

**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**

**D-6751 Trippstadt**

**Telefon: 06306/8311**

**Telefax: 06306/2821**

**Nr. 18/91**

**G. Schüler, R. Butz-Braun, D. Schöne**

**Versuche zum Bodenschutz  
und zur Düngung von Waldbeständen**

**ISSN 0931 - 9662**

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
DIVISION OF THE PHYSICAL SCIENCES  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
5708 SOUTH CAMPUS DRIVE  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

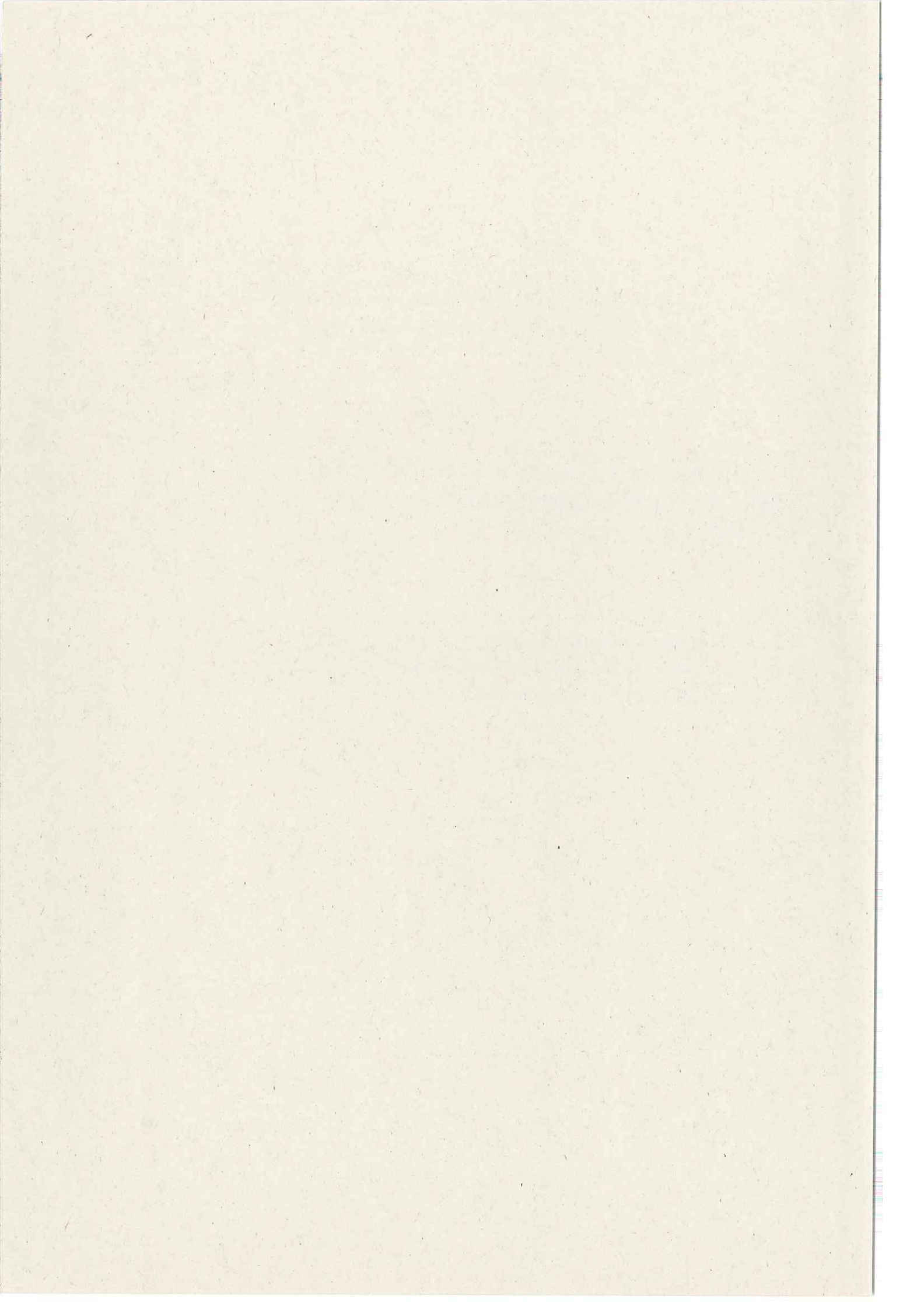
1971

RECEIVED

DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
UNIVERSITY OF CHICAGO

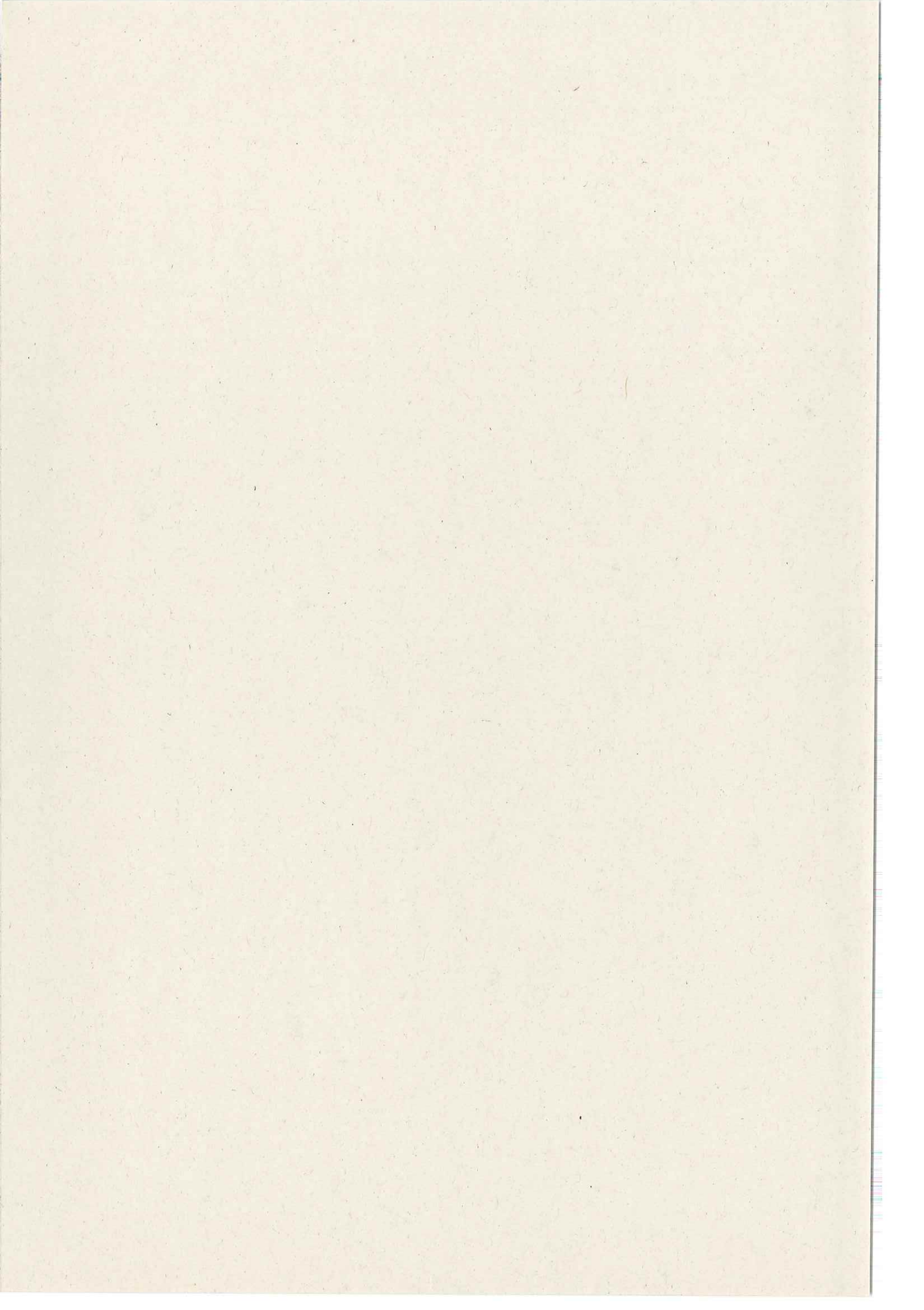
## INHALT

	Seite
<b>Der Einsatz von Gesteinsmehlen zum Schutze säurebelasteter Waldökosysteme im rheinland-pfälzischen Forstamt Linz von Gebhard Schüler</b>	<b>5</b>
<b>Veränderungen an Tonmineralen zwischen 1988 und 1990 in Böden nach Gesteinsmehlbehandlung im Forstamt Linz von Rüdiger Butz-Braun</b>	<b>77</b>
<b>Der Düngerversuch Hunsrück 1969 mit Stickstoff, Phosphor und Calcium in Buchen- und Fichtenbeständen von Dieter Schöne und Gebhard Schüler</b>	<b>117</b>



