Zuständen die Erschließungstiefe und Intensität der Küstentannen-Wurzeln beeinflussen kann. Als Vergleichsbaumart wurde Fichte ausgewählt, da zum einen im Hunsrück Fichtenbestände auf vernässten Standorten verbreitet sind und zum anderen ein breites Erfahrungs- und Untersuchungsmaterial vorliegt.

2 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND METHODEN

Die in den Forstämtern Wittlich-West, Kirchberg, Kastellaun und Kempfeld ausgewählten 8 Küstentannen- und Fichten-Flächen sind den 3 Höhenlagen kollin, submontan und montan zuzuordnen. Klimatisch sind die Standortbedingungen in den 3 Höhenstufen als 'warm frisch', 'kühl mäßig feucht' und 'kühl feucht' gekennzeichnet (Tab. 1). Da die meisten der untersuchten Böden ähnliche Ausgangsmaterialien haben: Hang-Löß auf tonschieferbürtiger Fließerde, ist hier das Potential für die Bildung von Pseudogleyen gegeben. Nach dem Untersuchungsziel wurden die Küstentanne/Fichte-Vergleichspaare auf den Grundformen III, VIII und IX festgelegt, wobei die Stauzone (Sw-Horizont) in folgenden Bodentiefen zuerst auftritt: in 100 cm=III, 65 cm=VII, 45 cm= VIII und 25 cm=IX.

Tab. 1: Untersuchungsfläche									
Höhenstufe	Forstämter	Forstreviere	BA BAK.	VP	Höhe	mmJ	tJ	Grf	Alt
Kollin	Wittlich-West	Bergweiler 16c	Kü Be16G	I	300	<700	> 9	IX	22
	Wittlich-West	Bergweiler 13a	Fi Be13F		300	<700	> 9	IX	24
	Wittlich-West	Bergweiler 24a	Kü Be24G	II	300	<700	> 9	III	31
	Wittlich-West	Bergweiler 24a	Fi Be24F		300	<700	> 9	III	30
Submontan	Kirchberg	Schlierschied 4b	Kü Sch4G	III	410	720	7-8	III	22
	Kirchberg	Schlierschied 4b	Fi Sch4F		420	720	7-8	III	22
	Kastellaun	Klosterkumbd 222b	Kü K1222G	IV	450	750	7-8	IX	20
	Kastellaun	Klosterkumbd 222b	Fi K1222F		450	750	7-8	IX	24
	Kastellaun	Rothenberg 241a	Kü Ro241G	V	450	750	7-8	VIII	25
	Kastellaun	Rothenberg 241a	Fi Ro241F		450	750	7-8	VIII	23
Montan	Kempfeld	Allenbach-Süd 40b	Kü A140G	VI	550	1000	6-7	IX	23
	Kempfeld	Allenbach-Süd 40b	Fi A140F		550	1000	6-7	IX	25
	Kempfeld	Allenbach-Süd 44c	Kü A144G	VII	530	1000	6-7	VIII	21
	Kempfeld	Allenbach-Süd 44c	Fi A144F		530	1000	6-7	VIII	21
	Kempfeld	Allenbach-Nord 40b	Kü A140G2		570	1000	6-7	VII	23
	Kempfeld	Allenbach-Nord 67a	Fi A167F		570	1000	6-7	III	18

BA = Baumart; BAK. = Bestandesabkürzung; VP = Vergleichspaare; Höhe = m ü.NN; mmJ = jährliche Niederschlagsmenge (in mm); tJ = Jahresmitteltemperatur (C); Grf = Feuchtigkeitsstufe(Grundform); Alt = Bestandesalter

Die Altersunterschiede innerhalb eines Vergleichspaares, also eines Küstentannen- und eines Fichtenbestandes, sind meistens kleiner als 2 bis 4 Jahre. Altersbedingte Unterschiede in der Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung werden daher ausgeschlossen. Küstentanne und Fichte wurden damals häufig in weitem Verband (2.0 x 1.5 m) angepflanzt. Die Vorbestände waren oft ältere Fichtenrein- oder Mischbestände. Da die Bestände sich noch in ihrer Jugendwachstumsphase befinden, wurden dort nur wenige waldbauliche Maßnahmen in den letzten Jahren durchgeführt (ein- bis zweimalige Läu-terung). Ferner ist zu bemerken, daß die Küstentannen einiger Bestände aus dem Küstenbereich Norwestamerikas kommen, während die Herkünfte anderer Bestände nicht klar sind. Hinweise von Forstleuten lassen jedoch vermuten, daß auch sie überwiegend aus küstennahen Bereichen stammen.

Im Sommer 1988 wurde in jedem Bestand ein Schürfgraben von ca. 10 m Länge, 2 m Tiefe und 80 cm Breite in ostwestlicher Richtung gezogen. An den südlichen Grabenprofilwänden wurde 10 cm²-weise die Anzahl der Wurzeln in verschiedenen Durchmes-

serklassen erfaßt, die folgendermaßen eingeteilt sind (in mm): Feinwurzel 0.8-2, Schwachwurzel 2-5, Grobwurzel 5-10, Derbwurzel 10-20, Dickwurzel 20-50 und Starkwurzel > 50. Nach dem Wurzelzählen wurden aus der Profilwand Trockenraum-dichte- und bodenchemische Proben (Ake) gewonnen. Unmittelbar um die Schürfgärten wurden die Höhen und Brusthöhendurchmesser an jeweils ca. 40-50 Bäumen erhoben.

3 ERGEBNISSE

3.1 Bodenchemische Verhältnisse

In den kollinen und submontanen Stufen zeigen die Böden auf den nicht vernässten Grundformen III deutlich bessere Calcium und Kalium-Versorgungen sowie höhere Phosphor-Gehalte als die auf den vernässten Grundformen VIII und IX. Die Abbaubedingungen im Oberboden auf den vernässten Standorten sind ungünstig, dort sind daher die C/N-Verhältnisse schlechter. Mangan (Mn) besitzt eine höhere Belegung am Austauscher in den nicht vernässten Böden als in den vernässten. Beim Eisen (Fe) ist es dagegen umgekehrt. In der montanen Stufe sind die Verhältnisse von Fe, Mn und P zwischen den Grundformen ähnlich wie in der kollinen und submontanen Stufen. Allerdings unterscheidet sich hier die Basenversorgung zwischen den Grundformen nur geringfügig, denn die Basen, besonders Ca und Mg, sind auf allen Grundformen stark ausgewaschen. Die Vernässung verzögert dort sogar diese starke Auswaschung: Mit einigen Ausnahme sind Calcium und Magnesium am Austauscher im Oberbodenbereich (0-20 cm) und im Unterbodenbereich (80-100 cm) auf den vernässten Grundformen stärker vertreten als auf der nicht vernässten Grundform III. In dieser Höhenlage findet eine stärkere Akkumulation von C, N und P im Oberboden (0-20 cm) statt. Eine detaillierte Darstellung der Analysenergebnisse findet sich bei XU (1990).

3.2 Wurzelerschließungstiefe und Wurzeltiefengradient

- 1) Auf gleichem Standort haben die Küstentannen-Wurzeln in allen Wurzelklassen eine größere Erschließungstiefe als die Fichten- Wurzeln (Abb. 1,2 und 3). Dies ist insbesondere auf den vernässten Standorten in den kollinen und submontanen Stufen deutlich. Dort dringen die Küstentannenwurzeln fast aller Durchmesserklassen auf gleicher Grundform mehr als 20 cm tiefer in die Böden vor als die Fichtenwurzeln.

In der feuchten montanen Stufe zeigt sich die Überlegenheit der Küstentanne allerdings auf dem stark vernässten Standort (Grundform IX) nicht sehr deutlich. Dies ist wahrscheinlich auf die dort bessere Wasserversorgung der Fichtenwurzeln in der Vegetationszeit zurückzuführen.

- 2) Die Wurzeltiefe der Küstentanne wird im wesentlichen von der Staunässeintensität bestimmt. In dieser jüngeren Altersklasse erreicht die Küstentanne mit ihren Wurzeln maximal 60-90 cm Bodentiefe auf vernässten Standorten, dagegen 120-140 cm auf nicht vernässten Standorten. Eine Störung des Tiefenwachstums der Wurzeln ist in allen Bodentiefenstufen auf dem nicht vernässten Standort (Grundform III) in keiner Bodentiefe zu erkennen. Auf den stark vernässten Standorten (Grundform IX) ist dagegen im Bereich zwischen Sw- und Sd-Horizont eine Hemmung des Tiefenwachstums der Wurzeln, insbesondere der größeren Wurzeln (> 5 mm), deutlich zu sehen. Die Situation verbessert sich allerdings dort drastisch, wo die Staunässe etwas schwächer wird. So zeigen die Küstentannenwurzeln aller Durchmesserklassen auf der Grundform VIII 10-30 cm tiefere Durchwurzelung und deutlich schwächere Tiefengradienten als auf der Grundform IX, obwohl der Sw-Horizont dort nur ca. 10 cm tiefer, der Sd-Horizont aber in fast gleicher Bodentiefe wie auf der Grundform IX vorkommt. Die Ergebnisse lassen eine deutliche Tendenz erkennen, daß ein tieferes Wurzelsystem der Küstentanne mit zunehmender Staunässeintensität zu einem flacheren Wurzelsystem wird, wobei sich die krasse Veränderung beim Wechsel zur Grundform IX abzeichnet.
- 3) Viel empfindlicher reagiert das Wurzeltiefenwachstum der Fichte auf den Bodenwasserhaushalt. Dabei sind die Fein- und Schwachwurzeln am stärksten betroffen. In der kollinen und submontanen Stufe erscheinen die Fichtenwurzeln beim Auftreten des Sw-Horizonts bereits als sehr gestört und dringen maximal 50 cm in den Boden vor. Auf der nicht vernässten Grundform III sind dagegen die Fein- und Schwachwurzeln noch in 90 bis 100 cm Bodentiefe zu finden. In der feuchten montanen Stufe wachsen die Fein- und Schwachwurzeln auf den vernässten Grundformen VIII und IX wahrscheinlich aufgrund verbesserter Wasserversorgung in der Vegetationszeit um 10 bis 40 cm tiefer als auf den gleichen Grundformen in der kollinen oder submontanen Stufe. Damit verringert sich der Unterschied des Wurzeltiefenwachstums zwischen den Grundformen. Ein weiterer Unterschied zu den Küstentannen-

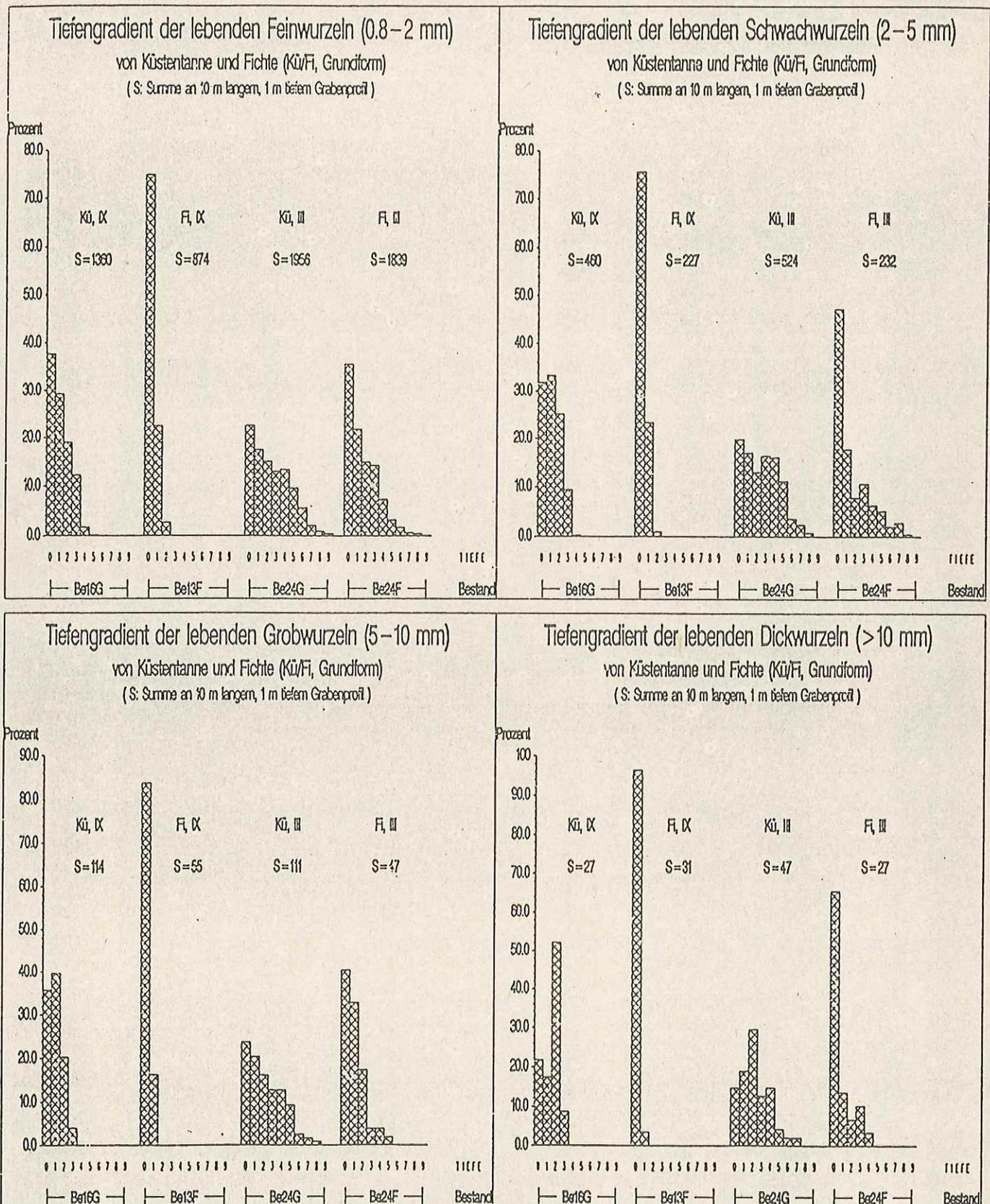


Abb. 1: Vertikalverteilung der lebenden Küstentannen- und Fichtenwurzeln an den Schüfgrabenprofilen der untersuchten Böden in der kollinen Stufe (Tiefe in cm: 0: 0-10, 1: 10-20, 2: 20-30, 3: 30-40, 4: 40-50, 5: 50-60, 6: 60-70, 7: 70-80, 8: 80-90, 9: 90-100)