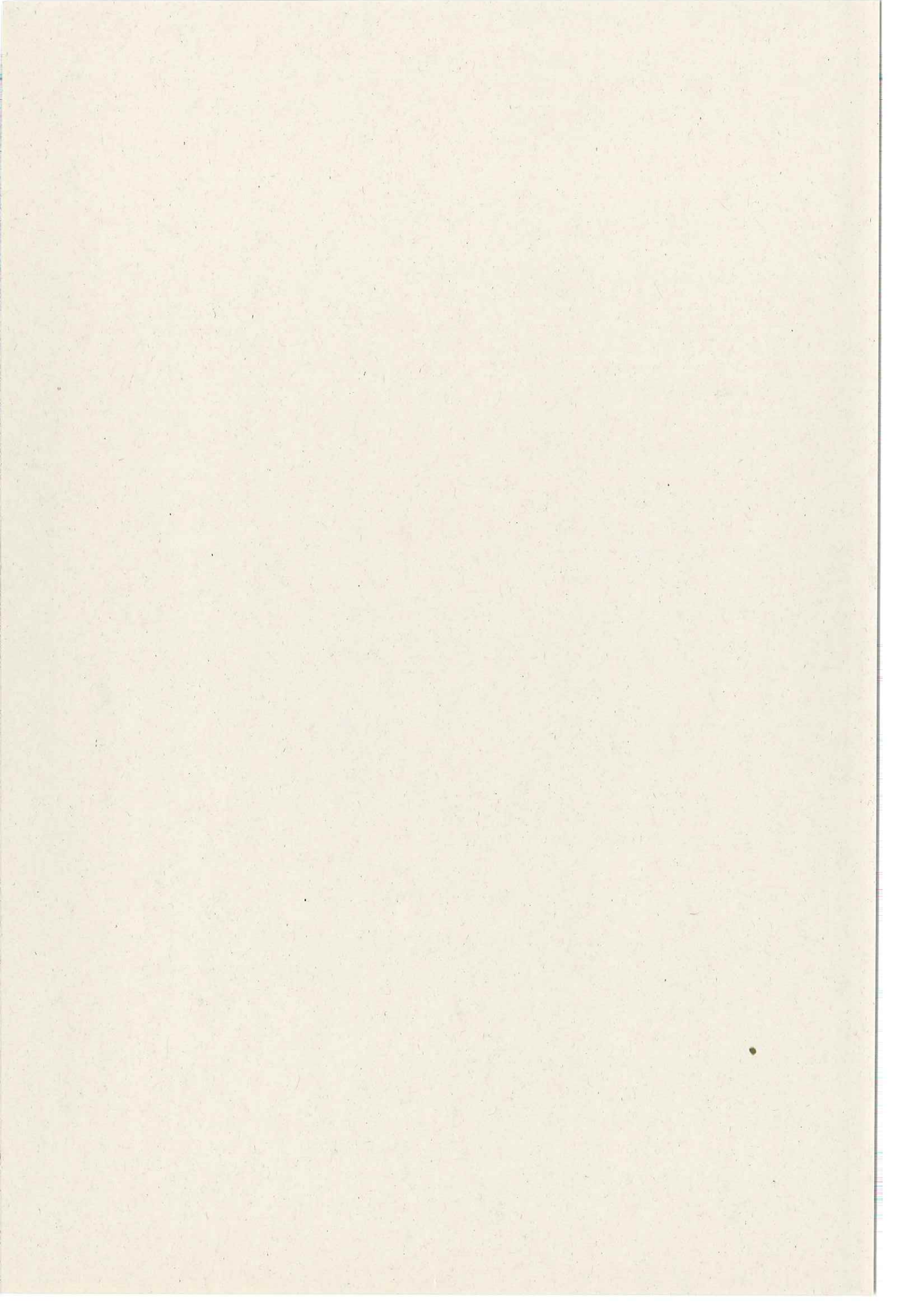
**Der Einsatz von Gesteinsmehlen zum Schutze säurebelasteter Waldökosysteme  
im rheinland-pfälzischen Forstamt Linz**

**Gebhard Schüler**



# INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG</b>	9
<b>2 VERSUCHSANLAGE UND METHODIK</b>	11
2.1 Standort und Bestand	11
2.2 Versuchsflächendesign	13
2.3 Untersuchungsansatz	14
2.4 Methoden	15
<b>3 ERGEBNISSE</b>	17
3.1 Charakterisierung der Neutralisationskapazitäten und -raten der verwendeten Gesteinsmehle in Laborunter- suchungen	17
3.2 Auswirkungen der Gesteinsmehle auf die Humusaufgabe und den Mineralboden	20
3.3 Auswirkungen der Gesteinsmehlgaben auf die Nähr- elementversorgung der Fichten	33
3.4 Ansprache der okular erkennbaren Schadsymptome	36
<b>4 DIE EIGNUNG DER DOLOMITISCHEN UND SILIKATISCHEN GESTEINSMEHLE FÜR BODENSCHUTZ-, RESTAURATIONS- UND MELIORATIONSMASSNAHMEN</b>	38
<b>5 ZUSAMMENFASSUNG - SUMMARY</b>	45
<b>6 LITERATURVERZEICHNIS</b>	47
<b>7 ANHANG: TABELLEN</b>	52





## 1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Neben ökosysteminternen Versauerungsprozessen tragen insbesondere saure Depositionen aus Luftschadstoffen zur Destabilisierung der Waldökosysteme bei (BREDEMEIER und ULRICH, 1989). Alleine die Säuredepositionen aus anthropogenen Quellen übersteigen die Pufferraten der Waldböden um ein Vielfaches (BLOCK und NIESAR, 1989; ULRICH, 1986). Damit ergeben sich für die Ökosystemkompartimente "Waldböden" Folgen wie

- Nährstoffverluste,
- Überangebot von Stickstoffverbindungen (Nitrat, Ammonium),
- Freisetzung von Aluminium- und Schwermetallionen,
- und auf lange Sicht die Zerstörung der Tonmineralbestände.

In Wechselwirkung der direkten Einwirkungen von Ozon und anderen Photooxidantien mit sauren Niederschlägen kommt es zum Leaching leicht mobilisierbarer Elemente aus den Nadel- und Blattoorganen der Bäume. Gleichzeitig führt eine versauerungs- und standortsbedingt unzureichende Nährelementnachlieferung bei häufigem Überangebot von Stickstoff und Aluminium, sowie bei Antagonismen zwischen verschiedenen Elementen zu Schad- und Nährelementmangelsymptomen (ZÖTTL, 1985). Charakteristisch für die Versauerung destabilisierter Waldbestände ist die stete Akkumulation der Streu, also stickstoffhaltiger, organischer Substanz.

Bodenschutzmaßnahmen, die darauf abzielen, eingetragene Säuren zu neutralisieren und die biologische Aktivität zu stimulieren, müssen so moderat wirken, daß eine übermäßige Mineralisation dieser Humusaufgabe mit entsprechenden Stickstoffausträgen und damit ökosystembedingten Versauerungsschüben vermieden wird (SAUTER und MEIWES, 1990). Die Dünge Richtlinien für den bayerischen Staatswald sehen daher auf Risikostandorten, auf denen Nitratausträge zu erwarten sind, versuchsweise den Einsatz von silikatischen Gesteinsmehlen vor (ENCKE, 1988).

Neben den Vorteilen einer Pufferwirkung wird den Gesteinsmehlen auch eine harmonische Düngewirkung bezüglich der Elemente Kalium, Calcium und Magnesium zugeschrieben (HILDEBRAND, 1989). Die Puffer- und Düngewirkung von Gesteinsmehlen hängt jedoch stark von deren geogenen Inhaltsstoffen und insbesondere deren Verwitterungsverhalten ab. Dieses wiederum wird entscheidend von der mineralogischen Zusammensetzung und der Korngrößenverteilung beeinflusst (von FRAGSTEIN, 1982). Mit fortschreitender physikalischer Verwitterung bzw. Aufmahlung steigt die chemische Reaktionsgeschwindigkeit (EMMERMANN, 1984). Dabei können drei Reaktionsmechanismen aufgezeigt werden:

1. Hydrolyse/Protolyse,
2. Oxidation/Reduktion und
3. Chelatbildung.

Beginnend mit Austauschprozessen im Randbereich der Gesteinspartikel weiten sich die Kristallgitter auf, bis schließlich das Kieselsäuregerüst in amorphe Kieselsäure übergeht. In Verbindung mit organischen Säuren in der Humusaufgabe kommt es aufgrund deren Fähigkeit zur Komplexbildung zu höheren Freisetzungsraten von Kationen als nach der Einwirkung von mineralischen Säuren (SCHEFFER, ULRICH und HIESKERMANN, 1957; SINGER und NAVROT, 1976). Gleichermaßen bewirken ausgeschiedene organische Säuren von Mikroorganismen bzw. Wurzelspitzen eine Freisetzung von Makro- und Mikroelementen, die dann für die Pflanzenernährung zur Verfügung stehen (TYNER, 1935; ECKHARDT, 1979).

In Praxisdüngungsmaßnahmen wurde versucht, die geringeren Gehalte an basisch wirksamen Stoffen in silikatischen Gesteinsmehlen gegenüber Neutralsalzen oder Düngemitteln in karbonatischer Form durch erhöhte Dosierungen auszugleichen. So haben SAUTER und FOERST (1987) Aufwandmengen von 5-10 t je ha empfohlen. Dabei zeigten überschlägige Berechnungen, daß eine nachhaltige Erhöhung der Austauschkapazität im Boden - also eine nachhaltige Melioration oder Restauration - mit diesen Mengen nicht zu erreichen ist. Zur Melioration wurden daher für sorptionsarme Waldböden Mengen von 1 t je ha und Jahr über Jahrzehnte hinweg (BLUM et al., 1989), bis zu 300 t je ha (von FRAGSTEIN, 1982; PFLEIDERER, 1986) oder Pflanzlochdüngungen mit 3 kg Gesteinsmehl je Pflanze (HILF, 1937; HILF, 1938) empfohlen.