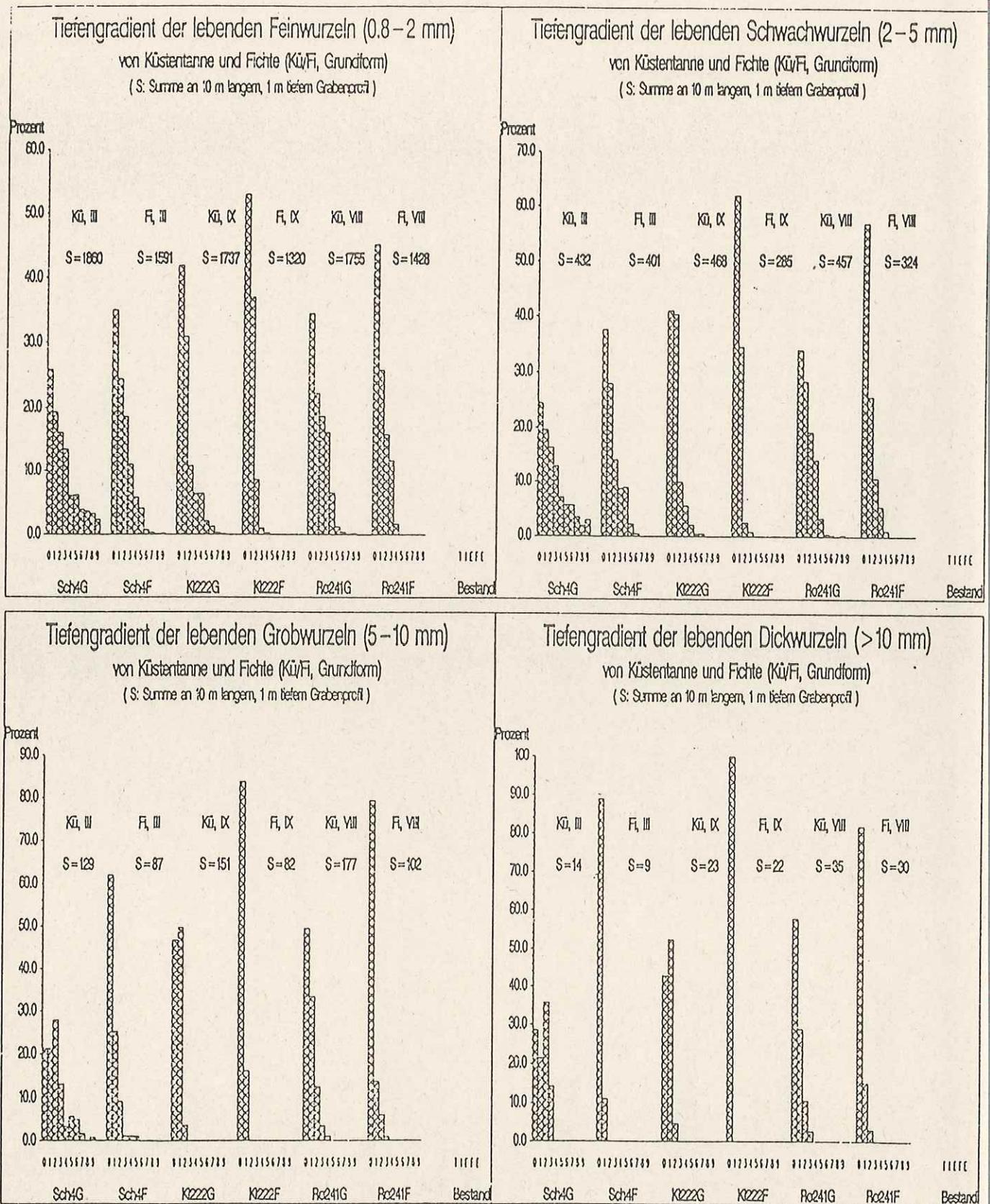


Abb. 2: Vertikalverteilung der lebenden Küstentannen- und Fichtenwurzeln an den Schüfgrabenprofilen der untersuchten Böden in der submontanen Stufe (Tiefe in cm: 0: 0-10, 1: 10-20, 2: 20-30, 3: 30-40, 4: 40-50, 5: 50-60, 6: 60-70, 7: 70-80, 8: 80-90, 9: 90-100)

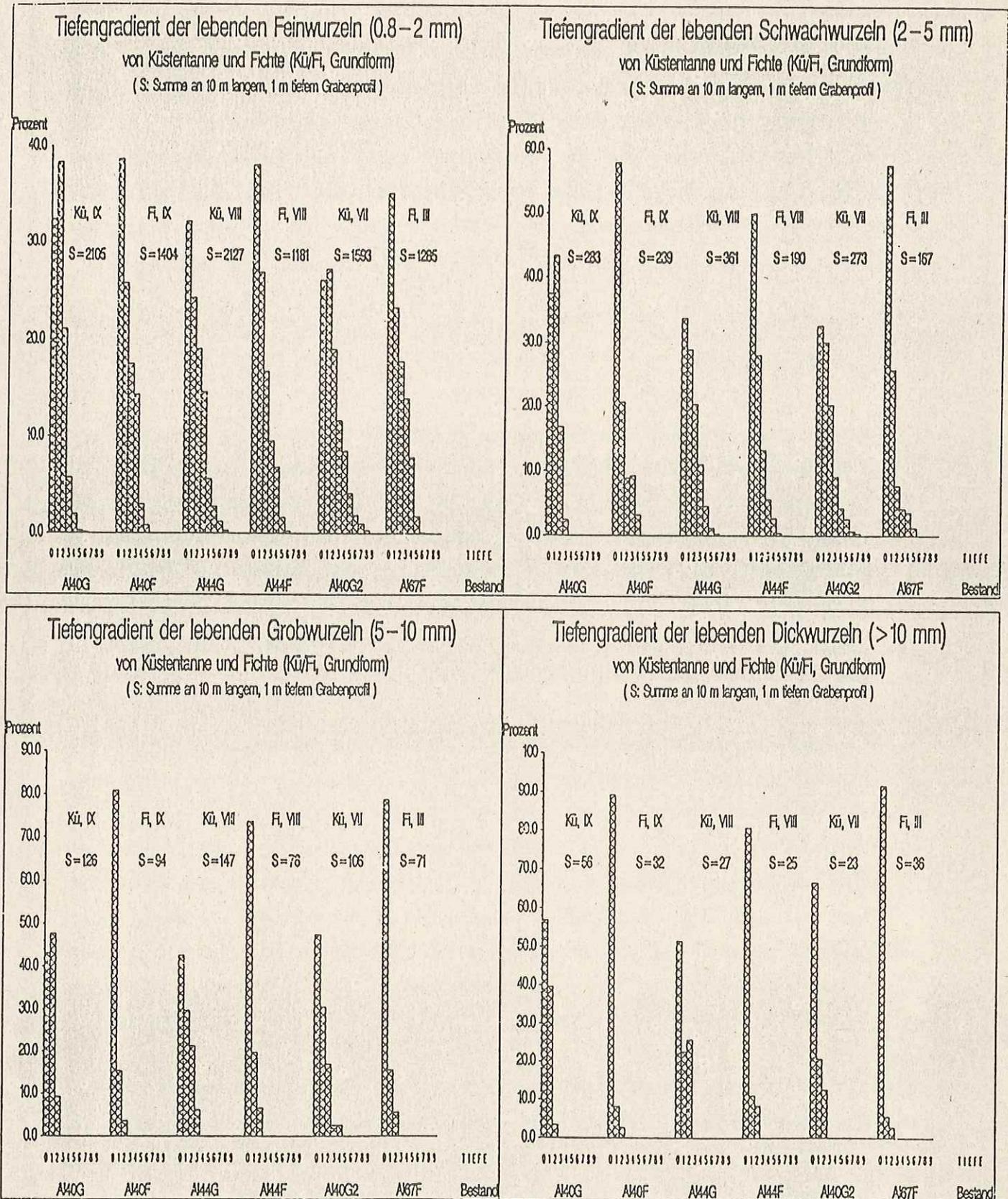


Abb. 3: Vertikalverteilung der lebenden Küstentannen- und Fichtenwurzeln an den Schüfgrabenprofilen der untersuchten Böden in der montanen Stufe (Tiefe in cm: 0: 0-10, 1: 10-20, 2: 20-30, 3: 30-40, 4: 40-50, 5: 50-60, 6: 60-70, 7: 70-80, 8: 80-90, 9: 90-100)

wurzeln ist, daß sich sowohl auf den vernässten Grundformen als auch auf der nicht vernässten Grundform die Fichtenwurzeln überwiegend im Oberboden (0-20 cm) konzentrieren und einen starken Tiefengradienten aufweisen. Diese Wurzelverteilung der Fichte deutet darauf hin, daß die Grundstruktur des Fichtenwurzelsystems (Senker) vom Standort wenig beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu ändert sich die Grundstruktur der Küstentannenwurzeln von einem Pfahlwurzelsystem auf den nicht vernässten Grundformen zu einem flacheren Herzwurzelsystem auf den vernässten Grundformen.

3.3 Wurzelichte

- 1) Im Vergleich mit der Fichte zeigt die Küstentanne nicht nur eine größere Durchwurzelungstiefe, sondern bei gleichem Baumabstand auch eine höhere Wurzelichte in fast allen Wurzelklassen an den Grabenprofilen. Auf vergleichbaren Standorten wurden bei der Küstentanne in der Gruppe der Fein- und Schwachwurzeln (0.8-5 mm) um 30%, in der Klasse der Derbwurzeln (5-10 mm) meistens um 70%, in der Klasse der Grobwurzeln (10-20 mm) um 40% höhere Wurzelzahlen beobachtet als bei der Fichte. Die Wurzelzahlen in stärkeren Wurzelklassen (> 20 mm) unterscheiden sich zwischen den beiden Baumarten relativ wenig.
- 2) Bei größerer Durchwurzelungstiefe zeigen beide Baumarten mit wenigen Ausnahmen geringere Wurzelichten in gröberen Wurzelklassen (> 10 mm). Insgesamt wurden, abgesehen von den Beständen in der kollinen Stufe, die größere Altersunterschiede zeigen (Tab. 1), bei beiden Baumarten auf den vernässten Grundformen VIII und IX um 60% mehr Wurzeln > 10 mm gezählt als auf der nicht vernässten Grundform III. Daß höhere Zahlen von gröberen Wurzeln auf den vernässten Standorten zu finden sind als auf den nicht vernässten Standorten, ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß sich die gröberen Wurzeln unter Vernässungsbedingungen frühzeitig verzweigen. Dies wurde auch bei KREUTZER et al. (1988) gefunden.
- 3) Auch bei größerer Durchwurzelungstiefe zeigen sich am Schürfgabenprofil nicht unbedingt höhere Dichten der Fein- und Schwachwurzeln. Sie scheinen nicht nur von der Bodenwasserversorgung in der Vegetationszeit, sondern auch, oder sogar im wesentlichen, von bodenchemischen Bedingungen bestimmt zu werden. Die Prüfung der bodenchemischen Verhältnisse legt den Verdacht nahe, daß die Feinwurzelichten in der Vegetationszeit neben der Wasserversorgung vor allem von der N- und P-Versorgung des Bodens beeinflusst werden.

3.4 Oberirdisches Wachstum sowie seine Beziehung zur Feinwurzelzahl

- 1) Auf allen Standorten (Grundformen III, VII, VIII und IX) weist die Küstentanne ein stärkeres Höhen- und Dickenwachstum auf als die Fichte. Normiert auf ein Alter von 25 Jahren haben die Küstentannen-Bestände bei der Spitzenhöhe mehr als 2 m größere Leistungen erbracht als die Fichten-Bestände auf der gleichen Grundform (Tab. 2). Die Küstentanne ist der Fichte auch im Dickenwachstum beträchtlich überlegen: Auf vergleichbarem Standort liegen die Durchmesser der Küstentanne in allen Fällen über denen der Fichte, unabhängig davon, ob die Stammzahl höher oder niedriger als in den Fichtenparzellen ist. Diese Überlegenheit des oberirdischen Wachstums von Küstentanne ist, wie beim Wurzelwachstum, besonders stark auf den Grundformen III und VIII.

- 2) Da die Anzahl der untersuchten Bestände in jeder Höhenlage gering ist, ist eine Aussagekraft über die Auswirkung der Höhenlage auf Wachstum der Küstentanne und Fichte beschränkt. Mit aller Vorsicht lassen sich jedoch die Untersuchungsergebnisse wie folgt diskutieren: In allen Höhenstufen weisen beide Baumarten die jeweils besten Bonität auf der nicht vernässten Grundform III (Ausnahme Sch4F) auf, wobei in der kollinen und submontanen Stufe die Bonitätsunterschiede zwischen den Grundformen deutlich sind. Mit zunehmender Höhenlage im Untersuchungsgebiet verbessern sich die Bonitäten beider Baumarten auf den vernässten Grundformen, insbesondere der Grundform VIII, obwohl die Böden dort stark entbast und mit Al^{3+} und H^{+} -Ionen angereichert sind. Diese Wachstumsreaktion mit steigender Höhenlage ist bei der Fichte stärker als bei der Küstentanne. Diese Ergebnisse deuten auf den Einfluß der Wasserversorgung in der Vegetationszeit hin: die saisonale Austrocknung und der erschwerte Zugang der Wurzeln zum Grundwasser in den Pseudogleyen der kollinen Stufe sind ungünstig für das Wachstum, während die Pseudogleye in der montanen Stufe wegen der höheren Niederschlagsmengen und der geringeren Wasserverdunstung in der Vegetationszeit gut mit Wasser versorgt sind.

- 3) Die Höhenbonität korreliert positiv mit der gesamten Feinwurzelzahl am Grabenprofil (Abb. 4). Diese Korrelation ist bei der Küstentanne ($r=0.76$) enger als bei der Fichte ($r=0.58$). Es ist wohl anzunehmen, daß die beiden Parameter aus ober- bzw. unterirdischem Wachstum wohl noch enger miteinander korrelieren würden, wenn die Bestände gleichaltrig und ähnlich bestockt wären. Daß die Bonität mit zu-

Tab. 2: Bestandesgrundlage aller 16 Untersuchungsbestände								
Höhenstufe	Bestand (BAk.)	Alt. (J.)	Ertragsdaten					
			ST(N/ha)	Dg(cm)	Hg(m)	H100(m)	H100n(m)	Etkl
Kollin	Be16G	22	2304	11.2	8.8	12.0	14.2	17.2
	Be13F	24	2361	9.5	7.7	9.9	10.4	I.5
	Be24G	31	1497	20.4	20.5	22.6	17.7	24.0
	Be24F	30	1941	16.1	15.9	18.0	14.0	0.0
Submontan	Sch4G	22	2593	14.6	13.0	15.4	18.0	25.0
	Sch4F	22	3229	9.0	8.3	10.4	11.9	0.6
	Kl222G	20	2575	11.1	8.7	11.0	14.8	19.0
	Kl222F	24	2448	10.9	9.2	11.7	12.2	0.9
	Ro241G	25	2037	15.4	13.1	16.0	16.0	21.0
	Ro241F	23	1707	12.0	10.4	12.1	13.1	0.3
Montan	Al40G	23	1574	16.9	11.5	13.8	15.4	20.5
	Al40F	25	1225	14.1	11.2	13.5	13.5	0.3
	Al44G	21	1538	17.3	13.0	14.8	18.6	26.0
	Al44F	21	1500	13.7	11.5	12.9	14.9	0.0
	Al40G2	23	1378	15.0	10.7	12.7	14.9	18.0
	Al67F	18	1683	12.0	8.7	10.7	14.2	0.0

ST = Stammzahl; Dg = BHD des Grundflächenmittelstammes; Hg = Höhe des Grundflächenmittelstammes; H100 = Spitzenhöhe; H100n = im Alter von 25 J. normierte Spitzenhöhe; Etkl = Ertragsklasse [bei Küstentanne nach der englischen Tafel von Hamilton und Christie (1971), bei Fichte nach der von KRAMER (1982) anhand der WIEDEMANN'schen Tafel extrapolierten Tafel]

nehmender Feinwurzelzahl ansteigt, ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die erhöhte Aufnahme von Wasser und Nährstoffen durch eine vergrößerte Wurzelauflagefläche den Zuwachs begünstigt.