Bodenschutzmaßnahmen zielen jedoch weniger auf eine Bodenmelioration als vielmehr auf die Neutralisation mineralischer Säuren aus Luftschadstoffdepositionen. Die chemische Verwitterung basischer Substanzen, und damit deren tatsächliche Pufferleistung hängt vom Verhältnis der im Ökosystem vorhandenen Kat- und Anionen mit höherer Bindungsenthalpie ab. Daher müßte es theoretisch möglich sein, bei einem entsprechenden Vermahlungsgrad mit zu karbonatischem Material vergleichbaren Mengen Neutralisierungseffekte zu erzielen. Zusätzlich müßten durch die Austauschvorgänge an und in den Gesteinsmehlen und durch die Chelatbildung bei Zersetzung der Silikate die Nährstoffversorgung der Pflanzen verbessert werden können.

Um dies zu überprüfen, wurde im Frühjahr 1986 in einem Fichtenbestand im Forstamt Linz ein Versuch mit Dolomit und zwei silikatischen Gesteinsmehlen angelegt. Aufgrund der erwarteten Reaktionsmechanismen sollte dieser Versuch langfristig beobachtet werden. Leider zerstörten die Stürme im Frühjahr 1990 wesentliche Teile der Versuchsanlage. Eine abschließende Probenahme ermöglichte die im Folgenden dargestellte Auswertung.

## 2 VERSUCHSANLAGE UND METHODIK

### 2.1 Standort und Bestand

Die Versuchsanlage liegt im Wuchsbezirk "Unteres Mittelrheingebiet" (8321) in einer Höhenlage von 300 m über NN. Das Klima ist gekennzeichnet durch eine mittlere Jahrestemperatur von 9° C und eine Vegetationszeittemperatur von 15,7° C. An Niederschlägen fallen hier durchschnittlich 750 mm im Jahr, davon ca. 40 % in der forstlichen Vegetationszeit (Mai-Oktober).

Der Boden ist eine flachgründige, mäßig frische Braunerde aus diluvialen Decklehm über devonischen Tonschiefer mit plattigen Grauwackeneinlagerungen der Siegener Stufe. Der Boden war zum Zeitpunkt der Versuchsanlage stark und tiefreichend versauert (Ah-Horizont: Aluminium-/Eisen-Pufferbereich, Bv- und BvCv-Horizont: Aluminium-Pufferbereich). Die Basensättigung (V-Wert) betrug in allen Horizonten weniger als 5 %. An ca. 80 % der Austauscherplätze im Oberboden und ca. 90 % in den unteren Mineralbodenhorizonten war Aluminium als austauschbares Kation zu finden (Übersicht 1).

Die Versuchsanlage befindet sich mit wesentlichen Teilen auf einem leicht nach Südwesten geneigten Plateau und geht am nördlichen Rand in einen relativ steilen Nordhang über. Der aufstockende Fichtenreinbestand war bei Versuchsende (1990) 60-jährig. Die Feinwurzeln der Fichten befinden sich hauptsächlich in der organischen Auflage und in den obersten Zentimetern des Mineralbodens (bis 20 Feinwurzeln/dm<sup>2</sup>). Bis ca. 50 cm Tiefe kann eine noch schwache Durchwurzelung (2-5 Feinwurzeln/dm<sup>2</sup>) festgestellt werden.

Übersicht 1: Profilbeschreibung der flachgründigen, mäßig frischen Braunerde aus devonischem Ausgangsmaterial im Forstamt Linz, Gemeinwald Rheinbreitbach, Abt. 50 d

Horizont	Tiefe/ Stärke (cm)	Humusform/ Bodenart	Humosität	Skelett- anteil (%)	Gefüge	Durch- wurzelung	Trocken- raumdichte (g/cm <sup>3</sup> )	nWSK (mm)	pH	V-Wert (% Ak <sub>e</sub> )	Al- (% Ak <sub>e</sub> )	Ak /μmol/eq/g	Pufferbereich	C/N	C/P
O <sub>L</sub>	6,1-4,6	typischer Moder	---	---	schichtig gelagert										
O <sub>F</sub>	4,6-1,0	bis rohhumus- artiger	---	---	Z.T. gerin- ger Anteil von Pflan- zenresten	stark (10-20/dm <sup>2</sup> )		3,3						22,1	431,3
O <sub>H</sub>	1,0-0	Moder	---	---											
I A <sub>h</sub>	0 - 3	uL	stark humos	5	Polyeder	mittel (5-10/dm <sup>2</sup> )	1,35	6,27	3,5	4,5	79	97,11	Al-/Fe- Pufferbereich		
I B <sub>v</sub>	3 - 30	uL - tL	schwach humos	10 - 25	Polyeder/ Scherben Platten	schwach (2-5/dm <sup>2</sup> )	1,40	42,48	3,8	4,2	90	71,38	Al- Pufferbereich		
II B C <sub>v v</sub>	30 - 47	tL	---	35		schwach (2-5/dm <sup>2</sup> )	1,50	19,31	3,9	3,9	92	80,48	Al- Pufferbereich		
II C <sub>v</sub>	> 47	--	---	> 80	---	sehr schwach (1-2/dm <sup>2</sup> )	--	---	--	--	--	---	---		

nWSK = nutzbare Wasserspeicherkapazität

V-Wert = Basensättigung

Ak<sub>e</sub> = effektive Austauschkapazität

## 2.2 Versuchsflächendesign

Im Fichtenbestand wurden acht 0,1 ha große Parzellen angelegt (Abb. 2). Je 2 Parzellen wurden als Kontrollfläche belassen, bzw. mit jeweils 3 t/ha feinvermahlenem Dolomit (0 - 0,09 mm), silikatischem Gesteinsmehl (0 - 0,06 mm) und silikatischem Gesteinsmehl mit Magnesit (0 - 0,06 mm) behandelt. Aufgrund der räumlichen Enge wurde eine Kontrollfläche (Parzelle 8) und eine mit Dolomit behandelte Fläche (Parzelle 7) zwar im gleichen Bestand, aber auf dem sich im Norden anschließenden Hang angelegt. Die unmittelbare Vergleichbarkeit zu den übrigen Parzellen ist somit nicht gewährleistet. Die Parzellen 5 (silikatisches Gesteinsmehl) und 6 (silikatisches Gesteinsmehl mit Magnesit) sind flachgründiger als die Parzellen 1 bis 4. Die standörtliche Verschiedenheit war daher bei der Auswertung der Meßergebnisse zu berücksichtigen.

Abb. 1: Anordnung der Versuchspartellen

Forstamt Linz

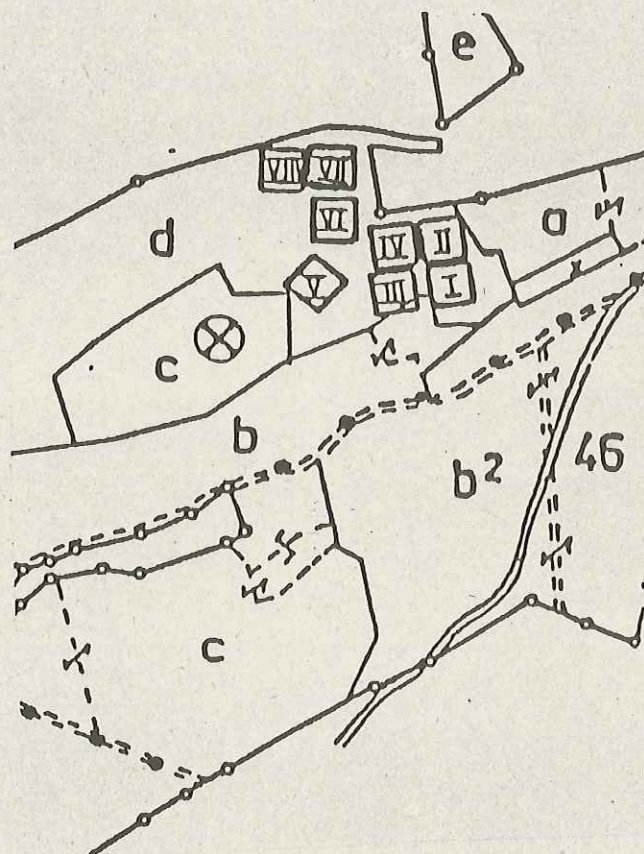
Forstrevier Rheinbreitbach

Parzellen I und VII : Dolomit

Parzellen IV und V : Sil. Gesteinsmehl

Parzellen III und VI : Sil. Gesteinsmehl  
mit Magnesit

Parzellen II und VIII: Nullparzellen



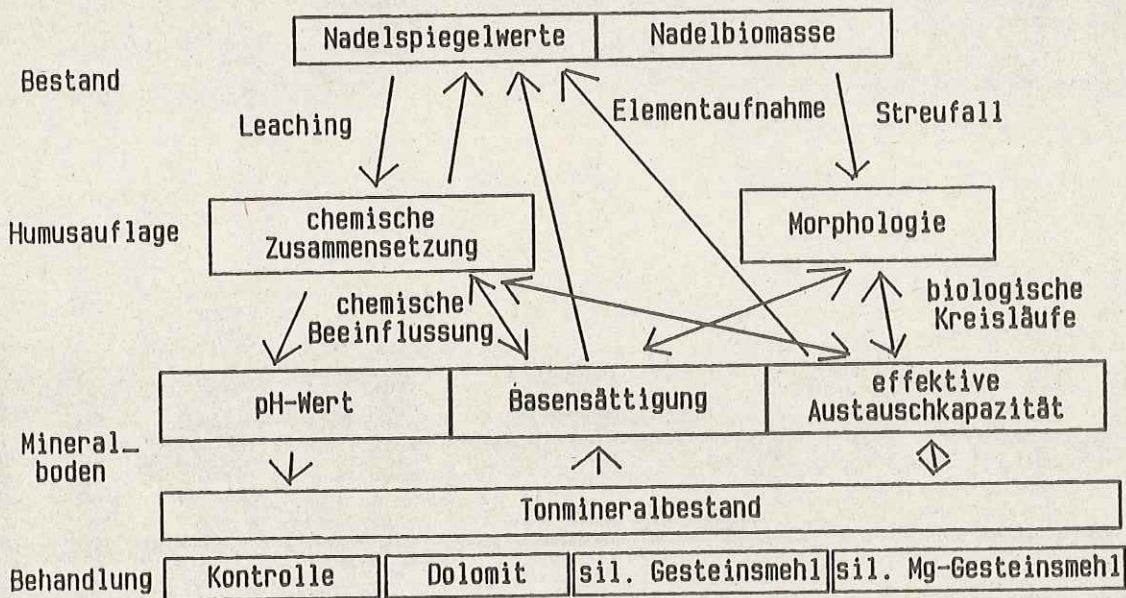
Um eine möglichst genaue und gleichmäßige Verteilung der Gesteinsmehle zu erreichen, erfolgte die Ausbringung manuell. Das Dolomitgesteinsmehl wurde am 11.4.1986, die silikatischen Gesteinsmehle am 12.6.1986 ausgebracht.