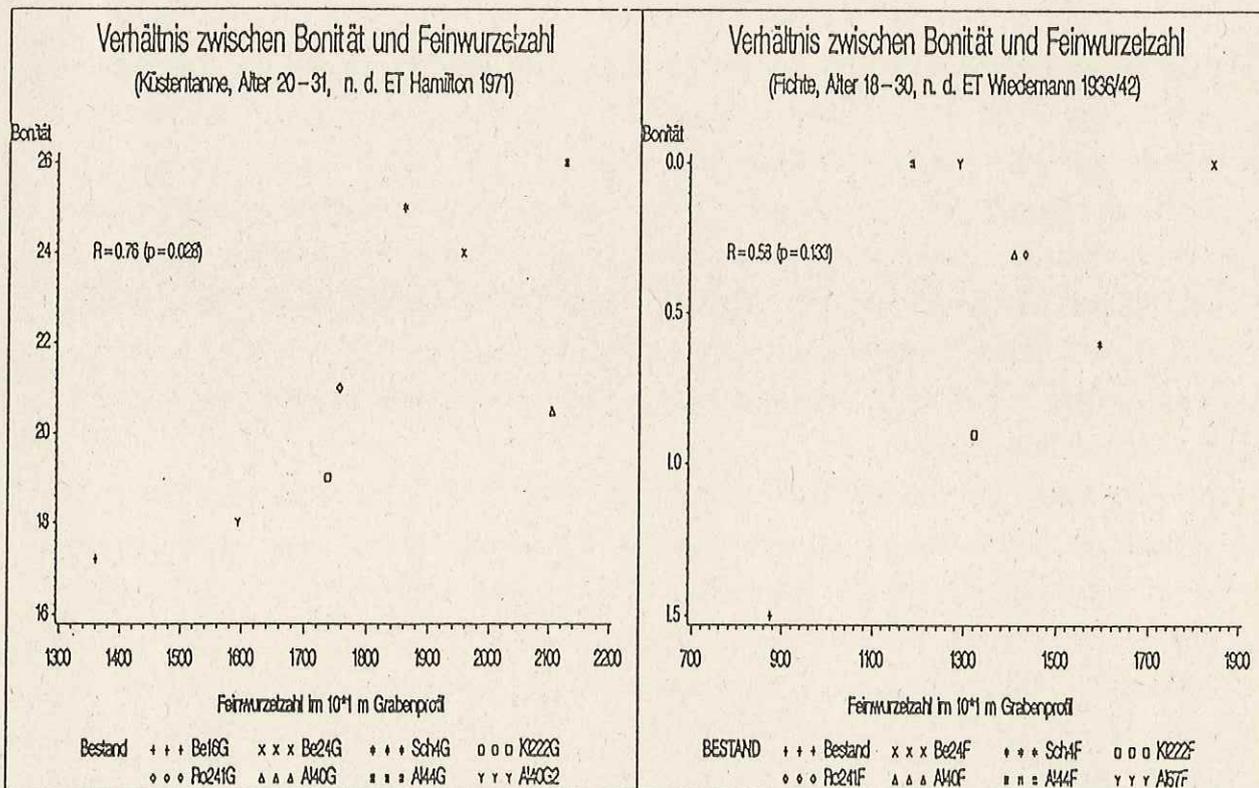
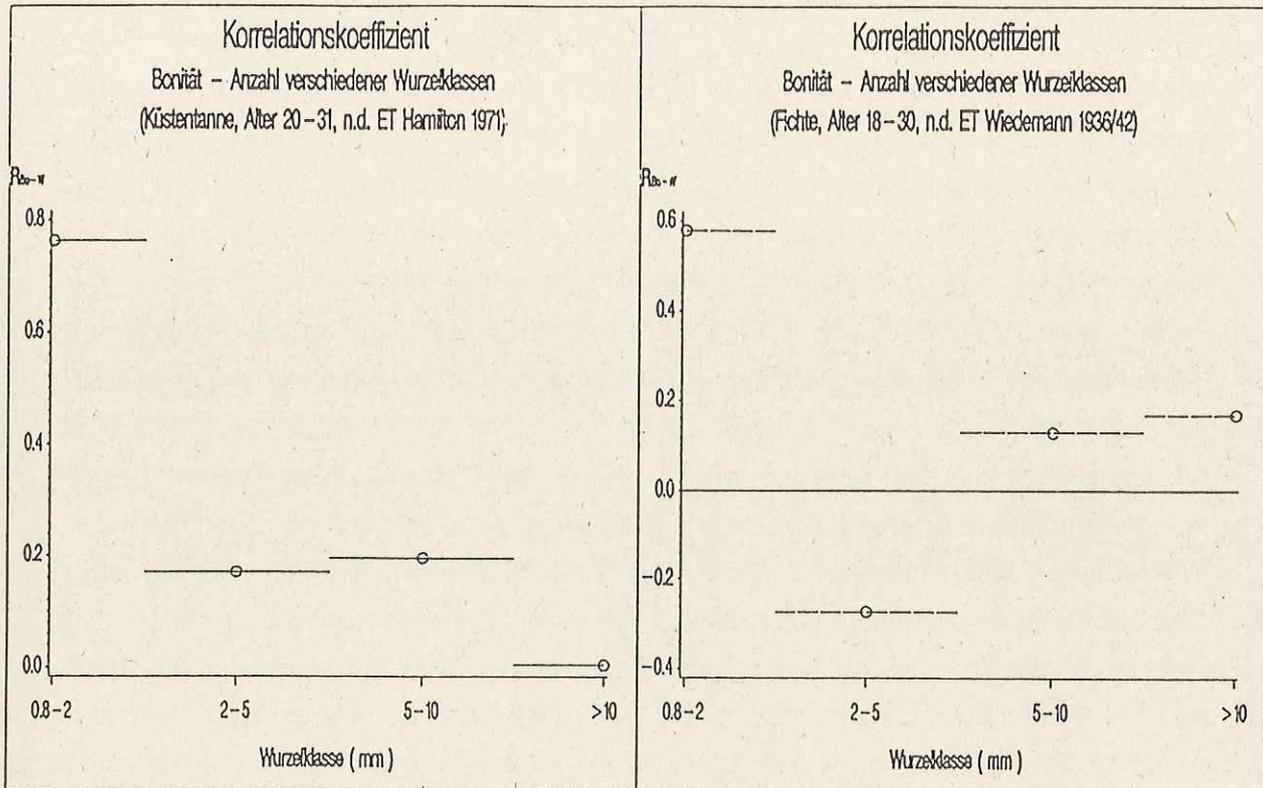


Abb. 4a-b: a(oben): Korrelationskoeffizient zwischen Bonität und Wurzelzahl in verschiedenen Durchmesserklassen.
b(unten): Beziehung zwischen Feinwurzelzahl und Bonität

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die größere Menge und Erschließungstiefe der Fein- und Schwachwurzeln in vernässten Böden der Küstentannen-Bestände im Vergleich zu den Fichten-Beständen bedeuten, daß das gestaute Wasser besser in die Transpiration eingebracht und tieferliegende Wasservorräte in Trockenphasen besser erschlossen werden können. Die tiefere Wurzelerschließung trägt ferner zur biologischen Verbesserung des Unterbodens des Pseudogleys bei. Unter der Fichte bleiben diese Funktionen der Wurzeln hauptsächlich auf den Oberboden beschränkt, da sie in vernässten Böden um und über 80% ihrer gesamten Fein- und Schwachwurzeln im Oberbodenbereich (0-20 cm) konzentriert. Die Wurzelverteilungen in den größeren Wurzelklassen erlauben Aussagen zur Bestandesstabilität der beiden Baumarten. Es ergibt sich, daß die Küstentanne auch hier der Fichte nach Wurzelmenge und Wurzelerschließungstiefe beträchtlich überlegen ist. Dies ist deutlicher auf der nicht vernässten Grundform III und der mäßig vernässten Grundform VIII. Dagegen birgt die Verflachung des Wurzelsystems der Fichte die Gefahr einer zunehmenden Verdichtung des Unterbodens und einer geringeren mechanischen Verflechtung zwischen diesem und dem Wurzelteller. Sie ist daher für vernässte Böden nicht geeignet.

Was die Ausgangs-Fragestellung dieser Untersuchung betrifft, ob von der Küstentanne eine höhere Stabilität auf Pseudogleyböden zu erwarten ist, so sprechen alle Wurzelparame-ter für eine positive Beantwortung. Dies gilt ohne Einschränkung für vernässte Böden der Grundform VIII. Gerade auf solchen Standorten ist auch ihr größeres oberirdisches Wachstum ein zusätzlicher Gewinn. Dabei muß aber offen bleiben, ob ihr beträchtliches Höhenwachstum eine stärkere Windbelastung mit sich bringt, oder ob diese unerheblich bleibt, solange der Bestand genügend homogen ist. Positiv dürfte sich auswirken, daß die Krone der Küstentanne aufgrund ihrer waagrecht stehenden Äste relativ winddurchlässig ist.

Im Bundesland Rheinland-Pfalz wurde die Küstentanne bis 1984 auf über 1000 ha gepflanzt; ihr Anteil betrug 0.2% der Gesamtwaldfläche. Weiterer Anbau der *Abies grandis* (mit einigen anderen fremdländischen Tannen) wird langfristig auf einem Waldanteil von 3% geplant. Die vorliegende Untersuchung spricht eigentlich für eine stärkere Forcierung ihres Anbaus auf Standorten der nicht vernässten Grundform III bis zur mäßig vernässten Grundform VIII. Auf Böden der stark vernässten Grundform IX dagegen stößt auch die Küstentanne an eine natürliche Grenze und ist als Hauptbestand nicht zu empfehlen. Gerade dort bieten sich allerdings wenige Möglichkeiten zur Lösung waldbaulicher Probleme. Allenfalls kommt hier die Küstentanne als eine beglei-

tende Baumart für eine Mischkultur in Betracht. Versuchsweise kann sie dort in weiten Verbänden angepflanzt werden, damit natürlich ankommende Arten (Birke, Vogelbeere u.a.) mitwachsen können.

5 ZUSAMMENFASSUNG

An den Schürfgrabenprofilen in jeweils 8 Küstentannen- (20-31 J.) und Fichten-Beständen (18-30 J.) im Hunsrück bzw. in der westlichen Eifel wurden die Wurzelverteilung und die Durchwurzelungstiefe untersucht. Diese Bestände sind in 3 Höhenlagen (kollin, submontan und montan) und jeweils auf den vernässten Grundformen VII, VIII bzw. IX und der nicht vernässten Grundform III verteilt. Die Küstentanne zeigt gegenüber der Fichten deutlich tiefere Wurzelerschließung und größere Wurzelichte auf den Grundformen III und VIII. Auf dem ausgeprägt vernässten Standort (Grundform IX) stößt sie jedoch an ihre natürliche Grenze. Dies ist insbesondere in höheren Lagen erkennbar.

6 LITERATUR

- HAMILTON, G. J., CHRISTIE, J. M. (1971): Forest Management Tables (Metric). Her Majesty's Stationery Office, London
- KRAMER, H. (1982): Nutzungsplanung in der Forsteinrichtung. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main
- KREUTZER, H., FÜHRICH, M., ZERCHER, H. (1988): Wurzeluntersuchungen an *Abies grandis*. Allg. Forst Zeitung 25: S. 720-721
- RÖHRIG, E. (1978): Anbau-Ergebnisse mit *Abies grandis* in Deutschland. In: Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 54
- Y. XU (1991): Ökologische Grundlagen für den Anbau der Großen Küstentanne (*Abies grandis* Lindl.) auf vernässten Böden. Bericht des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 67

Untersuchungen zur Verankerung von Fichten auf Braunerde-, Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyböden des Vorderen Hunsrücks

N. Rastin

1 EINLEITUNG

Sturmschäden sind eine Funktion der Sturmfestigkeitsdeterminanten und der Entscheidungsparameter (NIELSEN 1988). Die Komponenten der Sturmfestigkeitsdeterminanten sind zwei gegeneinander wirkende Einflüsse, nämlich das auf den oberirdischen Teil wirkende Sturmmoment und das von den unterirdischen Teilen gebildete Verankerungsmoment. Beide Komponenten sind in Wirklichkeit sehr komplex und von vielen verschiedenen Faktoren sowie der Wechselwirkung dieser Faktoren abhängig. Sehr vereinfacht kann man sagen, daß bei einem Sturm die Bäume mit dem Verankerungsmoment/Sturmmomentverhältnis größer als 1 stehen bleiben. Wird dieses Verhältnis kleiner als 1, so werden die Bäume geworfen. Diese Zweiteilung der zwei gegeneinander wirkenden Komponenten, nämlich das Sturmmoment und das Verankerungsmoment, ist deshalb logisch, weil es ab und zu für Forstleute möglich ist, das Verankerungsmoment zu beeinflussen, ohne das Sturmmoment zu ändern und umgekehrt. Um ein Beispiel zu nennen: Eine Änderung in den Bodenverhältnissen kann die Verankerung verbessern, ohne das Sturmmoment zu beeinflussen, oder eine Wipfelköpfung kann das Sturmmoment beeinflussen, ohne das Verankerungsmoment zu ändern.

Während die Erfassung des Sturmmomentes sehr schwierig ist, können die Verankerungslösungsprozesse eines Baumes mit einer Baumauszugung unter kontrollierten Bedingungen simuliert werden. Dabei kann nicht nur der gesamte Effekt aller beteiligten Verankerungsfaktoren in einem zusammenfassenden Meßwert ausgedrückt werden, sondern es kann auch eine kausale Quantifizierung aller beteiligten Verankerungsfaktoren erfolgen.

Ziel dieser Teiluntersuchungen war es, einige der wichtigen Verankerungsparameter im Braunerde-, Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyböden zu quantifizieren, ferner festzustellen, ob sie von einigen Standortsfaktoren abhängig sind, und zu überlegen, ob und wie diese Parameter durch forstliche Maßnahmen beeinflußt werden können.

2 UNTERSUCHTE BESTÄNDE

Die für diese Teiluntersuchung herangezogenen Bestände befinden sich auf einem Braunerde- (Grundform III), Braunerde-Pseudogley- (Grundform VIII) und Pseudogleyboden (Grundform IX). Alle drei Flächen sind waldbaulich etwa gleich behandelt worden. Die Grundformen VIII und IX befinden sich innerhalb der für die Depositionsmessungen ausgewählten Gebiete (RASTIN 1991). Bei Grundform III handelte es sich dagegen um ein anderes Gebiet (Forstamt Simmern, Forstrevier Kisselbach, Abteilung 22a, 425-445 m über NN).

3 MESSPARAMETER UND MESSMETHODEN

Für die Erfassung der Verankerungsparameter wurden 10 Bäume je Bestand ausgewählt und umgezogen. Bei der Auswahl der Bäume wurde darauf geachtet, daß die Bäume in Bezug auf Höhe, BHD und soziologische Stellung in den untersuchten Beständen miteinander vergleichbar sind.

Vor dem Auszug der Bäume wurden die Kronen der Bäume in 10 m Höhe gekappt und die Kronenbiomasse erfaßt (Methode siehe RASTIN und ULRICH 1991).

Für den Auszug der Bäume und die Erfassung der wichtigsten Verankerungsparameter wurde die Methode von COUTTS (1983) und NIELSEN (1988) verwendet. Als wichtigste Verankerungsfaktoren wurden bei den Einzelbäumen folgende Parameter erfaßt:

- maximale Umziehungskraft (maximales Verankerungsmoment) und Baumamplitude (Stammausneigung in 2 m Höhe), Wurzelhebung und Wurzelballenhebung bei der maximalen Umziehungskraft
- Umziehungskraft, die notwendig war, um die Wurzelballen 1 mm anzuheben (= Verankerungsmoment bei 1 mm Wurzelballenhebung; Zeitpunkt, an dem Schäden am Wurzelsystem auftreten) sowie Baumamplitude und Wurzelhebung bei 1 mm Wurzelballenhebung.
- Das Wurzelquerschnittareal der Horizontalwurzeln in 40 cm und 80 cm Radius von der Stockmitte sowie das Wurzelquerschnittareal der Senker und die Länge der Senker (= Durchwurzelungstiefe) dicker als 10 mm.

Die Bedeutung dieser Faktoren für die Verankerung des Baumes ist von NIELSEN (1988) und COUTTS (1983, 1986) ausführlich beschrieben worden. Das methodische Vorgehen beim Auszug der Bäume und die Ermittlung der o.g. Verankerungsparameter sind in RASTIN und ULRICH (1990) beschrieben.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Kronenbiomasse

Die Krone der Bäume spielt bei der Windwurfproblematik eine wichtige Rolle. Die Bedeutung der Baumkrone als Kraftempfänger durch Wind ist bei Wipfelköpfung und Ästung eindeutig nachgewiesen worden (HÜTTE 1964 und 1968). MAYHEAD et al. (1975) führten Windtunnelexperimente mit verschiedenen Nadelbaumarten zur Beschreibung der Kraftübertragung von Wind auf die Baumkrone durch und stellten fest, daß die größte Genauigkeit bei der Prognostizierung der Kraftübertragung anhand des "Kronengewichtes" zu erreichen ist.

Dabei war die Kraftaufnahme ab einer Windgeschwindigkeit von rund 8 m/Sekunde annähernd linear vom "Kronengewicht" abhängig.

In den drei untersuchten Standorten zeigten die ausgezogenen Bäume in bezug auf BHD, Höhe und Kronenlänge auf Braunerde- und Pseudogley-Boden ähnliche Medianwerte (Tab. 1). Sie zeigten aber deutliche Unterschiede in ihrer Kronenbiomasse, sowohl bei den Medianwerten als auch beim Vergleich der Einzelbäume mit ähnlichem BHD und Höhe. Dabei bildeten die Bäume auf Pseudogleyboden deutlich höhere Kronenbiomasse aus als die auf Braunerde. Die ausgezogenen Bäume auf Braunerde-Pseudogley hatten im allgemeinen etwas kleineren BHD und Kronenlänge und zeigten eine ähnliche Kronenbiomasse wie auf der Braunerde.