### 2.3 Untersuchungsansatz

Die Untersuchungen sollten klären, wie effizient ein säurebelastetes Waldökosystem durch die Ausbringung von verschiedenen Gesteinsmehlen (Dolomit, silikatisches Gesteinsmehl, silikatisches Gesteinsmehl mit Magnesit) vor der Einwirkung von sauren Luftschadstoffdepositionen geschützt werden kann (Abb. 1). Gleichzeitig war zu überprüfen, ob die im Versuch ergriffenen Bodenschutzmaßnahmen auch einer ausgewogenen Nährelementversorgung dienen. Da in der Humusauflage wichtige Stoffumsätze ablaufen, die den aktuellen Nährelementhaushalt entscheidend beeinflussen (KRAPPENBAUER und GASCH, 1989), wurden entsprechende chemische und morphologische Reaktionen untersucht.

Mit Hilfe chemischer Mineralbodenanalysen wurden die austauschbaren Nährelementvorräte ermittelt, um die potentielle Versorgung der Pflanzenbestände zu bewerten. Die tatsächliche Nährelementversorgung wurde mittels Nadelanalysen untersucht.

Abb. 2: Untersuchungsebenen zur Beurteilung der Stabilitätsentwicklung von Ökosystemkompartimenten



Entwicklungen im Tonmineralbestand werden aufgezeigt (BUTZ-BRAUN, 1991, in diesem Band), da der Zustand und die Kationenbelegung der Tonmineralzwischenschichten entscheidende Hinweise auf eine Stabilisierung, bzw. Destabilisierung der Waldböden geben (VELDE und BRUSEWITZ, 1986 und FIEDLER, 1988).

## 2.4 Methoden

Nadelproben wurden jeweils vom 1. und 3. Nadeljahrgang des 7. Quirls gewonnen. Die Nadelprobennahme 1988 erfolgte mit Hilfe eines Helikopters (SCHÜLER, 1988). 1990 wurden die Proben an den liegenden, vom Sturm geworfenen Fichten entnommen. Unmittelbar danach wurde an den Probeästen die Benadelungsdichte, die Farbe der Nadeln, sowie Farbmerkmale der grünen Nadeln, jeweils in Prozent der gesamten zu beurteilenden Nadelmasse okular eingeschätzt. 1988 wurden 5 Fichten je Parzelle beprobt, 1990 10 Fichten je Parzelle. Aus den Nadeln von jeweils 5 Ästen wurde eine Mischprobe gebildet. Diese wurden nach  $\text{HNO}_3$ -Druckaufschluß im Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen chemisch analysiert.

Die Einordnung der Analysenergebnisse in Mangel-, Normalversorgungs- oder Überversorgungsbereiche erfolgte mit Hilfe der umfangreichen von VAN DEN BURG (1985) zusammengestellten Nadelanalysenergebnisse und den von BERGMANN (1983) veröffentlichten Grenzwerten.

Vor der Gesteinsmehlausbringung sind weder Boden- noch Humusproben genommen worden. Ein halbes Jahr nach der Flächenbehandlung erfolgte eine erste Beprobung.

Für die Humusanalysen wurden aus der  $\text{O}_F^-/\text{O}_H^-$ -Lage Proben gewonnen. Jeweils 5 Proben bildeten eine Mischprobe. Je Parzelle wurden im Winterhalbjahr 1986/87 und 1988/89 eine, 1989/90 zwei Mischproben gewonnen und nach Veraschung chemisch analysiert.

Aus den Mineralbodenhorizonten  $A_h$ ,  $B_v$  und  $B_v C_v$  wurden mit dem Wurzelbohrer nach MURACH (1984) ebenfalls jeweils im Winterhalbjahr 1986/87 und 1988/89 je Parzelle 5, 1989/90 10 Bodensäulen entnommen. Jeweils 5 Einzelproben wurden horizontweise getrennt zu Mischproben vereinigt. Die pH-Werte wurden in Wasser und in  $\text{CaCl}_2$  gemessen. Die effektive Kationenaustauschkapazität mit den Kationen H, Al, Fe, Mn, Na, K, Ca und Mg, sowie  $N_t$ ,  $P_t$ ,  $C_t$  und der Glühverlust wurde nach den von MEIWES et al. (1984) beschriebenen Metho-

den bestimmt. Die Analysen führten z.T. das Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen, z.T. das Institut für Bodenökologie und Umweltbewertung, Bohlßen, durch.

Zur Vorratsberechnung wurden die Stärken der Humushorizonte an 10 Rasterpunkten je Variante gemessen. Über die Bestimmung der Trockenraumdichte an in Stichzylindern gewonnenen, ungestörten Bodenproben und nach Schätzung des Skelettanteiles wurde die Feinbodenmenge je ha berechnet (Methode in: BUNDESMINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 1990).

Die Düngemittelanalysen führte die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer durch. Reaktivitätsuntersuchungen erfolgten nach der von SAUERBECK und RIETZ (1985a) beschriebenen Methode.

Im Rahmen der Waldschadenserhebungen 1983 und 1984 erfolgte in dem Fichtenbestand eine Schadansprache im Hinblick auf die neuartigen Waldschäden. Diese Schadansprache wurde von einem eigens für das Sondermeßprogramm Wald geschulten Trupp gemäß der geltenden Richtlinien durchgeführt (SCHRÖTER et al., 1984). Danach galt der Bestand als leicht erkrankt (Tab. 1, im Anhang).



### 3 ERGEBNISSE

#### 3.1 Charakterisierung der Neutralisationskapazitäten und -raten der verwendeten Gesteinsmehle in Laboruntersuchungen

Ziel des Linzer Versuches ist ein Wirkungsvergleich der sehr unterschiedlichen feinvermahlenden Gesteinsmehle:

- Dolomit in der Mahlfineinheit 0 - 0,09 mm,
- mit Magnesium angereichertes silikatisches Gesteinsmehl und
- silikatisches Gesteinsmehl in der Mahlfineinheit 0 - 0,06 mm.

Die beiden erstgenannten Gesteinsmehle entsprechen folgenden zugelassenen Düngemitteltypen gemäß Düngemittelrecht:

- kohlenaurer Magnesiumkalk (Kalk und Magnesiumdünger),
- Magnesiumgesteinsmehl (Magnesiumdünger).

Das silikatische Gesteinsmehl ist als Bodenhilfsstoff einzustufen (DüngemittelVO vom 19.12.1977, zuletzt geändert am 24.6.1988). Die Inhaltsstoffe der Gesteinsmehle gehen aus Tab. 2 (Anhang) hervor (Analyse der LUFA Speyer).

Die Magnesiumanreicherung des erstgenannten Gesteinsmehles erfolgt durch gebrannten Magnesit.

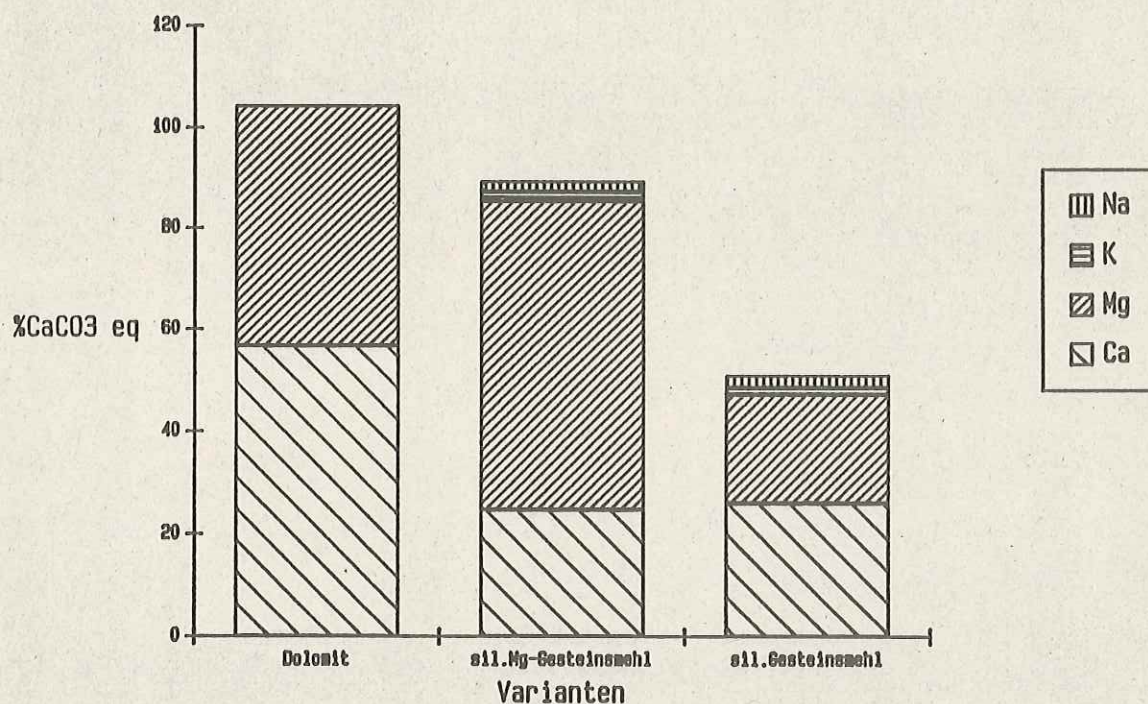
Die relativ hohen Aluminiumgehalte in den Gesteinsmehlen werfen die Frage nach deren pflanzlichen Verfügbarkeit auf. Eine Analyse der Austauschbelegung bei den Gesteinsmehlen (Methode nach MEIWES et al., 1984) zeigt jedoch, daß dieses Element fest in die Kristallgitter der Minerale eingebunden ist (Tab. 3, im Anhang).

Der verwendete Dolomit ist ein devonischer Massenkalk, dessen Calcium- und Magnesiumanteile in karbonatischer Bindung vorliegen. Die silikatischen Gesteinsmehle sind beide vulkanische Lavagesteine mit folgendem Mineralbestand (Analysen durch das Büro für geologische und mineralogische Beratung BUTZ-BRAUN, Rauischholzhausen):

- 10 % Magnetit,
- 80 % Pyroxene der Diopsid-Hedenbergit-Reihe und
- 10 % Glimmer (wahrscheinlich Biotit).

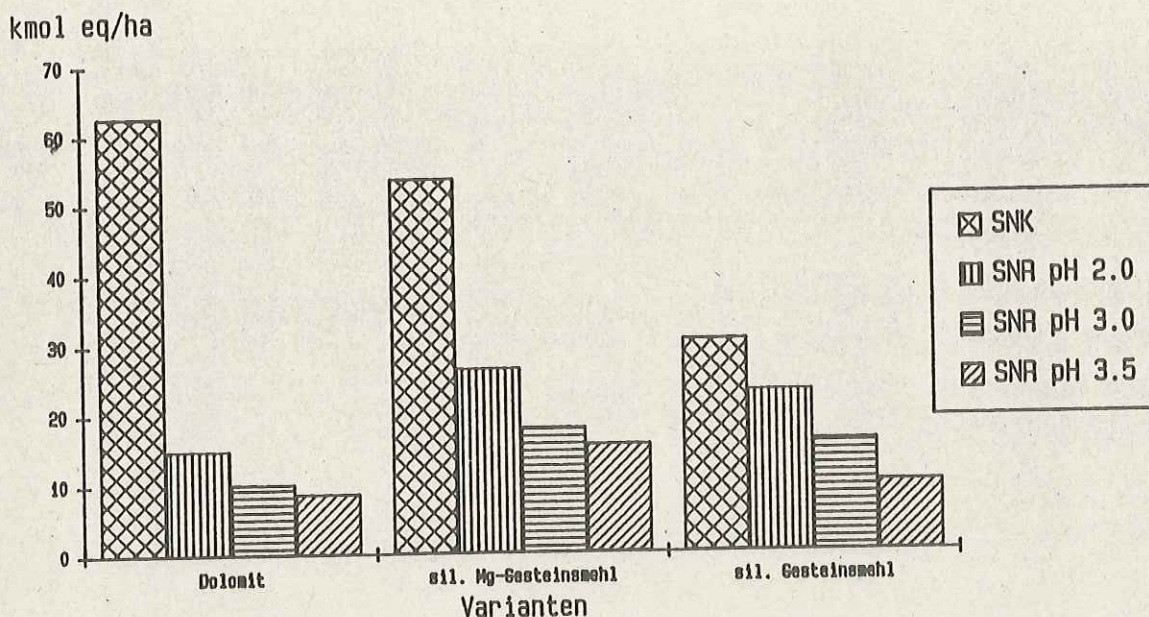
Rechnet man die basisch wirksamen Stoffe in %-CaCO<sub>3</sub>-Äquivalente um, so ist es möglich, diese, obwohl in unterschiedlicher chemischer Bindung vorliegend, miteinander zu vergleichen (Tab. 4, im Anhang).

Abb. 3: Basische Inhaltsstoffe in den Gesteinsmehlen



Aus Abb. 3 geht hervor, daß Dolomit den höchsten Gehalt an basisch wirksamen Stoffen besitzt. Bei einer Ausbringungsmenge von 3 to/ha lassen sich diese Anteile in eine potentielle Säureneutralisationskapazität (Abb. 4) von über 60 kmol eq/ha umrechnen.

Abb. 4: Basische Wirksamkeit der Gesteinsmehle



SNK = Säureneutralisationskapazität

SNR = Säureneutralisationsrate

Das silikatische Magnesium-Gesteinsmehl bezieht seine Säureneutralisationskapazität im wesentlichen aus den hohen Anteilen an Magnesiumoxid. Dennoch besitzt es bei gleicher Ausbringungsmenge eine um ca. 10 kmol eq/ha verminderte Säureneutralisationskapazität gegenüber Dolomit. Die Säureneutralisationskapazität des nicht angereicherten silikatischen Gesteinsmehls ist weniger als halb so groß im Vergleich zum Dolomit. Die aus der Reaktivität berechneten Säureneutralisationsraten zeigen dagegen eine Überlegenheit der Gesteinsmehle an (Abb. 4). Die Säureneutralisationsrate, insbesondere bei den Gesteinsmehlen, wird im wesentlichen durch den hohen Vermahlgrad bestimmt. Es ist jedoch zu beachten, daß die Reaktivität und damit die Säureneutralisationsrate ein konventioneller Labormaßstab zur Bewertung der Lösungsgeschwindigkeit karbonatischer Kalke sind (HENZE, 1987). Diese kann keinesfalls auf die chemischen Vorgänge in Waldböden übertragen werden, da sie im wesentlichen von der Art der im Ökosystem vorhandenen Säuren und von deren Säurestärken abhängen.

### 3.2 Auswirkungen der Gesteinsmehle auf die Humusaufgabe und den Mineralboden

Die humusmorphologischen Aufnahmen belegen, daß insbesondere der Humus in den mit Dolomit behandelten Flächen stärker mineralisiert wird (Abb. 5; Tab. 5, im Anhang). Bei dieser Variante findet ein beschleunigter Abbau der  $O_L$ - und der  $O_F$ -Lage statt (Abb. 6). Hinweise auf diese beschleunigten Zersetzungsprozesse ergeben sich auch bei Betrachtung der Kohlenstoffvorräte in der Humusaufgabe (Abb. 7; Tab. 6, im Anhang). Diese sind auf der Dolomitfläche gegenüber der Nullfläche um etwa die Hälfte vermindert. Auch auf den zu den übrigen Parzellen nicht vergleichbaren Varianten "Null(8)" und "Dolomit (7)" zeigt sich hinsichtlich des Kohlenstoffvorrates in der organischen Auflage eine ähnliche Reaktion. Parallel zur Entwicklung der Kohlenstoffvorräte nehmen auch die Stickstoff- (Abb. 8; Tab. 7, im Anhang) und Phosphorvorräte (Abb. 9; Tab. 8, im Anhang) in der organischen Auflage ab.

Abb. 5: Humusvorrat nach einer 4-jährigen Laufzeit des Versuches

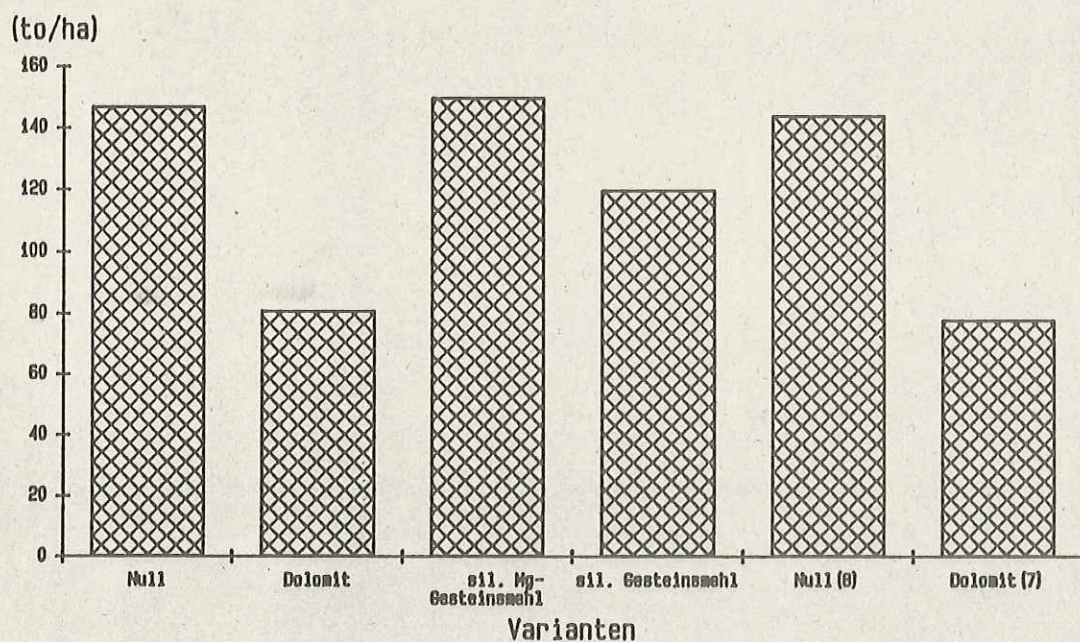


Abb. 6: Stärke der Auflageschichten im Humusprofil nach einer 4-jährigen Laufzeit des Versuches