Tab. 1: Median- sowie Minimum- und Maximumwerte der Kronenbiomasse der ausgezogenen Bäumen in den untersuchten Standortgrundformen (n = 10)

Parameter	Braunerde	Braunerde-Pseudogley	Pseudogley
BHD (cm)	36.6 30. - 42.	35.0 25. - 42.	36.2 26.6 - 44.5
Höhe (m)	32.0 30.6 - 34.7	32.2 28.8 - 33.9	31.4 28.6 - 34.5
Kronenlänge (m)	10.1 6.9 - 12.7	9.5 6.6 - 12.	10.0 7.6 - 14.6
Kronenbiomasse (kg Frischgewicht)	157 95 - 256	158 47 - 285	217 144 - 337

4.2 Verankerungsmoment, Baumamplitude sowie Wurzelballen- und Wurzelhebung

In Tab. 2 sind die Median- sowie Minimum- und Maximumwerte für die untersuchten Verankerungsparameter angegeben. Wie bei der Kronenbiomasse zeigen sich zwischen Braunerde- und Pseudogleyboden in den Medianwerten Unterschiede beim maximalen Verankerungsmoment. Dabei war auf dem Pseudogleyboden im Mittel weniger Kraft als auf dem Braunerdeboden notwendig, um die Bäume auszuziehen. Die Unterschiede zwischen den o.g. Standorten waren noch deutlicher zu dem Zeitpunkt, als der Wurzelballen 1 mm angehoben war, d.h. zu dem Zeitpunkt, bei dem Verankerungsschäden auftreten. Das Verankerungsmoment und die Wurzelhebung zu diesem Zeitpunkt waren im Pseudogleyboden um ca. die Hälfte, die Baumamplitude um 3/4 niedriger als im Braunerdeboden.

Im Braunerde-Pseudogleyboden erreichte das mittlere maximale Verankerungsmoment Werte zwischen denjenigen der Braunerde und dem Pseudogley, die Baumamplitude und die Wurzelhebung beim maximalen Verankerungsmoment war jedoch höher als bei den ausgezogenen Bäumen auf der Braunerde. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, daß die ausgezogenen Bäume auf dem Braunerde-Pseudogley verankerungsvorgeschädigt waren. Nach NIELSEN (1988) zeigen die verankerungsbeschädigten Bäume im Mittel um 80% größere durchschnittliche kritische Amplituden als die unbeschädigten Bäume, d.h. bei vorgeschädigten Bäumen ist eine größere Stammneigung notwendig, um zusätzliche Schäden auszuüben. Interessanterweise war das mittlere Verankerungsmoment bei 1 mm Ballenhebung auf dem Braunerde-Pseudogleyboden sogar niedriger als auf dem Pseudogleyboden, was die Vermutung bestärkt, daß die ausgezogenen Bäume auf dem Braunerde-Pseudogleyboden eventuell vorgeschädigt waren.

Tab. 2: Median- sowie Minimum- und Maximumwerte der ermittelten Verankerungsparameter an den ausgezogenen Bäumen in den drei untersuchten Beständen 9-10)

Parameter	Braunerde	Braunerde- Pseudogley	Pseudogley
Maximale Verankerung (N*m)	6527 3559-10913	5668 1790-11284	4911 3208-10608
Amplitude bei max. Verankerung (mm)	123 88-187	142 64-158	89 50-145
Wurzelhebung bei max. Verankerung (mm)	25 7-52	38 20-55	23 4-51
Verankerung bei 1 mm Ballenhebung (Nm)	6390 2491-8798	3406 713-6686	3561 1269-4832
Amplitude bei 1 mm Ballenhebung (mm)	76 37-112	29 21-45	23 8-63
Wurzelhebung bei 1 mm Ballenhebung (mm)	12 2-19	8 6-9	5 2-11
Zahl der Horizontalwurzeln 1. Radius	9 5-10	7 4-15	9 6-11
Zahl der Horizontalwurzeln 2. Radius	6 5-11	7 5-9	10 5-12
Wurzelquerschnittareal 1. Radius (cm ²)	1216 412-1579	1328 407-2806	1650 1146-2754
Wurzelquerschnittareal 2. Radius (cm ²)	462 295-628	763 393-2139	877 426-1467
Zahl der Senker > 10 mm	25 18-36	26 14-39	30 19-45
Wurzelquerschnittareal der Senker (cm ²)	831 462-7321	823 256-1099	444 308-2863
Mittlere Länge (cm)	65 40-88	55 34-75	43 30-54
Maximallänge (cm)	82 51-110	74 41-89	52 36-67
Mittlerer Abstand v. Stockmitte (cm)	57 47-73	66 53-100	67 55-85
Maximum-Abstand v. Stockmitte (cm)	77 72-104	87 67-130	85 64-108

4.3 Wurzelquerschnittareal der Horizontal- und Vertikalwurzeln

Die ausgezogenen Bäume zeigen auch im unterirdischen Teil Unterschiede zwischen den untersuchten Standorten, insbesondere zwischen Braunerde- und Pseudogleyboden (Tab. 2): Obwohl die Anzahl der Horizontalwurzeln der ausgezogenen Bäume im 40 cm Radius von der Stockmitte (1. Radius) im Braunerde- und Pseudogleyboden gleich ist, zeigen die Bäume auf dem Pseudogleyboden im Mittel um 434 cm^2 größere Horizontalwurzelschnittareale. Das Wurzelquerschnittareal im 40 cm Radius ab Stockmitte ist im Braunerde-Pseudogleyboden zwar im Mittel etwas höher als im Pseudogleyboden, die Unterschiede sind jedoch verhältnismäßig gering (um etwa 100 cm^2).

Die Unterschiede beim Horizontalwurzelschnittareal zwischen Braunerde- und Pseudogleyboden waren im Mittel größer als im 80 cm Radius ab Stockmitte (2. Radius): Auf Pseudogleyboden waren sowohl die Anzahl als auch das Wurzelquerschnittareal der Horizontalwurzeln fast doppelt so groß wie auf Braunerdeboden. Die Bäume auf Braunerde-Pseudogleyboden zeigten im 80 cm Radius ab Stockmitte fast ähnliche Wurzelquerschnittareale wie die auf Pseudogleyboden. Die ausgezogenen Bäume auf Braunerde bilden also kürzere und dünnere Horizontalwurzeln als die im Pseudogley- und Braunerde-Pseudogleyboden.

Bei den Vertikalwurzeln (= Senker) zeigten die ausgezogenen Bäume auf Braunerde- und Braunerde-Pseudogleyboden fast die gleiche Anzahl von Senkern mit gleichem Wurzelquerschnittareal. In beiden Flächen zeigten die ausgezogenen Bäume im Vergleich mit denen im Pseudogleyboden etwa doppelt so große Vertikalwurzelschnittareale (Median-Werte), d.h. die Senker auf Braunerde- und Braunerde-Pseudogleyboden hatten dickere Durchmesser als die auf Pseudogleyboden. Die Durchwurzelungstiefe der Senker (mittlere Länge) nahm vom Braunerde- über den Braunerde-Pseudogley- zum Pseudogleyboden hin ab. Die Bäume auf Braunerde gingen im Mittel 15-30 cm tiefer in den Boden hinein und kamen in kürzeren Abständen von der Stockmitte vor als diejenigen auf Braunerde- und Braunerde-Pseudogley.

4.4 Beziehung zwischen den untersuchten Parametern

Für die Überprüfung der Zusammenhänge zwischen den untersuchten Faktoren wurde der Spearman'sche Rank-Korrelationskoeffizient verwendet. Die Korrelationsanalyse wurde getrennt nach Standorten durchgeführt. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse waren in den untersuchten Standorten zum größten Teil sehr unterschiedlich (die Daten

sind in RASTIN und ULRICH 1990, dokumentiert).

Das maximale Verankerungsmoment war in allen drei Flächen mit der Höhe, der Kronenlänge und dem Kronengewicht (im Braunerde-Pseudogley zusätzlich mit den BHD) positiv korreliert. Die maximale Kraft, die notwendig war, um die Bäume auszuziehen, war also in allen drei Flächen umso größer, je höher die Bäume waren und je mehr Kronenbiomasse sie gebildet hatten.

Im Braunerde- und Braunerde-Pseudogley war die Verankerung bei 1mm Ballenhebung, also die Kraft zu dem Zeitpunkt, in dem Schädigungen am Wurzelballen auftreten können, mit der Kronenlänge und dem Kronengewicht (in Braunerde-Pseudogleyboden zusätzlich mit dem BHD) positiv korreliert. In den o.g. Standorten wurden zusätzlich negative Zusammenhänge zwischen Wurzelhebung bei maximaler Verankerung und BHD festgestellt. Die signifikanten Beziehungen zwischen diesen Verankerungsparametern und dem oberirdischen Teil der Bäume auf Braunerde- und Braunerde-Pseudogleyböden wurden bei den ausgezogenen Fichten auf dem Pseudogleyboden nicht gefunden.

Das horizontale Wurzelquerschnittareal im 1. und 2. Radius zeigte im Braunerde- und Braunerde-Pseudogley-Boden weder mit dem oberirdischen Teil des Baumes noch mit den Verankerungsmomenten signifikante Beziehungen.

Im Pseudogley-Boden wurden dagegen Zusammenhänge zwischen Horizontalwurzelquerschnittareal und einer Reihe von Faktoren festgestellt: Die Wurzelquerschnittareale im 1. und 2. Radius waren mit der Baumhöhe positiv korreliert. Die Wurzelquerschnittareale im 2. Radius zeigten zusätzlich positive Beziehungen mit BHD, Kronengewicht und maximaler Verankerung. Dies bedeutet, daß in diesem Standort das Dickenwachstum der Horizontalwurzeln durch den oberirdischen Teil des Baumes beeinflusst wird und daß hier die Horizontalwurzeln zur Verankerung des Baumes beitragen.

Das Wurzelquerschnittareal der Senker war im Braunerdeboden mit keinem der untersuchten Faktoren korreliert. Im Pseudogleyboden wurden positive Beziehungen zwischen Wurzelquerschnittareal der Senker und dem maximalem Verankerungsmoment festgestellt.

Das Wurzelquerschnittareal der Senker war im Braunerde-Pseudogley-Boden mit einer Reihe von Faktoren wie Baumhöhe, BHD, Kronenlänge, Kronengewicht, sowie maximaler Verankerung und Verankerung bei 1mm Ballenhebung positiv korreliert.

5 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Untersuchungen an ausgezogenen Bäumen zeigten, daß zwischen den Bäumen auf dem Braunerde- und Braunerde-Pseudogleyboden im Mittel keine großen Unterschiede in Bezug auf Kronengewicht, Wurzelquerschnittareal der Senker sowie Horizontalwurzelquerschnittareal im 40 cm Radius ab Stockmitte bestehen. Die Bäume auf Braunerde waren jedoch stärker verankert, zeigten doppelt so große Verankerung zu dem Zeitpunkt, an dem Schädigungen am Wurzelballen auftreten (Verankerung bei 1 mm Wurzelballenhebung) sowie ein doppelt so kleines Horizontalwurzelquerschnittareal im 80 cm Radius ab Stockmitte. Die Senker gingen im Braunerdeboden im Mittel um 10 cm tiefer in den Boden hinein und kamen in kürzeren Abständen von der Stockmitte vor.

Zwischen den ausgezogenen Bäumen auf dem Pseudogleyboden und dem Braunerdeboden waren große Unterschiede vorhanden: Die Bäume auf der Braunerde zeigten eine geringere Kronenbiomasse und waren wesentlich stärker verankert als die auf dem Pseudogleyboden. Sie bildeten wesentlich dickere Senker, die in kürzerer Entfernung von der Stockmitte vorkamen und im Mittel 20-30 cm tiefer durchwurzelteten. Es muß hier erwähnt werden, daß es sich bei dem hier untersuchten Braunerdeboden um eine Fläche handelte, in der der Boden in den unteren Horizonten mit Nährstoffen und Wasser gut versorgt war. In einem Braunerdeboden, in dem der Boden bis in die unteren Horizonte stark versauert war, war die Durchwurzeltiefe sogar geringer als im Braunerde-Pseudogleyboden (RASTIN und ULRICH 1990). Hier bildeten die Bäume auf Braunerdeboden ein flaches Wurzelsystem, das ähnlich war wie das auf Pseudogleyboden.

Da die drei untersuchten Standorte waldbaulich ähnlich behandelt worden sind, sind die gefundenen Unterschiede zwischen den Verankerungsfaktoren hauptsächlich standörtlich bedingt.

Die durchgeführte Korrelationsanalyse führte zu signifikanten Beziehungen zwischen Verankerungsmomenten und Horizontalwurzelquerschnittareal und Wurzelquerschnittareal der Senker, zwischen Verankerungsmomenten und oberirdischem Teil des Baumes sowie zwischen oberirdischem Teil des Baumes und Wurzelquerschnittareal. Korrelationen zwischen Wurzelquerschnittareal und maximaler Verankerung wurden auch in anderen Arbeiten gefunden (NIELSEN 1988). Enge Zusammenhänge zwischen Wurzelmasse und BHD (SANTANTONIO 1977) sowie Kronengewicht (FRASER 1967, NIELSEN 1988) sind ebenfalls dokumentiert worden. Da die meisten forstlichen Maß-

nahmen eine Änderung sowohl im Kronen- als auch im Wurzelbereich hervorrufen, kann durch gezielte forstliche Maßnahmen die Verankerung und damit die Stabilität des Baumes beeinflusst werden.

Die durch Korrelationsanalyse ausgewiesenen Abhängigkeiten waren je nach Standort sehr unterschiedlich. Dies zeigt, daß je nach Standort die Faktoren, die zur Verankerung des Baumes beitragen, sehr unterschiedlich sein können. Die forstlichen Maßnahmen müssen daher standortsorientiert sein. Eine forstliche Entscheidung für den untersuchten Standort kann jedoch anhand der hier nur an 10 Bäumen durchgeführten Untersuchungen nicht getroffen werden. Dafür sind zusätzliche gezielte Untersuchungen notwendig.

Danksagung

Den Mitarbeitern der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz sowie denen im Forstamt Simmern und Kastellaun danke ich für ihre gute Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Ch. Bürstinghaus, K. Jänich und H.W. Paulmann für ihre ausgezeichnete Zusammenarbeit bei dem Auszug der Bäume sowie Frau H. Mintenig für die statistische Auswertung der Daten.

6 LITERATUR

- COUTTS, M.P. (1983):** Root Architecture and Tree Stability, in: *Plant and Soil*, 71, Vol. 56, 171-188
- COUTTS, M.P. (1986):** Components of Tree Stability in Sitka Spruce on Peaty Gley Soil, in: *Forestry*, London, H.2, Vol. 59
- HÜTTE, P. (1968):** Experiments on Windflow and Wind Damage in Germany; Site and Susceptibility of Spruce Forests to Storm-Damage. In: *Suppl. to Forestry: Wind Effects on the Forest*, 1968. Oxford University Press.
- HÜTTE, P. (1964):** Untersuchungen über den Einfluß des Geländereiefs auf Richtung, Geschwindigkeit und Struktur des Sturmes im Hinblick auf die Sturmgefährdung der Fichte. Dissertation, Forstliche Fakultät, Hann.Münden.
- MAYHEAD, G.J., J.B.H. GARDINER and D.W. DURRANT (1975):** A Report on the Physical Properties of Conifers in Relation to Plantation Stability, in: *Internal Report, Silvicultural Section, North, Res. Sta., For Com., Roslin, Edinburgh*
- NIELSEN, C.Ch.N. (1988):** Methode, ökologische und waldbauliche Beiträge zur Sturmfestigkeit der Fichte. Dissertation Universität Göttingen

RASTIN, N. (1991): Immissionsbelastung der SIMS-Standorte. In diesem Heft.

RASTIN, N. und ULRICH, B. (1990): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden über den Einfluß von Standort und Immission auf die Entstehung von Sturmschäden in den Forstämtern des Vorderhunsrücks -SIMS- ". Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz.

SANTANTONIO, D., R.K. HERMAN and W.S. OVERTON (1977): Root biomass studies in Forest Ecosystems, *Pedobiologia*, 17, p. 1-31.

Zusammenfassende ökologische Bewertung der Untersuchungsergebnisse des SIMS-Projektes

B. Ulrich

Ursachen der Bodenvernässung

Die bodenhydrologischen Untersuchungen (SCHMIDT) haben gezeigt, daß die hydro-morphologischen Profilvermerkmale den aktuellen Wasserhaushalt repräsentieren. Ihre Eignung für die Bodenansprache wie auch die Ausscheidung der Standortgrundformen III (Braunerde), VIII (Braunerde-Pseudogley) und IX (Pseudogley) werden damit bestätigt.

Der Befund, daß sowohl in dem Braunerde-Pseudogley mit periodischer Stauwasserbeeinflussung bis 30 cm Tiefe (Standortgrundform VIII) wie auch in dem Pseudogley mit Stauwasserbeeinflussung bis 10 cm Mineralbodentiefe (Standortgrundform IX) die primär stauende Schicht im tieferen Untergrund (unter 100 cm Tiefe) liegt (und offensichtlich geogen bedingt ist), ist für die Übertragbarkeit der Ergebnisse und der Folgerungen von großer Bedeutung. Insbesondere ergeben sich hieraus Einschränkungen bei tiefreichenden Bodenbearbeitungsmaßnahmen. Der Wassergehalt bei der Bearbeitung sollte so weit abgesenkt sein, daß es nicht zu Verknetungen kommt. Ein durch Bodenbearbeitung hergestelltes lockeres Gefüge kann wieder zusammenbrechen, wenn der Boden vernäßt. Ob die Testflächen die Standortgrundform III (Braunerde), VIII und IX in dieser Hinsicht repräsentieren, müßte seitens der Standortkartierung geklärt werden.

Bis 1 m Tiefe hat im Verlauf der Bodenentwicklung eine Umverteilung der Poren von den Grob- und Mittelporen zu den Feinporen stattgefunden, d.h. es hat sich zusätzlich zu der geogen bedingten Stauschicht im tieferen Untergrund eine oberflächennahe Stauschicht im Oberboden entwickelt. Hieran sind "alte" Prozesse wie Tonverlagerung, aber auch relativ "junge", von der Bestockung abhängige Prozesse beteiligt.

Baumarten, die den durch Wasserstau verursachten periodischen Luftmangel im Wurzelbereich tolerieren, halten durch ihre Wurzelröhren das Grob- und Mittelporensystem aufrecht. Eine Bodenvegetation, die leicht zersetzliche Streu produziert, ist die Voraussetzung für die Existenz bodenwühlender Zersetzerorganismen, die durch Bioturbation die Grob- und Mittelporen fortlaufend erneuern. Der Bestockungswandel zu Fichte dunkelt während der Stangenholzphase die Bodenvegetation aus. Die Verminderung der

Streuproduktion und die Verschlechterung der Streuqualität führt zur Bildung von Auflagehumus. Die durch die Biomasseakkumulation im aufwachsenden Fichtenbestand bedingte Bodenversauerung wird durch die Auflagehumusakkumulation erheblich verstärkt. Die fehlende Durchwurzelung durch die Bodenvegetation und die durch die Versauerung mit bedingte Verlegung der Streuzersetzung aus dem Mineralboden führt zum Wegfall der Bioturbation. Die durch periodische Vernässung bewirkte Porenverteilung zu Feinporen wird dann nicht wieder rückgängig gemacht. Die sich verstärkende Luftarmut im Wurzelraum wird von der Fichte ebensowenig wie die starke Versauerung (Übergang in den Aluminium-Pufferbereich) toleriert; sie reagiert darauf durch Konzentrierung ihres Feinwurzelsystems im humushaltigen Oberboden. Das durch die Fichtenbestockung beherrschte Ökosystem entwickelt sich in Richtung auf Vernässung und Oberbodenversauerung.

Bodenversauerung

Die Wasserhaushaltsuntersuchungen (SCHMIDT) zeigen, daß selbst auf der Braunerde (III) eine hangparallele Wasserbewegung erfolgt, die in Muldenlagen zu feuchteren Bedingungen führt. Auf den Pseudogleyen beschränkt sich die hangparallele Wasserbewegung im wesentlichen auf den Oberboden, so daß dort das Sickerwasser ganz überwiegend horizontal abgeführt wird. Im Hinblick auf die Folgen des Säureeintrags aus Luftverunreinigungen bedeutet dies, daß die Versauerung zwar nur langsam in größere Bodentiefen fortschreitet, daß dagegen die Gefahr der Versauerung der Waldgewässer bzw. benachbarter gut drainender Standorte groß ist.

Stoffeinträge

Die Stoffeinträge in die Fichtenbestände aus der Atmosphäre (RASTIN) sind in den Flächen Laudert und Laubach ähnlich. Der Säureeintrag (Protonen und Ammonium) ist 1987/88 mit 3,2 kmol/ha und Jahr relativ niedrig (zum Vergleich: Fichte F1 im Solling 1987 5,1 kmol), in dem niederschlagsarmen Jahr 1988/89 geht er auf 1,8 kmol zurück. Es ist anzunehmen, daß sich in diesen Werten die Minderung der SO_2 -Emissionen bemerkbar macht (Schwefeleintrag 2,1 kmol/ha, im Solling 4,6). Andererseits sind auch die Einträge von Nährstoffen erheblich niedriger als im Solling und reichen mit Ausnahme von Stickstoff nicht zur Deckung des Bedarfs für den Zuwachs aus. Besonders auf der tiefgründig versauerten Braunerde besteht daher das Risiko, daß im Laufe der weiteren Ökosystementwicklung Magnesium- und Kalium-Mangel zu Blattschäden und Calcium-Mangel zu Wurzelschäden führen kann. Nadelanalysen zeigen eine schlechte

Versorgung mit Magnesium und Phosphor. Bei Stickstoff übersteigt der Eintrag (1,5 kmol N/ha und Jahr) die Akkumulation im Zuwachs (ca. 0,9 kmol) erheblich. Überreichliche Stickstoffversorgung kann zu Nährstoffungleichgewichten führen und z.B. den Magnesium- und Phosphormangel erheblich verschärfen. Solange Nährstoffmängel oder Wurzelschäden die Vitalität der Bäume nicht beeinträchtigen, sind aufgrund des Stickstoffangebots Zuwachssteigerungen möglich.

Bedeutung der Stürme

Der Sturmholzanfall (HEUPEL und BLOCK) erreichte von 1983 - 1986 ein Ausmaß, wie es seit 1957 nicht beobachtet wurde. Das Sturmholz fiel fast ausschließlich bei der Fichte an; in Laubholz- und in Kiefernreinbeständen waren insgesamt nur sehr wenig Sturmschäden zu verzeichnen. In Fichtenmischbeständen waren auf 3 % der Fläche die Bestände aufgelöst. Dagegen war in Fichtenreinbeständen über alle Standortsformen hinweg mehr als 1/3 der Fläche durch Sturmwurf verloren gegangen. Laubholzbestände und -riegel stoppten die Windwurfkeile in der Fichte, konnten jedoch den Sturmwurf in nachgelagerten älteren Fichtenbeständen nicht verhindern. Die Stürme der 80er Jahre trafen auf inzwischen in gefährdete Altersklassen hineingewachsene Fichtenbestände die zudem in erheblichem Umfang durch vorangegangene Sturmschäden labilisiert worden waren. Die Sturmschäden sind auf den vernäbten Standorten (Pseudogley-Braunerden und Pseudogleyen) vom Ausmaß der deutlich gravierender als auf den nicht vernäbten Braunerden, sie setzten zudem auf den vernäbten Standorten bereits bei geringerem Bestandesalter ein. In den Fichtenreinbeständen gingen auf Staunässestandorten mehr als die Hälfte der Bestände durch Sturmwurf verloren. Der Aufbau einer annähernd "normalen" Altersklassenverteilung in der Fichte dürfte nicht mehr möglich sein.

Windspitzengeschwindigkeiten von 20 - 50 m/sec an der meteorologischen Station erwiesen sich als notwendige Voraussetzung für einen Windwurf im Untersuchungsgebiet: bei einer derartigen Dauerbelastung sind dann fast immer Windwurfschäden zu erwarten (GRAVENHORST, GIESEMANN und KREILEIN). Aus der Untersuchung von absoluten und relativen Häufigkeiten verschiedener Windspitzenbereiche konnte nicht abgeleitet werden, daß erhöhte Windwurfschäden in den letzten Jahren auf eine Zunahme von bestandsschädigenden Windgeschwindigkeiten zurückzuführen sind. Außerordentlich hohe Windwurfschäden waren gekoppelt mit hohen Niederschlägen in den Monaten vor und während des Sturmereignisses. Der Einflußfaktor "feuchter Wurzelraum" macht die erhöhte Windwurfgefährdung auf staunassen Böden deutlich.

Wirksamkeit von Wipfelköpfungen

Wipfelköpfungen zeigen auf den staunassen Standorten einen erheblich geringeren Wirkungsgrad als bisher angenommen: nur 1/3 der wipfelgeköpften Fichtenbestände überstand die bis 1986/87 aufgetretenen Stürme. Wenn auch dieses Ergebnis nicht generell gegen Wipfelköpfungen spricht, so sollten die Ergebnisse doch bei der Kosten/Nutzen-Analyse von Wipfelköpfungen berücksichtigt werden. Auf staunassen Standorten fällt ab einem Bestandesalter von 50 Jahren der Nettonutzen einer Köpfung stark ab, im Alter 70 ist die absolute Nutzschwelle unterschritten (HEUPEL und BLOCK).

Bodenchemischer Zustand

Entgegen früherer Darstellungen erweisen sich die Böden der stauwasserbeeinflussten Testflächen nicht als stärker, sondern als weniger versauert (RASTIN). Die verdichteten Stauhorizonte (ab etwa 50 cm Bodentiefe) weisen teilweise mittlere Basensättigung auf, während die durchlässigen B-Horizonte der Braunerde sehr geringe Basensättigung besitzen und damit dem heute in nordwestdeutschen Wäldern vorherrschenden Typus der tiefgründig stark versauerten podsoligen Braunerde (-Kryptopodsol) entsprechen. Der Befund mittlerer Basensättigung im S_d -Horizont deckt sich mit neueren Untersuchungsergebnissen aus ganz anderen Gebieten (Syke, Kaufunger Wald). Die tiefgründige Versauerung der durchlässigen Waldböden ist auf den anthropogenen Säureeintrag zurückzuführen, wobei der Untersuchungsraum nach den Depositionsmessungen zu den mittel belasteten Gebieten zu rechnen ist. Daß dieser Säureeintrag auf stauwasserbeeinflussten Böden nicht zur tiefgründigen Versauerung geführt hat, kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: zum einen auf oberflächennahen Abfluß sauren Wassers in den O/A/S_w-Horizonten bei gesättigten Verhältnissen (bei der Schneeschmelze oder nach Starkniederschlägen), der zum Auftreten von Versauerungswellen oder -fronten in den Waldgewässern führen kann (d.h. die deponierte Säure gelangt zusammen mit organischen Säuren aus der Streuzersetzung direkt ins Gewässer); zum anderen auf säureverbrauchende Reduktionsvorgänge in den Bodenbereichen unzureichender Durchlüftung. Die beträchtlichen Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung auf allen drei Standorten lassen den Schluß zu, daß Nitratreduktion möglich ist. Allerdings ist hinsichtlich des Säure/Base-Zustands der Unterböden von einer erheblichen räumlichen Variabilität auszugehen (FÖLSTER und XU). Selbst wenn es sich bei den Stauhorizonten nicht um Vorholozän versauertes silikatarmes Material handelt (wie z.B. bei Fließerden aus tertiärem Material), läßt sich der Befund deshalb nicht verallgemeinern: zwar können stauwasserbeeinflusste Böden im Bereich der Stauhorizonte noch (geringe bis) mittlere

Basensättigung aufweisen, doch können sie auch ähnlich wie durchlässige Böden aus Sedimentgesteinen tiefgründig sehr geringe Basensättigung zeigen. Andererseits können besonders in den weniger stark durch Saure Deposition belasteten kollinen und submontanen Lagen auch die Braunerden im Unterboden noch geringe bis mittlere Basensättigung aufweisen.

Die räumliche und zeitliche Dynamik der Ionenkonzentrationen in der Bodenlösung läßt erkennen, daß in der Braunerde in Kisselbach die aus 80 cm Tiefe gewonnene Bodenlösung noch durch den Austausch von Ca durch Al beeinflusst wird. Dies erklärt die noch gute Ca-Versorgung, die die Nadelanalyse zeigte. Die Abnahme der Basensättigung im tieferen Wurzelraum auf sehr geringe Werte dürfte sich demnach in den 70er- und 80er Jahren abgespielt haben. Damit stimmt überein, daß auf den Braunerden (Standortsgrundform III) auch weniger tief versauerte Standorte gefunden wurden. Auch der hohe Anteil von Mn an der Kationenaustauschbelegung (bis 14 %) weist auf rezente Versauerungsprozesse hin. Die Bodenlösungsdaten zeigen, daß Aluminium-Streß in allen drei Standortsgrundformen bis 40 cm Tiefe kontinuierlich, in 80 cm Tiefe periodisch von Bedeutung ist.

Ausbildung des Wurzelsystems bei Fichte, Buche, Eiche und Küstentanne

Die Untersuchungen an 80-j. Fichten in Laudert zeigen, daß im Gegensatz zu den Erwartungen auf den stauwasserbeeinflussten Böden sowohl Feinwurzeln (< 2 mm) wie Schwachwurzeln (2 - 5 mm) auch in den S_w - und S_d -Horizonten zu finden sind, auch wenn sich die Feinwurzelmasse hauptsächlich im Oberboden befindet (um 70 % bis 10 cm Tiefe, über 90 % bis 40 cm Tiefe). Die Braunerde als durchlässiger Boden weist - abweichend von früheren Beobachtungen und Untersuchungen - ähnliche Tiefengradienten der Fein- und Schwachwurzeln auf. Während in Fichtenaltbeständen die Durchwurzelung der vernäßten Böden also besser ist als erwartet, ist sie auf dem durchlässigen Boden schlechter.

Der jetzige Zustand des Wurzelsystems ist das Ergebnis eines Entwicklungsprozesses, der vorwiegend durch die ökochemischen Bedingungen von Sauerstoffversorgung und Säure/Base-Zustand des Bodens gesteuert wird; in skeletthaltigen Böden kommen mechanische Faktoren hinzu. Die Grundstruktur des Wurzelsystems wird nach derzeitigen Kenntnissen in den ersten Jahren der Jungpflanze angelegt. Als Folge von Vernässung, Versauerung oder Vergrasung neigt die Fichte zur Ausbildung von flachstreichenden Hauptwurzeln. Bei hinreichenden ökochemischen Bedingungen entwickelt sie im

Dickungsstadium an den flachstreichenden Wurzeln Senkwurzeln, die nach laufenden Untersuchungen den Boden unter optimalen Bedingungen bis 2 m Tiefe recht gleichmäßig erschließen können. Bei den Fichtenaltbeständen in Kisselbach wurden Feinwurzeln bis 150 cm Tiefe gefunden, wenn auch nur vereinzelt. Bei Veränderungen der ökochemischen Bedingungen ist von einer Anpassung des Wurzelsystems an die veränderten Bedingungen auszugehen. Jahre bis Jahrzehnte verbleibende Zeugen solcher Anpassungsvorgänge sind abgestorbene Schwach-, Grob- und Starkwurzeln.

Das Schwach- und Grobwurzelsystem (Grobwurzeln 5 - 10 mm) zeigt eine ähnliche Abnahme mit der Tiefe wie die Feinwurzeln. In 0 - 30 cm Tiefe ist unabhängig von der Vernässung ein hoher Anteil abgestorben; dies weist auf akuten Streß hin.