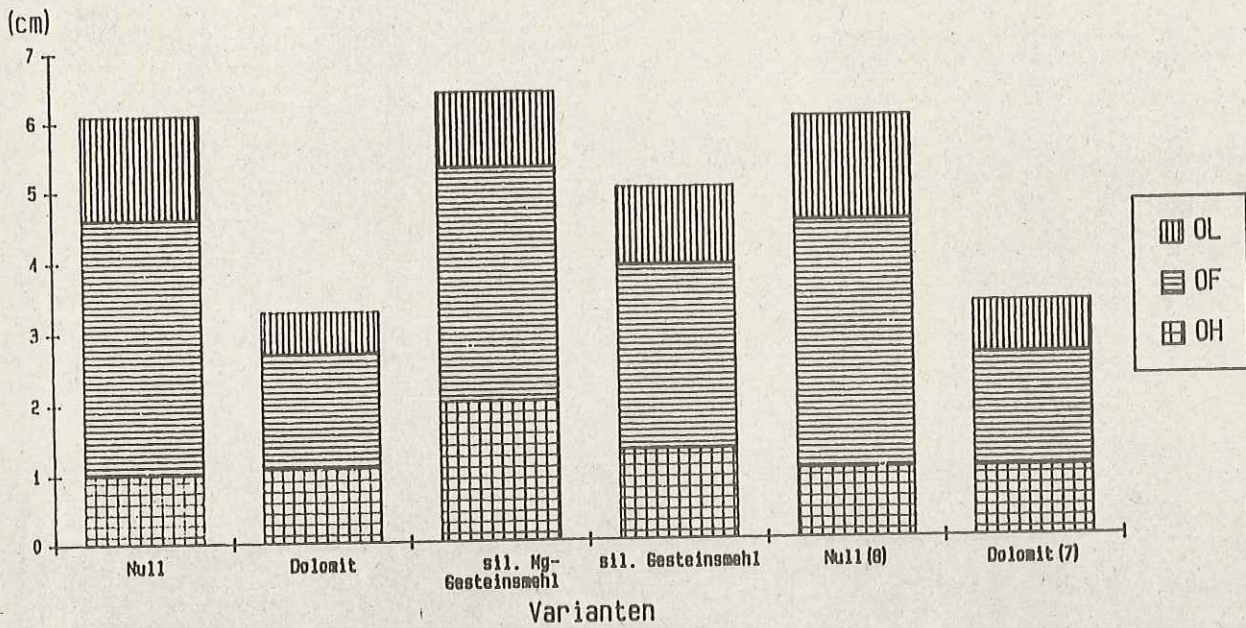


Abb. 7: Kohlenstoffvorräte zum Zeitpunkt der Beprobung im Winter 1989/90

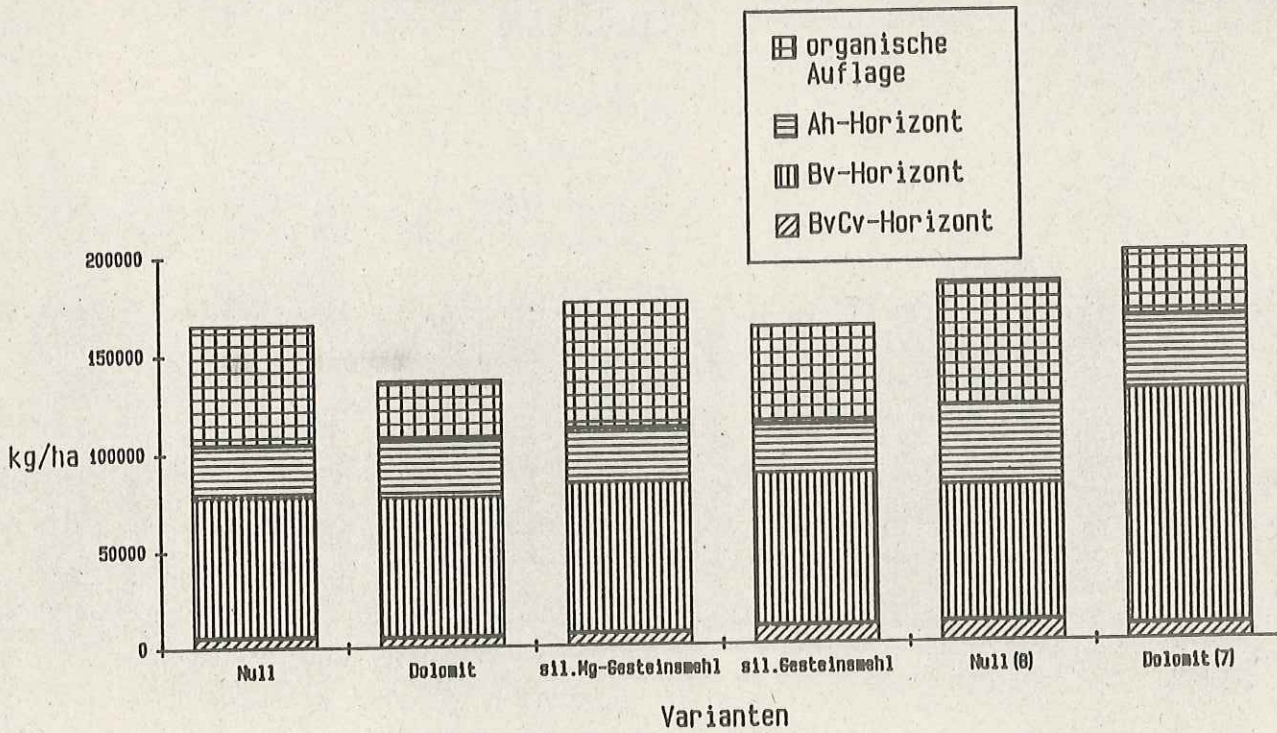


Abb. 8: Gesamtstickstoffvorräte zum Zeitpunkt der Beprobung im Winter 1989/90

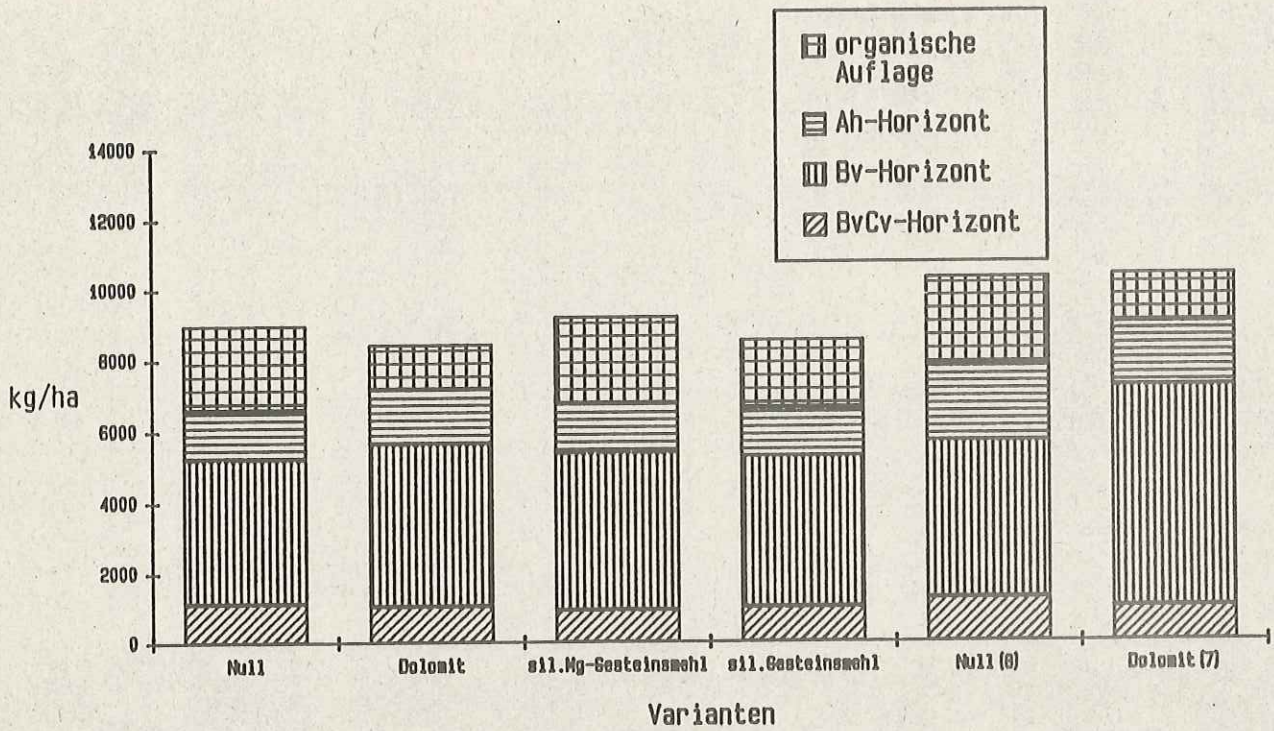
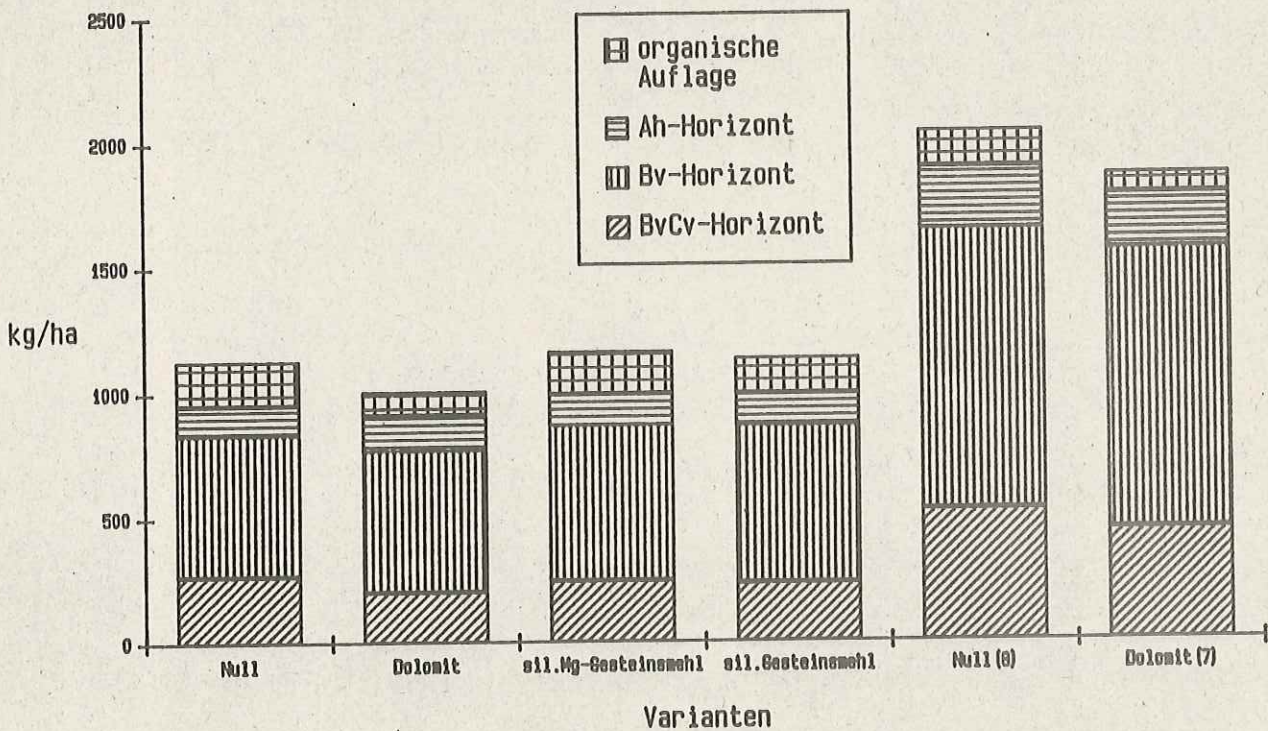