Das Starkwurzelsystem (> 10 mm) ist auf allen drei Standorten flach ausgebildet; die Ursachen hierfür dürften unterschiedlich sein (siehe oben). Auf den vernäßten Böden verbleiben die Starkwurzeln im AS_w -Horizont und dringen nicht in den S_w - und S_d -Horizont ein, was den Grobwurzeln bereits gelingt. Hieraus läßt sich schließen, daß der periodische Sauerstoffmangel die Anlage eines Grob- und besonders eines Starkwurzelsystems verhindert, während in Jahren geringerer Vernässung Schwachwurzeln immer wieder in die vernäßten Horizonte eindringen, allerdings in Jahren stärkerer Vernässung absterben. In den S_d -Horizonten wurden keine toten Schwachwurzeln gefunden; dies deutet auf eine geringe aktuelle, durch Vernässung bestimmte Dynamik hin. Die hohen Anteile toter Grob- und Starkwurzeln deuten dagegen auf langfristig ablaufende Veränderungen im Tiefengradienten des Wurzelsystems hin.

In der Braunerde erreichen die Grob- und Starkwurzeln dagegen größere Bodentiefen; gleichzeitig wird dort der größte Anteil toter Schwach-, Grob- und Starkwurzeln gefunden. Daraus läßt sich schließen, daß die ursprüngliche Durchwurzelung tiefer gereicht hat als auf den Pseudogleyen und daß zur Zeit der Untersuchung die auf weitere Verflachung des Wurzelsystems ausgerichtete Dynamik stärker war.

Zur Klärung der treibenden Kraft für die vernässungsunabhängige Tendenz zur Verflachung der Wurzelsysteme können die wurzelchemischen Daten herangezogen werden. Diese Daten weisen auf allen drei Standortsgrundformen aus, daß mit zunehmender Bodentiefe die Ca-Gehalte der Wurzeln abnehmen, die Al- und Fe-Gehalte dagegen zunehmen. Dies gilt für alle Wurzelklassen, wobei die Al- und Fe-Gehalte mit zunehmender Wurzelstärke abnehmen. Tote Feinwurzeln zeigen geringere Ca- und oft doppelt so hohe Al- und Fe-Gehalte. Dies gilt auch für die Küstentanne (FÖLSTER und XU). Die röntgenmikroanalytische Untersuchung von Feinwurzeln (RASTIN) zeigt, daß Ca in

den Zellwänden weitgehend fehlt, während Al dort angereichert ist. Im Zentralzylinder fehlt andererseits meist Al; mit zunehmender Bodentiefe nimmt die Häufigkeit zu, daß Al im Zentralzylinder nachweisbar ist. Diese Befunde zeigen eindeutig, daß die Wurzeln unter Säurestreß stehen. Das Fehlen von Ca sowie die Dominanz von Al und Fe in der Wurzelrinde bedeuten, daß beim Eindringen von Bodenlösung mit sehr niedrigem pH-Wert (als Folge von Versauerungsschüben) in der Wurzelrinde Al-Ionen mobilisiert werden. Das sporadische Vorhandensein von Al im Zentralzylinder zeigt, daß unter diesen Bedingungen offensichtlich die Barriere des Caspary'schen Streifens von Aluminiumionen überwunden werden kann und damit Zellschäden möglich sind. HÄUSSLING findet in neuen Untersuchungen (Ber. Forschungszentrum Waldökosyst. Univ. Göttingen A 73, 1991), daß die Tiefenverteilung der Feinwurzeln im Mineralboden auf Standorten, die sich im Aluminium-Pufferbereich befinden, deutlich vom Ca/Al-Verhältnis in den Feinwurzeln und auch vom Schädigungsgrad der Fichten abhängig ist. Bei besonders stark geschädigten Fichten hat sich das Feinwurzelsystem gegenüber schwach geschädigten Fichten in die obersten Bodenhorizonte verlagert. Mit dem Schädigungsgrad der Fichten nimmt die Regenerationsfähigkeit der Wurzeln ab. Hinzu kommt noch eine Beeinträchtigung der Nährstoffaufnahme, besonders von Ca und Mg. Die Hypothese, daß zunehmende Bodenversauerung die treibende Kraft für die aus der Wurzelverteilung abgeleiteten Veränderungstendenzen ist, wird sowohl durch die eigenen Untersuchungsergebnisse wie durch die Ergebnisse von Häussling gestützt. Die Untersuchung der Stoffeinträge hat gezeigt, daß Saure Deposition als wichtigste Komponente der zur Bodenversauerung führenden Prozesse anzusehen ist. Dabei sind wegen der hochgradigen Nichtlinearität von Waldökosystemen im Aluminium-Pufferbereich keine einfachen, linearen Beziehungen zwischen Versauerung und Anpassungsreaktionen des Wurzelsystems an die sich ändernden Bodenbedingungen zu entwirren. Vergleiche zwischen unterschiedlich alten Beständen (wie im nächsten Abschnitt) sind dadurch erschwert, daß bei jüngeren Beständen von einer stärkeren Bodenversauerung zum Zeitpunkt ihrer Jugendentwicklung und damit von anderen Randbedingungen für die Entwicklung des Wurzelsystems ausgegangen werden muß.

Die Untersuchungen zur Auswirkung der Standweite und der Beimischung von Buche zu Fichte auf das Wurzelsystem auf Braunerde-Pseudogley (FÖLSTER, DEGENHARDT, FLOR und LUX) zeigten, daß eine weitständige Begründung von Fichtenbeständen in Verbindung mit weitständiger Bestandeserziehung zu einer intensiveren Durchwurzelung führt. Bestandeslücken bis 12 m werden gleichmäßig erschlossen. Bei einer einzelstammweisen Beimischung heute 60-j. Fichten zu einem 95- bis 160-j. Buchenbestand ergab sich im Vergleich zu einem benachbarten Fichtenaltholz keine Verbesserung der Tiefendurchwurzelung der Fichte, sondern eher eine Verschlechte-

rung auf den heute typischen Tiefengradienten (bis 10 cm Tiefe 60 %, bis 40 cm Tiefe 90 % aller Feinwurzeln). Die Buche mied in einzelstammweiser Mischung mit Fichte den A_h -Horizont, durchwurzelte jedoch den darunter liegenden Mineralboden bis zu einer Tiefe von 60 - 70 cm recht intensiv. Bei Untersuchungen im Solling konnte dieses Verhalten der Buche als Anpassung an starke Säurebelastung im A-Horizont gedeutet werden (RAPP, Ber. Forschungszentrum Waldökosyst. Univ. Göttingen A 72 1991). Auch der S_d -Horizont wurde von der Buche mit einem Anteil von rund 10 % ihrer Wurzeln deutlich intensiver erschlossen als dies bei der Fichte zu beobachten war. In einem 50 - 65-j. Buchen/Eichen-Mischbestand mit Fichtenhorsten, die durch Auspflanzung in Fehlstellen der Naturverjüngung entstanden waren, wies die Buche dagegen keine wesentlich intensivere Tiefendurchwurzelung auf als die Fichte; nur die Eiche (Traubeneiche) drang mit Fein- und Grobwurzeln in den S_d -Horizont (in 60 cm Tiefe) ein und erreichte eine Durchwurzelungstiefe von 160 cm. Dies verdeutlicht erneut die besondere Eignung der Eiche für vernäßte Standorte.

Die Untersuchungen an der Küstentanne (FÖLSTER und XU) erstreckten sich auf 20- bis 31-j. Bestände in unterschiedlichen Höhenstufen (kollin, submontan, montan), die mit gleichaltrigen Fichtenbeständen verglichen wurden. Für die Deutung der Befunde muß die unterschiedliche Tiefe der Bodenversauerung in den verschiedenen Höhenstufen berücksichtigt werden. Im kollinen Bereich erreichte die Basensättigung Werte über 15 % (und damit vernachlässigbaren Säurestreß für die säuretoleranten Baumarten Buche, Fichte, Eiche und Küstentanne) ab 40 cm Tiefe, im submontanen Bereich ab 40 - 60 cm, im montanen Bereich mit Ausnahme einer Fläche erst unterhalb 80 cm. Dies dürfte durch unterschiedlich hohe Säureinträge bedingt sein. Der Bereich gleichmäßiger Durchwurzelung beschränkt sich bei der Fichte bei deutlich ausgeprägtem Tiefengradienten auf die obersten 50 cm, wobei in der kollinen und submontanen Höhenstufe Vernässung und Substratarmut zu einer Verflachung des Wurzelsystems führen. Nur in den nicht vernäßten Flächen finden sich Feinwurzeln vereinzelt bis 1 m Tiefe. Die Befunde machen die starke Reaktion der Fichte auf Vernässung deutlich, wobei bei Begründung auf der Kahlfläche die Vernässung während der Jugendentwicklung der Bestände extreme Ausmaße annehmen kann. Die Küstentanne wird mit diesen Verhältnissen sehr viel besser fertig. Sie erreicht bei geringer ausgeprägten Tiefengradienten größere Durchwurzelungstiefen und dringt bei Basensättigung über 15 % im Unterboden auch auf den vernäßten Standorten bis in Tiefen über 80 cm vor. Sie besitzt stets eine höhere Wurzelanzahl und zwar in allen Stärkeklassen. Bei starker Vernässung (Grundform IX) ist an der Horizontgrenze S_w/S_d eine Hemmung des Wachstums insbesondere der größeren Wurzeln (> 5 mm) deutlich zu erkennen. Auf den tiefgründig versauerten Böden im montanen Bereich verwischen sich die Unterschiede zwischen

Küstentanne und Fichte durch leichte Verbesserungen bei der Fichte und Verschlechterungen bei der Tanne. Dies weist darauf hin, daß Unterböden im Aluminium-Pufferbereich wohl auch für die Küstentanne erheblichen Säurestress bedeuten.

Die Untersuchungsergebnisse decken sich mit dem Befund, daß die Fichte weniger Aluminium-tolerant als die Buche ist und damit auf Böden im Aluminium-Pufferbereich stärker als die Buche zur Flachwurzelligkeit tendiert; ferner, daß die Fichte sehr empfindlich gegen Sauerstoffmangel im Wurzelraum ist. Die ebenfalls untersuchte Küstentanne zeigte gegenüber der Fichte deutlich tiefere Wurzelerschließung und größere Wurzeldichte auf den Grundformen III und VIII. Auf dem ausgeprägt vernäbten Standort (Grundform IX) stößt sie jedoch an ihre Grenze. Dies ist insbesondere in den höheren Lagen auf den tiefgründig versauerten Böden erkennbar.

Verankerung der Fichten im Boden

Zusätzlich zu den Wurzeluntersuchungen wurde die Verankerung der Fichten im Boden durch Auszug von Bäumen als direktes Maß der mechanischen Stabilität untersucht (RASTIN). Die Bäume waren umso besser im Boden verankert, d.h. es mußte umso mehr Kraft aufgewendet werden, sie auszuziehen, je höher die Bäume waren und je mehr Kronenmasse sie gebildet hatten. Bei diesen Untersuchungen war die Braunerde (Grundform III) mit einem Standort vertreten, der nicht so tiefgründig versauert war wie der oben zitierte Teststandort in Laudert. Die Untersuchungen wiesen für diesen Standort eine stärkere Verankerung der Bäume im Boden aus als auf den Pseudogleyen (Grundform VIII und IX); diese stärkere Verankerung war mit dem häufigeren Auftreten von stärkeren Senkwurzeln und deren tieferem Eindringen in den Boden verknüpft. Dieser Befund macht die gegenwärtige Variabilität von chemischen Bodenzustand, Wurzelzustand und Windwurfanfälligkeit in der Grundform III deutlich. Es ergaben sich Hinweise darauf, daß die ausgezogenen Bäume auf dem Braunerde-Pseudogley verankerungsvorgeschädigt waren. Auf dem Pseudogley tragen nach den Untersuchungsergebnissen die Horizontalwurzeln wesentlich zur Verankerung der Bäume bei.

Schlussfolgerungen

Der Befund, daß auf den staunassen Böden (Standortsgrundform VIII und IX) die Fichtenzwurzeln im S_d-Horizont existieren können, läßt den Schluß zu, daß diese Standorte nicht der künstlichen Auflockerung durch Bodenbearbeitung bedürfen. Rein mechanische Eingriffe in Form von Tiefumbruch und/oder Entwässerungsgräben sind schon

deshalb wenig sinnvoll, da die ungesättigte Leitfähigkeit der Pseudogleye zu gering ist, um eine ausreichende Dränwirkung zu erzielen, der Aufwand dagegen sehr hoch. Eher besteht das Risiko, daß durch Bodenbearbeitung das vorhandene, offensichtlich recht stabile Grobgefüge im S_a -Horizont zerstört wird und nach einer Bodenbearbeitung die Durchlässigkeit als Folge von Setzungen so schlecht oder noch schlechter wird als jetzt. Da die Stausohle unterhalb des Bereichs liegt, der beim Tiefumbruch erfaßt werden kann, würde sich auch bei günstiger Gefügeentwicklung nach Tiefumbruch an der Wasserhaushaltsdynamik in Bezug auf die gesättigten Bedingungen voraussichtlich wenig ändern.

Der hohe Anteil toter Schwachwurzeln im Oberboden bis 30 cm Tiefe auf allen Flächen zeigt erheblichen Streß an. Nach den bodenchemischen und wurzelchemischen Daten dürfte die Ursache in niederen pH-Werten (Protonen-Streß) liegen. Aus diesem Befund ist zu folgern, daß eine Oberflächenkalkung (ca. 3 t gemahlener dolomitischer Kalkstein pro ha) auf allen drei Standortgrundformen zu empfehlen ist. Mit dieser Maßnahme kann zudem die versauernde Wirkung des oberflächennahen Abflusses von den Pseudogleyen bei Schneeschmelze oder nach Starkniederschlägen auf die Waldgewässer vermindert werden. Die Auswirkung dieser Maßnahme sollte durch Beobachtung der Entwicklung der Bodenvegetation und der Humusform kontrolliert werden. Falls sich dabei keine unerwünscht starken biologischen Reaktionen zeigen, sollte die Oberflächenkalkung nach 5 - 7 Jahren wiederholt werden.

Bei dynamischen Belastungen des Bodens besonders im gesättigten Zustand, die durch Befahrungen verursacht werden, ist mit einem Gefügeschwund und Verdichtung des Bodens zu rechnen. Diese Strukturveränderungen sind irreversibel.

Eine weitere Verschlechterung der bodenphysikalischen Standortseigenschaften durch Abnahme des Gesamtporenvolumens, Verringerung des Grob- und Mittelporenanteils, Rückgang der Durchwurzelungstiefe sowie Abnahme der Aggregatstabilität kann durch Faktoren bewirkt werden, die zu einem größeren Wasserinput und/oder einer deutlichen Abnahme des Wasserentzugs aus dem Boden führen. Dieses kann durch die Entfernung der Bestände (Kahlschlag, Windwurf) und die damit einhergehende Abnahme der Transpiration und Interzeption verursacht werden. Sowohl Befahren wie Freilage können innerhalb des Profils zur Ausbildung einer zweiten oberflächennahen Stauschicht führen.

Die Tendenz zur Verflachung des Wurzelsystems zeigt, daß bei der gegebenen Fichtenbestockung die Gefahr besteht, durch Umverteilung der Porenklassenanteile von Mittel- zu Feinporen die tiefe Durchwurzelbarkeit zu verlieren. Ziel der weiteren Flächenbehandlung sollte die möglichst kontinuierliche Bestockung mit einer Baumartenzusammensetzung sein, die dazu in der Lage ist, die Profile wieder tief zu durchwurzeln. Die Jugendentwicklung der Pflanzen kann durch die Einarbeitung von Kalk und Phosphat in den künftigen Wurzelraum erheblich gefördert werden. Dabei ist jedoch großflächige Bodenbearbeitung zu vermeiden; eine Bodenbearbeitung sollte auf Pflanzlöcher oder Pflanzstreifen beschränkt bleiben. Die Düngergabe bemißt sich nach der bearbeiteten Fläche; sie kann 1 kg Kalk/m₂ und 0,1 kg Thomasmehl /m₂ (dies entspricht 2 "Handvoll") betragen.

Die ökosystemaren Auswirkungen der empfohlenen Maßnahmen sollten durch vorlaufende oder begleitende Untersuchungen kontrolliert werden, wobei die im Projekt SIMS angewendeten Untersuchungsverfahren den Rahmen der sinnvollen Untersuchungsmethodik abstecken.

Konsequenzen aus den Untersuchungsergebnissen des SIMS-Projektes im Hinblick auf die waldbauliche Behandlung von Staunässestandorten

W. Eder

1 EINLEITUNG

Pseudogleystandorte galten lange Zeit nicht nur in Rheinland-Pfalz als für die Fichte geeignete Standorte. Tatsächlich erbrachte dieser Baumart, vor allem in der ersten Generation nach Laubbaumvorbestockung, auch auf Staunässestandorten in allen Höhenstufen des Landes Leistungen und Erträge, die von keiner der standortsheimischen Baumarten erreicht wurden. Gleichzeitig aber waren, anfänglich nur wenig beachtet, steigende Schädigungen in Fichtenbeständen auf Pseudogleystandorten zu beobachten, die in immer jüngeren Altersstufen einsetzten und vor allem auch in Fichtenreinbeständen auftraten.

Ohne die Schäden näher zu klassifizieren, muß festgestellt werden, daß die außerordentlichen Nutzungen bei der Fichte bereits vor den Stürmen des Frühjahrs 1990 eine Größenordnung von rund 2/3 des jährlichen Einschlages eingenommen hatten. Bei dem im Norden von Rheinland-Pfalz vorhandenen Flächenanteil der Fichte von 43 % der Betriebsklasse Wirtschaftswald im Staats- und Körperschaftswald konnte bei der Mehrzahl der Forstbetriebe von einer planmäßigen Forstwirtschaft nicht mehr die Rede sein. In diesem Landesteil von Rheinland-Pfalz treten nun gleichzeitig konzentriert Pseudogleystandorte auf. Ihr Flächenanteil beträgt, regional stark schwankend und in unterschiedlich starker Ausprägung, mehr als ein Viertel der Wirtschaftswaldfläche des öffentlichen Waldes.

Die vorhandenen Fichtenbestände - auch auf nicht stauwasserbeeinflussten Standorten - sind überwiegend Reinbestände, die nicht in allen Fällen eine stabilitätsfördernde Bestandspflege erfahren haben.

Auch aus dieser Sicht am kritischsten sind wiederum die Pseudogleystandorte anzusehen. Für sie in ihrer für rheinland-pfälzische Standortverhältnisse typischen Ausprägung liegen nun erstmalig wissenschaftlich abgesicherte Ergebnisse vor. Diese möglichst schnell für eine Neuorientierung der waldbaulichen Ziele zu nutzen und in praktische Maßnahmen umzusetzen, ist eine vordringliche Aufgabe. Es muß gerade nach den

Stürmen des Jahres 1990, deren Folgen weit gravierender sind als die des Jahres 1984, verhindert werden, daß bei der Neubegründung der Bestände und bei der Bestandspflege bereits wieder die Voraussetzungen für künftige Katastrophen geschaffen werden.

2 FOLGERUNGEN AUS DEN BODENCHEMISCHEN UND PHYSIKALISCHEN ERGEBNISSEN

2.1 Konsequenzen für die Baumartenwahl

Für waldbauliche Entscheidungen ist von großer Bedeutung, daß in vielen Pseudogleyen (Grundform IX) und Braunerde-Pseudogleyen (Grundformen VIII) ein bemerkenswertes Nährstoffpotential in tieferen Bodenbereichen zu finden ist, insbesondere eine vergleichsweise gute Belegung der Austauscher mit Kalzium und Magnesium in den S_w - und vor allem den S_d -Horizonten. Dies deckt sich im übrigen mit den Ergebnissen von bodenchemischen Untersuchungen bei Pseudogleyen unterschiedlichster Genese im Rahmen der Standortkartierungen des Westerwaldes und der Westeifel. Das in den genannten Horizonten gespeicherte Nährstoffpotential bleibt ungenutzt, wenn die vorhandene Vegetation nicht in der Lage ist, es mit ihren Wurzeln zu erschließen. Insbesondere basische Kationen gelangen nicht in den Nährstoffkreislauf. Steigende Anteile der säurebildenden Kationen H, Al, Fe und Mn in den bereits stark versauerten Oberböden können prognostiziert werden. Diese durch eine nicht angepaßte Bestockung induzierte Versauerung wird zu einem weiteren Absinken der Anteile von Kalzium, Magnesium und Kalium führen, die bereits jetzt im Oberboden (A_h -Horizont) nur noch bei 4 - 7 % liegen. Zudem muß eine fehlende Durchwurzelung des Unterbodens dort zwangsläufig zu Verschlechterungen der Bodenstruktur führen.

Es liegt auf der Hand, daß hier entscheidende Verbesserungen durch den Anbau wurzelintensiver, tiefwurzelnder Baumarten erreicht werden können. Sie können oberflächennahe, sekundäre Stauhazone durchdringen, und die darunter noch vorhandenen basischen Kationen in den Nährstoffkreislauf einschleusen. Wie bei den Untersuchungen eindeutig festgestellt werden konnte, vermag die Fichte dies auf keinem der Pseudogleystandorte hinreichend zu leisten. Fichtenanbau, zumindest im Reinbestand oder bei hohen Mischungsanteilen der Fichte, muß also zu bodenchemischen und bodenphysikalischen Verschlechterungen der Standorte führen.

2.2 Bodenrestauration und Bodenschutz

Nach den vorgefundenen bodenphysikalischen und bodenchemischen Verhältnissen ist eine Restauration der Mineralböden unumgänglich. Dazu muß partikulärer kohlen-sauerer Magnesiumkalk (Dolomit), gegebenenfalls mit Zugabe zusätzlicher Magnesiumanteile und Phosphor, eingebracht werden. Ziel muß es sein, langfristig eine Basensättigung im Mineralboden zu erreichen, die nach einer Darstellung von BENECKE (1990) im Bereich der Silikatpufferung liegen sollte. Als Humusform sollte der Mull angestrebt werden. Das Erreichen der gewünschten Basensättigung darf allerdings nicht zu einer Gefährdung des aktuell vorhandenen Humusvorrates führen. Deshalb müssen alle Verfahren der Bodenrestauration ausscheiden, die zu einer schnellen Mineralisation und damit zu Humusverlusten führen können.

In diesem Zusammenhang muß auf das in dieser Tendenz und in diesem Ausmaß nicht erwartete Ergebnis der Untersuchungen der nicht stauwasserbeeinflußten Braunerden (Grundform III) eingegangen werden. Während sich in der kollinen und submontanen Stufe bei basenreicherem Ausgangsgestein noch die erwartet bessere Belegung der Austauscher mit Kalzium, Magnesium und Kalium sowie eine bessere Phosphor-Versorgung in den Braunerden gegenüber den Pseudogleyen zeigt, kehrt sich diese Tendenz bei den Pseudogleyen in der niederschlagsreicheren montanen Stufe um. Bei schlechterer bodenchemischer Ausgangssituation zeigen sich die Braunerden der Grundform III auch in der kollinen und submontanen Stufe als tiefgründig versauert. Dieses, inzwischen auch von den Ergebnissen der Bodenzustandserfassung (BZE) in Rheinland-Pfalz gestützte Ergebnis (BLOCK u.a. 1991) erfordert eine systematische Ausdehnung von Bodenrestaurationsmaßnahmen auf einem Großteil der Waldflächen unseres Landes.

Maßnahmen zur Bodenrestauration müssen auch in Zukunft von Bodenschutzkalkungen begleitet werden, die quasi als "Schutzschild" die eingetragenen Säuren an der Bodenoberfläche abpuffern und eine weitere Säurezufuhr verhindern.

2.3 Befahren und Bodenbearbeitung

Die vorgefundenen Pseudogleyböden sind hinsichtlich ihrer Befahrbarkeit besonders kritisch zu beurteilen. Deshalb müssen Verfahren bei der Bodenvorbereitung zur Einleitung von Naturverjüngungen, Pflanzungen und Saaten sowie im Rahmen der Bestandespflege und der Holzernte angewandt werden, die insbesondere den physikalischen Bodenzustand nicht weiter negativ verändern. Dies bedeutet, daß bei Naturverjüngungen die notwendige Bodengare möglichst ohne Bodenbearbeitung und ohne das dazu erforder-

derliche Befahren durch langfristige Vorbereitung der Bestände hergestellt werden muß. Bei der Bestandespflege sind noch konsequenter die Möglichkeiten der Feinerschließung und damit ein Befahren nur auf dauerhaft vorgegebenen Linien zu nutzen. Gleiches gilt für das Rücken des Holzes bei der Holzernte, wo möglichst viel Biomasse als langfristige Nährstoffquelle auf der Fläche verbleiben soll. Bei allen stärker staunassen Böden sind bei der Holzernte alternative Rückeverfahren anzuwenden, die keine flächige Befahrung der Böden mit Rückegeräten erfordern.

3 FOLGERUNGEN AUS DEN ERGEBNISSEN DER UNTERSUCHUNGEN DER DURCHWURZELUNG DER BÖDEN

3.1 Konsequenzen für die Baumartenwahl

Die Ergebnisse der Untersuchung zur Wurzelenergie und Tiefendurchwurzelung führen zu der klaren waldbaulichen Vorgabe bei der Neubegründung von Beständen auf Braunerde-Pseudogleyen (Grundform VIII) und Pseudogleyen (Grundform IX), die Fichte im Reinbestand aus der Baumartenpalette auszuschließen. Selbst eine Beteiligung in trupp- und kleingruppenweiser Mischung birgt Gefahren für die Bestandesstabilität, da darin die Ansatzpunkte für das Aufreißen der Bestände bei späteren Stürmen gesehen werden müssen. Waldbauliches Ziel kann deshalb nur der konsequente Umbau der Fichtenbestockung auf Pseudogleystandorten sein. In Frage kommen vor allem, wie die Untersuchungen zeigen, die tiefwurzelnden Eichenarten. Darüberhinaus bietet sich die Roterle an; aber auch die Weißtanne zeigt erstaunliche Wurzelenergie (vgl. ZOTH u. BLOCK 1992). Begleitbaumart in den Mischbeständen sollte immer die Rotbuche sein, deren Eignung vor allem auch für die Braunerde-Pseudogleye (Grundform VIII) nachgewiesen wurde. Im Mischbestand kann auf den schwächer pseudovergleyten Standorten (Pseudogley-Braunerden) auch *Abies grandis* Berücksichtigung finden, die in der montanen Stufe im Vergleich zur kollinen und submontanen Stufe zwar ihr hier der Fichte überlegenes Wachstum einbüßt, aber dennoch risikoärmer zu sein scheint.

Eine weitere, vor allem aus bodenchemischer Sicht wichtige Begleitbaumart ist die Eberesche. Im Bereich der kollinen und submontanen Stufe kann je nach Wärmeversorgung auch den sogenannten Nebenbaumarten, wie Speierling oder Elsbeere, wegen ihrer Wurzelenergie und ihrem günstigen C/N-Verhältnis der Streu Beachtung geschenkt werden. Aber auch hier sollten Eberesche sowie Aspen und Weiden stärker, zumindest aber zeitweise an der Bestandsbildung beteiligt werden.

3.2 Bestandesaufbau und Mischungsform

Die Untersuchungen zur Wurzelintensität und Tiefendurchwurzelung im Reinbestand haben gezeigt, daß durch entsprechende waldbauliche Maßnahmen das Verhältnis von Verankerungsmoment und Sturmmoment verbessert werden kann. Allerdings ist damit keine durchschlagende Sicherung von Fichtenbeständen gegenüber Sturmschäden auf staunässebeeinflussten Standorten zu erreichen. Von der Wurzelentwicklung her gesehen ergibt sich auch durch die Beimischung der Buche in Form der Einzelmischung keine waldbauliche Lösung der Stabilitätsfrage. Zumindest im untersuchten Standortsbereich hat sich die Hoffnung zerschlagen, daß die intensivere Durchwurzelung des tieferen Mineralbodens durch die Buche vor allem bei den Braunerde-Pseudogleyen (Grundform VIII) die Fichte veranlassen könnte, ihre Wurzeln denen der Buche folgen zu lassen. Im Gegenteil, die Wurzeln von Fichte und Buche haben hier eine grundsätzlich unterschiedliche vertikale und horizontale Verteilung mit der Folge, daß die Fichte in dieser Mischung die Böden weniger tief als im Reinbestand erschließt. Ob dieses Verhalten sich bei besserer Basensättigung der tieferen Mineralbodenhorizonte ändern kann, da der Rückzug der Fichtenwurzeln aus den stark sauren Pseudogleyhorizonten nicht nur aus der dort herrschenden knappen Luftkapazität resultiert, sondern auch eine Folge der bodenchemischen Verhältnisse sein könnte, muß dahingestellt bleiben.

Für stabile Standorte allerdings kann die Feststellung, daß sich die Wurzelsysteme von Fichte und Buche im Hinblick auf die Tiefendurchwurzelung gegenseitig ergänzen, wichtig für den Aufbau von Mischbeständen aus beiden Baumarten sein. Allerdings ist bei Berücksichtigung aller waldbaulichen und waldwachstumskundlichen Überlegungen hier die gruppen- bis horstweise Mischung der Einzelbeimischung vorzuziehen.

3.3 Bestandesbehandlung und Bestandespflegestrategien

Von besonderer Bedeutung sind die Untersuchungsergebnisse für die Behandlung der vielen aktuell auf Staunässeböden stockenden Fichtenbestände. Die Erkenntnis, daß die Fichte mit ihren Wurzeln (Fein-, Schwach- und Mittelwurzeln) weite Abstände gut zu erschließen vermag, die Durchwurzelungsintensität in weitständigen Beständen nicht geringer ist als in dichtbegründeten und die Durchwurzelungsintensität und die Tiefendurchwurzelung am größten ist bei Bäumen, die frühzeitig einen großen Standraum hatten, erfordert entsprechende, diesen Standraum gewährleistende Eingriffe in die vor-

handenen Kulturen und Dickungen. Hierbei kann man sich von dem Hinweis leiten lassen, daß sich die Wurzelsumme je Einzelbaum in Fichtenreinbeständen bei einer Vergrößerung der Baumabstände von 3 auf 4 Meter noch einmal verdoppelt.

Es können also Abstandsregulierungen durchgeführt werden, die einem Ausgangsverband von z.B. 4 x 1,5 m entsprechen. Diese Eingriffe bezwecken eine Verbesserung des Verhältnisses Verankerungsmoment zu Sturmmoment und damit eine relative Stabilisierung der Bestände. Die Frage der Qualitätsentwicklung der Bestände tritt zwangsläufig in den Hintergrund. Sie muß aber nicht völlig außer Ansatz bleiben, da z.B. KRAMER et al., 1971, feststellen, daß bei den von ihnen untersuchten Beständen Standräume bis 6 m² das Ziel nicht gefährden, Aststärken nicht wesentlich über 20 mm zu erreichen. Festzuhalten bleibt, daß entsprechende Standräume für die Einzelbäume so früh wie möglich hergestellt werden müssen. Durch Bestandespflegemaßnahmen muß weiter sichergestellt sein, daß große Standräume auch erhalten bleiben. Die signifikanten Beziehungen zwischen Verankerungsmoment, Wurzelwachstum und oberirdischem Teil des Baumes erfordern also, daß die Bäume durch die ganze Jugendphase hindurch mit großen lebenden Kronen aufwachsen und diese später erhalten können. Beigemischte Buchen, Eichenstockausschläge und vermutlich auch andere Laubbaumarten spielen für die Flächendurchwurzelung der der Fichte eingeräumten Standräume eine untergeordnete Rolle, da sie die Wurzelentwicklung der Fichte in die freien Räume hinein nicht beeinflussen. Sie sollten also damit auch unter diesem Aspekt in den Beständen erhalten bleiben, damit ihr günstiger Einfluß auf die Stoffkreisläufe gewahrt bleibt.