Abb. 9: Gesamtphosphorvorräte zum Zeitpunkt der Beprobung im Winter 1989/90

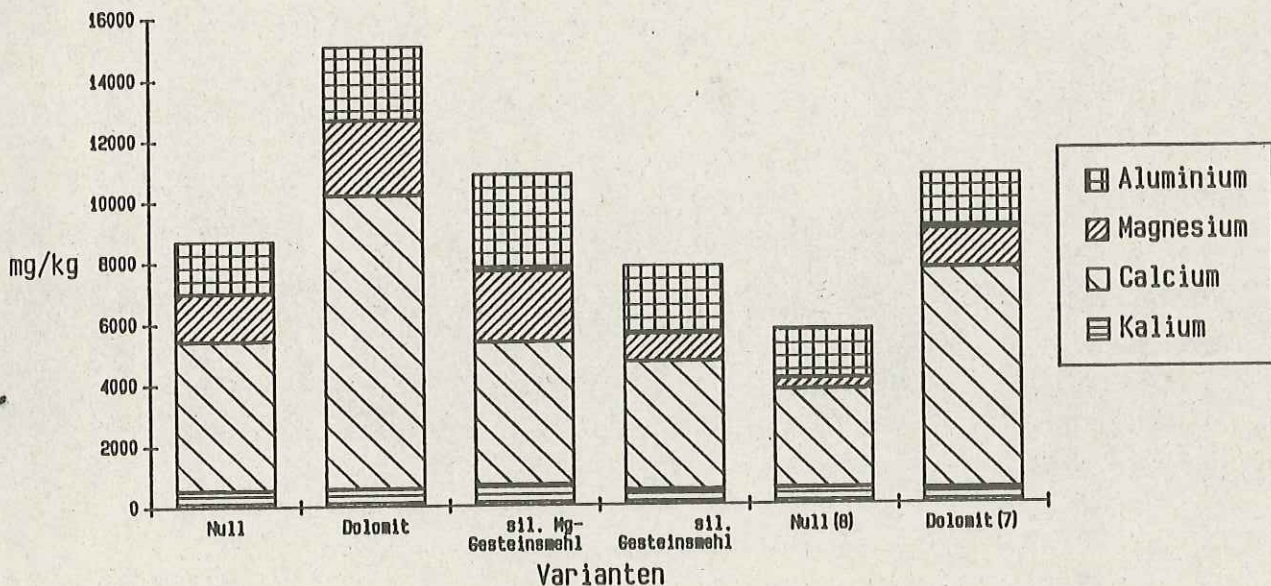


Wegen der gleichlaufenden Vorratsveränderungen im Humus bezüglich der Elemente Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor zeigen sich kaum Unterschiede beim C/N, bzw. C/P-Verhältnis (Tab. 9 und 10, im Anhang). Moderater wirken in dieser Hinsicht die Gaben mit silikatischen Gesteinsmehlen.

Die Ansprache der Humusstruktur bezüglich der Lagerungsart der H- und F-Lagen, sowie der Begrenzungsschärfen der Übergänge der Humusaufgaben zueinander deuten in der Dolomitparzelle auf eine positive Entwicklung vom rohhumusartigen bis typischen Moder zu einem mehr mullartigen Moder hin.

Aufgrund der großen Streuung der Einzelwerte läßt sich trotz der positiven, aber subjektiven Einschätzung der Humusform nach fast vier Jahren auf keiner behandelten Parzelle mehr eine Elementanreicherung im Humus (Abb. 10), beispielsweise mit Calcium oder Magnesium, statistisch nachweisen (Tab. 11, im Anhang).

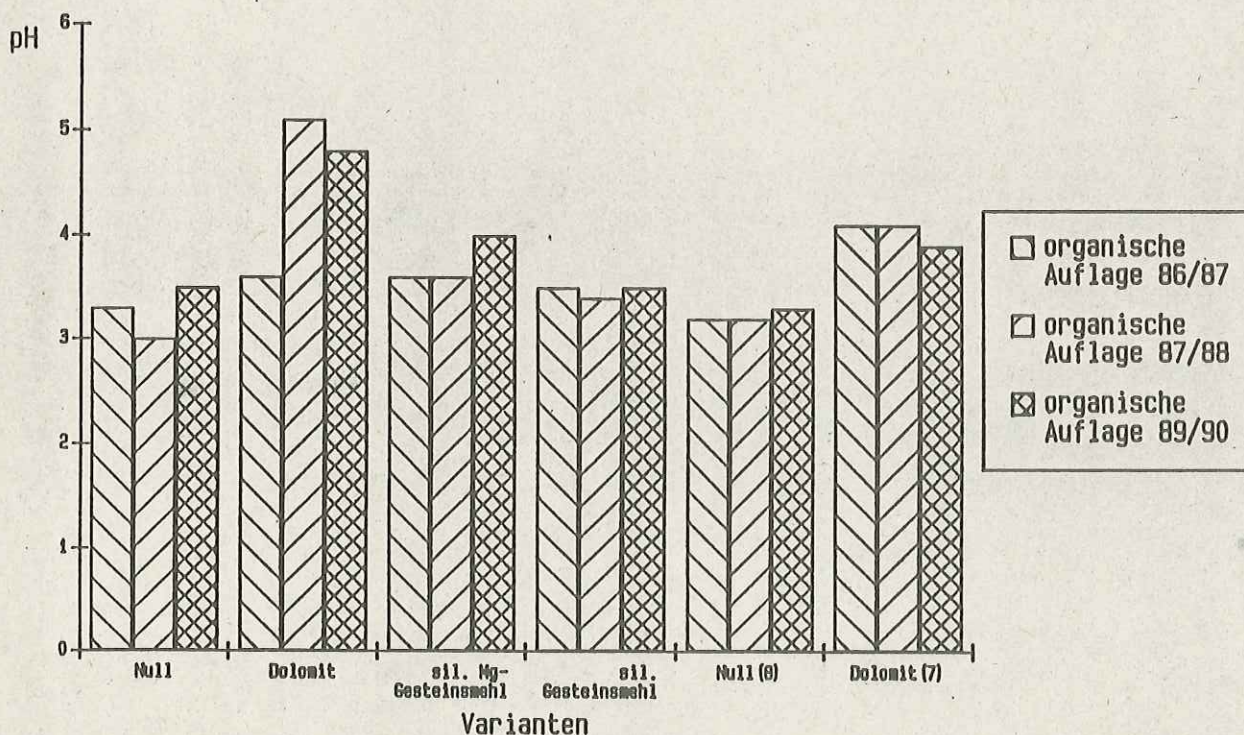
**Abb. 10: Elementgehalte der organischen Auflage zum Zeitpunkt der Probennahme im Winter 1989/90**



Auch die C/Ca-Verhältnisse sind nicht eindeutig verbessert, wohingegen die C/Mg-Verhältnisse insbesondere nach Dolomitausbringung aber auch nach Ausbringung des angereicherten Gesteinsmehles eindeutig enger werden, also sich zum Positiven entwickeln (Tab. 12, im Anhang).