4 FOLGERUNGEN AUS DEN ERGEBNISSEN DER METEOROLOGISCHEN UNTERSUCHUNGEN

Die Stürme der vergangenen Jahre trafen auf Waldbestände, die noch nie seit Beginn einer geregelten Forstwirtschaft so alt (hoch!) und vorratsreich waren. Dies hat sich sicherlich auf die Höhe der Sturmschäden ausgewirkt. Dennoch muß festgehalten werden, daß starke Stürme im Untersuchungsgebiet im Durchschnitt einmal im Jahr auftreten. Dieses Ergebnis der meteorologischen Untersuchung und die Konzentration von Pseudogleystandorten im Untersuchungsgebiet zwingen zu grundlegenden waldbaulichen Orientierungen hinsichtlich der Baumartenwahl und der Bestandesstrukturen. Dies ist umso notwendiger, als sich herausgestellt hat, daß auch eine intakte räumliche Ordnung mit Hiebszügen und Deckungsschutz keine Gewähr für die Stabilität der Bestände bietet. Sturmriegel aus tiefwurzelnden Baumarten, wie z.B. Eiche, können die dahinter-

liegenden Bestände nicht ausreichend schützen. Wipfelköpfungen sind auf Stauwasserstandorten häufig unwirksam und auf stabilen Standorten nur bei entsprechender Größe des zu schützenden Bestandes wirtschaftlich vertretbar (BLOCK u.a. 1989).

Die Stabilität eines Bestandes muß von innen heraus gegeben sein. Dieses Ziel wird aber mit einer Fichtenbestockung auf Pseudogleystandorten nicht erreicht. Das Risiko kann deshalb nur dann drastisch gemindert werden, wenn auf allen Pseudogleystandorten Bestände mit standortgerechten, tiefwurzelnden Baumarten angebaut werden, die in der Lage sind, die ungünstigen bodenphysikalischen Verhältnisse zu bewältigen. Wo es nur immer möglich ist, muß dieser Umbau kleinflächig und ohne längere Kahllegungen der Waldböden geschehen. Gewonnene subtilere Kenntnisse über die differenzierte Auswirkung der Grade der Pseudovergleyung auf das Wurzelwachstum der Bäume regen zu einer noch intensiveren Erforschung dieser Bodentypen an. Ziel sollte es sein, genauere Abgrenzungskriterien für den Wasser- und Lufthaushalt der Pseudogleye zu bekommen, die es gegebenenfalls erlauben, auch andere Baumarten, z.B. Edellaubbaumarten, in die waldbaulichen Überlegungen einzubeziehen.

5 ZUSAMMENFASSUNG WICHTIGER WALDBAULICHER KONSEQUENZEN

Für eine nachhaltige Forstwirtschaft sind Stabilität und Elastizität der Waldökosysteme von ausschlaggebender Bedeutung. Die Stabilität gegen Einflüsse von außerhalb des Systems (Sturm, Schnee u.a.) muß dabei gekoppelt sein mit einer systeminternen Stabilität (Funktionieren der Nährstoffkreisläufe), die beide gleichzeitig die notwendige Elastizität des Systems sicherstellen.

Stabilität nach außen und innen und Elastizität lassen sich für die stauwasserbeeinflussten Standorte - hier geben die vorliegenden Untersuchungen geeignete Hinweise - glücklicherweise durch dieselben waldbaulichen Entscheidungen fördern.

Dies führt zu folgenden wichtigen waldbaulichen Konsequenzen:

- Die **Fichte** scheidet für einen Anbau auf den Pseudogleyen (Grundform IX) und Braunerde-Pseudogleyen (Grundform VIII) aus.

Allenfalls auf eher wechsellückigen Pseudogley-Braunerden (Grundform VII) ist eine planmäßige Beimischung, meist als Zeitmischung, denkbar.

Im übrigen muß auch auf Braunerden der Grundform III die Fichte aus systeminternen Gründen und zur Erhaltung der Elastizität des Systems im **Mischbestand** begründet werden.

- Stauwasserbeeinflusste Standorte aller Ausprägungen müssen mit **wurzelintensiven** Baumarten bestockt werden.

Auf der weit überwiegenden Fläche der Pseudogleye und Braunerde-Pseudogleye kommen hierfür in erster Linie die **Stieleiche**, aber auch die **Traubeneiche** als Leitbaumarten in Frage. Weißtanne und Roterle ergänzen die Palette; sie sind auch in den höheren Mittelgebirgslagen als führende Baumarten geeignet.

Die **Buche** soll in allen Bestandstypen zumindest als dienende Baumart mit hohen Anteilen beteiligt sein. In tieferen Lagen mit besserer Nährstoffversorgung tritt die **Hainbuche** hinzu.

Als Leitbaumart kann die **Buche**, in Mischung mit tiefwurzelnder Eiche oder Tanne, auf Braunerde-Pseudogleyen und Pseudogley-Braunerden dienen. Hier kann als weitere Mischbaumart alternativ oder ergänzend auch **Abies grandis** als Mischbaumart beteiligt werden.

Bei der Beimischung von **Edellaubbaumarten** auf stauwasserbeeinflussten Standorten ist Zurückhaltung geboten, bis genauere Untersuchungen über die Eignung der Pseudogleybodentypen hierzu vorliegen.

- In vorhandenen **jüngeren Fichtenbeständen** ist durch **starke Pflegeeingriffe** frühzeitig für den notwendigen Standraum zu sorgen (s. Kap. 3.2). Dabei müssen alle evtl. vorhandenen Laubbaumarten - auch auf Kosten der Fichte - erhalten werden.

In **älteren Fichtenbeständen** können allenfalls **schwache**, niederdurchforstungsartige **Eingriffe** geführt werden, weil stärkere Eingriffe, insbesondere im Herrschenden, unweigerlich einer Destabilisierung der Bestände zur Folge haben müssen.

- Maßnahmen der räumlichen Ordnung können auf stauwasserbeeinflussten Standorten hilfreich sein. Bei Fichtenreinbeständen kann durch sie aber keine nachhaltige Stabilität erreicht werden. Diese wird nur durch von "innen heraus" stabilisierte Bestände gewährleistet.

- Eine durchschlagende Stabilisierung angerissener Bestände durch Wipfelköpfungen konnte auf stauwasserbeeinflussten Standorten nicht nachgewiesen werden.
- Befahrungen und Bodenbearbeitungen müssen auf stauwasserbeeinflussten Standorten unterbleiben. Wenn Befahrungen nicht zu umgehen sind, ist eine strikte Konzentration auf dauerhafte Linien erforderlich.

Die in ihren Auswirkungen weitaus gravierenderen Stürme des Frühjahrs 1990 haben die Bedeutung der SIMS-Untersuchungsergebnisse nachdrücklich unterstrichen. Sie haben gezeigt, daß weitergehende Forschungsansätze, z.B. zur Ermittlung der Nährstoffverluste auf Kahlflächen, zur Frage der Bodenbearbeitung und anderem mehr dringend aufgegriffen werden müssen. Sie haben aber auch gleichzeitig die Chance eröffnet, die Erkenntnisse aus dem SIMS-Projekt auf großer Fläche direkt in die Praxis umzusetzen.

6 LITERATUR

BENECKE, P. (1990): Schäden an Waldstandorten, Allgem. Forst Zeitschrift, 45, H. 24, S. 597-602

BLOCK, J., DEINET, A., HEUPEL, M., ROEDER, A., WUNN, U. (1989): Empirische, betriebswirtschaftliche und mathematisch-statistische Untersuchungen zur Wipfelköpfung der Fichte, Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 11/89

BLOCK, J., BOPP, O., GATTI, M., HEIDINGSFELD, N., ZOTH, R. (1991): Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 17/91

KRAMER, H., DONG, P.H., RUSACK, H.J. (1971): Untersuchung der Baumqualität in weitständig begründeten Fichtenbeständen. Allg. Forst und Jagd Zeitung 142: S. 33-46

ZOTH, R. u. BLOCK, J. (1992): Untersuchungen an Wurzelballen sturmgeworfener Bäume in Rheinland-Pfalz. Forst und Holz, im Druck.

BERICHTE UND VERÖFFENTLICHUNGEN AUS DEM SIMS-PROJEKT

- BEUTEL, E. (1986):** Infrarot-Color-Luftbildbefliegung 1984 im Rhein-Hunsrück-Kreis. *Der Forst- und Holzwirt*, 41: S. 442 - 444.
- BLOCK, J., DEINET, A., HEUPEL, M., ROEDER, A. und WUNN, U. (1989):** Empirische, betriebswirtschaftliche und mathematisch-statistische Untersuchungen zur Wipfelköpfung der Fichte. *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz*, Nr. 11/89, 122 S.
- DEGENHARDT, M. (1990):** Vergleich der Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität von Buche, Fichte und Eiche in verschiedenen Mischungsformen auf einem Braunerde-Pseudogley im Forstamt Kirchberg (Hunsrück). Diplomarbeit. Inst. f. Bodenk. u. Waldernähr. d. Univ. Göttingen.
- EDER, W. (1991):** Konsequenzen aus den Untersuchungsergebnissen des SIMS-Projektes in Hinblick auf die waldbauliche Behandlung von Staunässestandorten. In diesem Heft.
- FLOR, T. (1990):** Untersuchung der Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität eines Fichten-Buchen-Mischbestandes im Falle einzelstammweiser Baumartenmischung auf einem Braunerde-Pseudogley der Grundform VIII im Forstamt Simmern (Hunsrück). Diplomarbeit. Inst. f. Bodenk. u. Waldernähr. d. Univ. Göttingen.
- FÖLSTER, H., DEGENHARDT, M., FLOR, T. und LUX, M. (1991):** Untersuchungen zur Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität auf Braunerde-Pseudogleyen im Vorderen Hunsrück in Abhängigkeit von Baumart und Bestandesstrukturparametern. In diesem Heft.
- FÖLSTER, H. und XU, Y. (1991):** Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Küstentanne (*Abies grandis*) und Fichte (*Picea abies*) auf veräsnsten Standorten. In diesem Heft.
- GALLUS, M. und HEUPEL, M. (1987):** Feststellung von Beziehungen zwischen Sturmschäden, Standort und Bestandesstruktur bei der Baumart Fichte im Rahmen des Projektes "SIMS", unveröffentlichte Untersuchung der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Trippstadt.
- GRAVENHORST, G., GIESEMANN, J. und KREILEIN, H. (1991):** Feststellung von Beziehungen zwischen Sturmschäden und außergewöhnlichen meteorologischen Einflüssen im Vorderen Hunsrück. Unveröffentlichter Endbericht eines Teilprojektes des Forschungsschwerpunktes "Sturm- und Immissionsschäden im Vorderen Hunsrück "SIMS".
- GRAVENHORST, G., GIESEMANN, J., KREILEIN, H. und RASCHENDORFER, M. (1991):** Die Zunahme von Sturmschäden in den Wäldern des Vorderen Hunsrück und ihre mögliche atmosphärische Ursache. In diesem Heft.
- HEUPEL, M. und BLOCK, J. (1991a):** Untersuchungen zum Einfluß des Standortes und der Bestandesstruktur auf das Ausmaß von Sturmschäden im Vorderen Hunsrück. In diesem Heft.
- HEUPEL, M. und BLOCK, J. (1991b):** Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wipfelköpfungen auf Pseudogleyböden. In diesem Heft.

LUX, M. (1990): Bestandesdurchwurzelung eines Fichtenreinbestandes auf einem Braunerde-Pseudogley in Abhängigkeit von der Bestandesdichte und oberirdischen Parametern. Diplomarbeit. Inst. f. Bodenk. u. Waldernähr. d. Univ. Göttingen.

RASTIN, N. und ULRICH, B. (1990a): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden über den Einfluß von Standort und Immission auf die Entstehung von Sturmschäden in den Forstämtern des Vorderhunsrücks - SIMS -". Teilberichte "Erfassung der Depositionsrate und Untersuchung des Bodenwassers auf den Standortgrundformen III, VIII und IX" sowie "Destruktive Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden".

RASTIN, N. und ULRICH, B. (1990b): Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf drei unterschiedlichen Standorten. *Forst und Holz*, 22: S. 665 - 668

RASTIN, N. (1991a): Immissionsbelastung der SIMS-Standorte. In diesem Heft.

RASTIN, N. (1991b): Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf Braunerde-, Braunerde-Pseudogley - und Pseudogleyböden im Vorderen Hunsrück. In diesem Heft.

RASTIN, N. (1991c): Influence of waterlogging on root distribution, fine-root biomass and mycorrhizal number of Norway Spruce. In: *Plant Roots and Their Environment* (B.L. Mc Michael and H. Persson, Eds.), Elseviers, im Druck.

RASTIN, N. (1991d): Untersuchungen zur Verankerung von Fichten auf Braunerde-, Braunerde-Pseudogley - und Pseudogley-Böden des Vorderen Hunsrücks. In diesem Heft.

SCHMIDT, J. P. (1990): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden über den Einfluß von Standort und Immission auf die Entstehung von Sturmschäden in den Forstämtern des Vorderhunsrücks -SIMS-". Teilbericht "Standörtliche Ausprägung und Verbreitung hydromorphologischer Bodenmerkmale und ihre Bedeutung für den Wasserhaushalt". Unveröffentlicht.

SCHMIDT, J. P. (1991): Die Beziehung der hydromorphologischen Merkmale zum Wasserhaushalt auf Waldstandorten im Hunsrück. In diesem Heft.

ULRICH, B. (1991): Zusammenfassende ökologische Bewertung der Untersuchungsergebnisse des SIMS-Projektes. In diesem Heft.

Bisher sind folgende Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz erschienen:

- | | | |
|--------|---|---------|
| 1/1987 | Jahresbericht 1984 - 1986
ISSN 0931 - 9662 | |
| 2/1987 | BLOCK, STELZER:
Radioökologische Untersuchungen in Waldbeständen
ISSN 0931 - 9662 | DM 12.- |
| 3/1987 | BLOCK, BOCKHOLT, BORCHERT, FINGERHUT,
FRAUDE, HEIDINGSFELD
Sondermeßprogramm Wald (SMW)
ISSN 0931 - 9662 | DM 12.- |
| 4/1987 | BEUTEL, BLOCK:
Terrestrische Feldgehölzschadenserhebung
(TFGE 1986)
ISSN 0931 - 9662 | DM 12.- |
| 5/1988 | Die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz
im Dienste von Wald und Forstwirtschaft
- Reden anlässlich der Übergabe des Schlosses
Trippstadt als Dienstsitz am 10.04.1987
ISSN 0931 - 9662 | DM 12.- |
| 6/1988 | Jahresbericht 1987
ISSN 0931 - 9662 | |
| 7/1988 | BEUTEL, BLOCK:
Terrestrische Parkgehölzschadenserhebung
(TPGE 1987)
ISSN 0931 - 9662 | DM 12.- |
| 8/1988 | GERECKE:
Zum Wachstumsgang von Buchen in der Nordpfalz
ISSN 0931 - 9662 | DM 30.- |

- 9/1989 Jahresbericht 1988
ISSN 0936 - 6067
- 10/1989 HEIDINGSFELD: DM 25.-
Verfahren zur luftbildgestützten Intensiv-
Waldschadenserhebung in Rheinland-Pfalz
ISSN 0936 - 6067
- 11/1989 BLOCK, DEINET, HEUPEL, ROEDER, WUNN: DM 12.-
Empirische, betriebswirtschaftliche und
mathematische Untersuchungen zur Wipfelköpfung
der Fichte
ISSN 0931 - 9662
- 12/1989 Jahresbericht 1989
ISSN 0931 - 9662
ISSN 0936 - 6067
- 13/1990 SCHÜLER: DM 12.-
Der kombinierte Durchforstungs- und
Düngungsversuch Kastellaun
- angelegt 1959 - heute noch aktuell?
ISSN 0931 - 9662
- 14/1990 BLOCK: DM 12.-
Ergebnisse der Stoffdepositionsmessungen
in rheinland-pfälzischen Waldgebieten
1984 - 1989
- 15/1990 Jahresbericht 1990
ISSN 0931 - 9662
ISSN 0936 - 6067

- 16/1991 BLOCK, BOCKHOLT, BORCHERT, FINGERHUT,
HEIDINGSFELD, SCHRÖCK: DM 12.-
Immissions-, Wirkungs- und Zustandsunter-
suchungen in Waldgebieten von Rheinland-Pfalz
-Sondermeßprogramm Wald, Ergebnisse 1983-1989-
ISSN 0931 - 9662
- 17/1991 BLOCK, BOPP, GATTI, HEIDINGSFELD, ZOTH: DM 12.-
Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in
Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz
ISSN 0931 - 9662
- 18/1991 SCHÜLER, BUTZ-BRAUN, SCHÖNE: DM 12.-
Versuche zum Bodenschutz und zur Düngung
von Waldbeständen
ISSN 0931 - 9662