Der erhöhte Aluminiumgehalt im Humus beider silikatischer Gesteinsmehlvarianten (Tab. 11, im Anhang) läßt sich durch deren geogene Bestandteile erklären. Das hier enthaltene Aluminium muß jedoch, wie bereits dargelegt (Tab. 3, im Anhang), nicht sofort pflanzenverfügbar, sondern kann zumindest vorerst noch fest in die Mineralgitter der Silikate eingebunden sein. Über die Freisetzung des Aluminiums nach der Zerstörung der Silikate ergeben sich aus unseren Versuchsergebnissen keine Anhaltspunkte. Die in Tab. 11 (im Anhang) gezeigten Ergebnisse sind aufgrund ihrer Analysenmethode pflanzenphysiologisch weniger bedeutsam.

Abb. 11: pH-Werte ( $\text{CaCl}_2$ ) in der organischen Auflage der Versuchsvarianten





Eine positive Entwicklung zeichnet sich bei der Basensättigung der behandelten Parzellen ab. Im  $A_h$ -Horizont der Dolomitfläche verbessert sie sich relativ rasch von ca. 7 % auf 16 % nach 1 1/2 Jahren und auf nahezu 34 % nach 3 1/2 Jahren. In nur geringerem Ausmaß verläuft die Entwicklung auf der Fläche mit silikatischem Gesteinsmehl mit Magnesit. Nach 3 1/2 Jahren wird die Basensättigung lediglich auf Werte von etwas über 13 % angehoben. Auf der Fläche mit silikatischem Gesteinsmehl ohne Magnesit ist die Steigerung noch geringer, aber doch nachweisbar (Abb. 13; Tab. 15, im Anhang).

Im  $B_v$ -Horizont sind die Steigerungsgradienten weniger ausgeprägt. In der silikatischen Gesteinsmehlfläche mit Magnesit verbessert sich die Basensättigung 1 1/2 Jahre nach der Ausbringung kurzfristig stärker. Dieser Prozess läßt 2 Jahre später schon wieder nach (Abb. 13; Tab. 15, im Anhang).

Auch im  $B_v C_v$ -Horizont ist eine ähnliche Entwicklung, wenn auch nur sehr schwach ausgeprägt, zu verfolgen (Abb. 13; Tab. 15, im Anhang).

Die Basensättigung der Parzellen am Nordhang (Tab. 15, im Anhang), insbesondere von Variante "Null(8)", zeigen überraschenderweise im  $A_h$ -Horizont einen deutlichen Anstieg. Dies läßt sich allenfalls durch Oberflächenabfluß oder Interflow aus den oberhalb liegenden behandelten Parzellen erklären. Die Steillage hat hier offensichtlich zu einer Beeinflussung der Flächen geführt.

Die Änderung der Basensättigung nach Dolomit- und Gesteinsmehlbehandlung wird wesentlich durch die Anlagerung der beiden Elemente Calcium und Magnesium (Tab. 16 und 17, im Anhang) verursacht, wie den Abb. 14 und 15 entnommen werden kann. In der Parzelle mit dem angereicherten silikatischen Gesteinsmehl ist die Verbesserung der Magnesiumversorgung bis in tiefere Bodenhorizonte bestimmend (Tab. 16 und 17, im Anhang).

Abb. 14: Austauschbares Calcium im Mineralboden der Versuchsvarianten

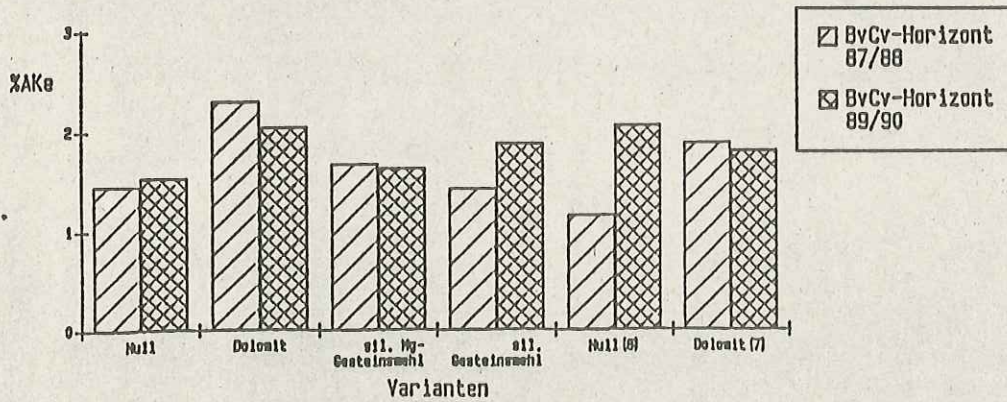
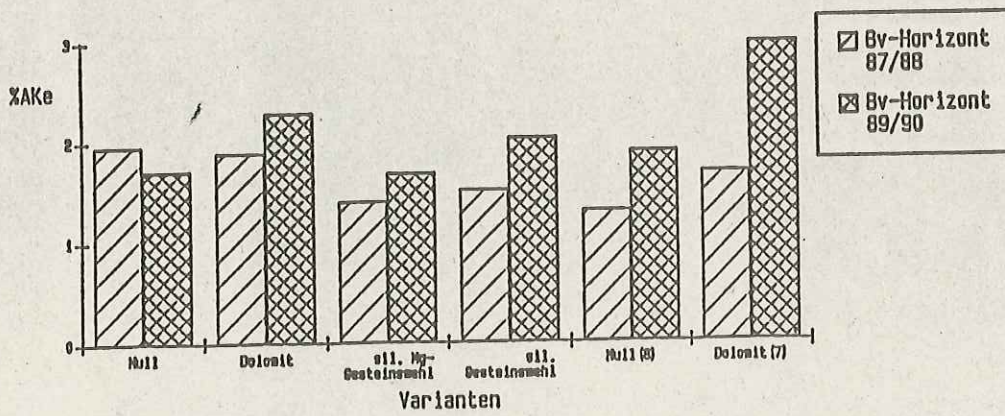
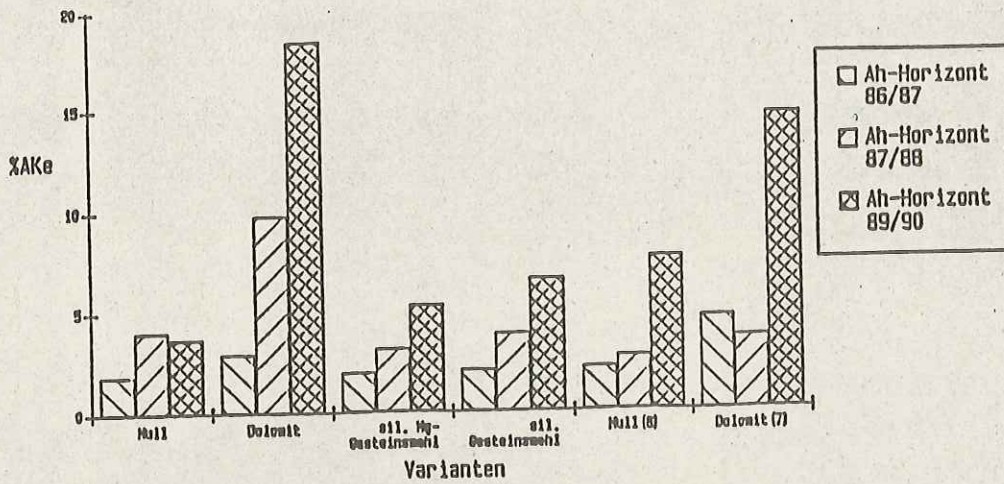
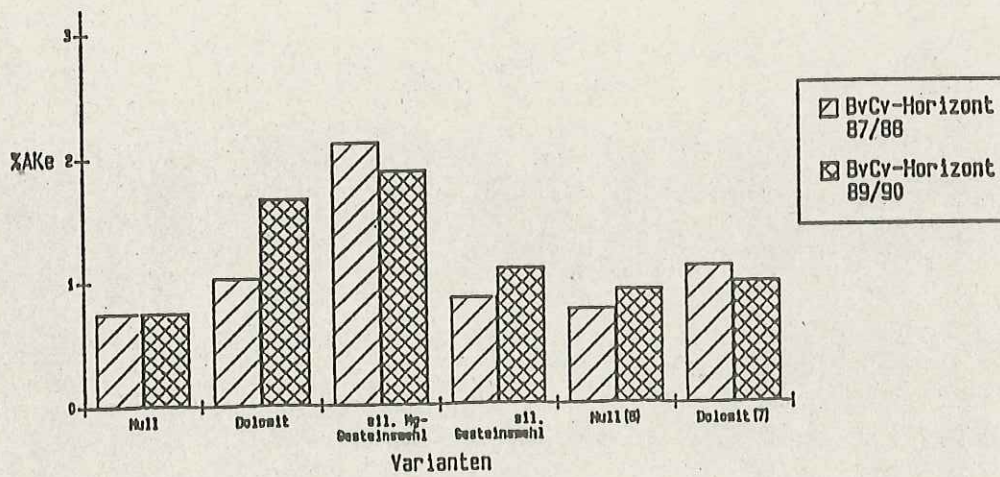
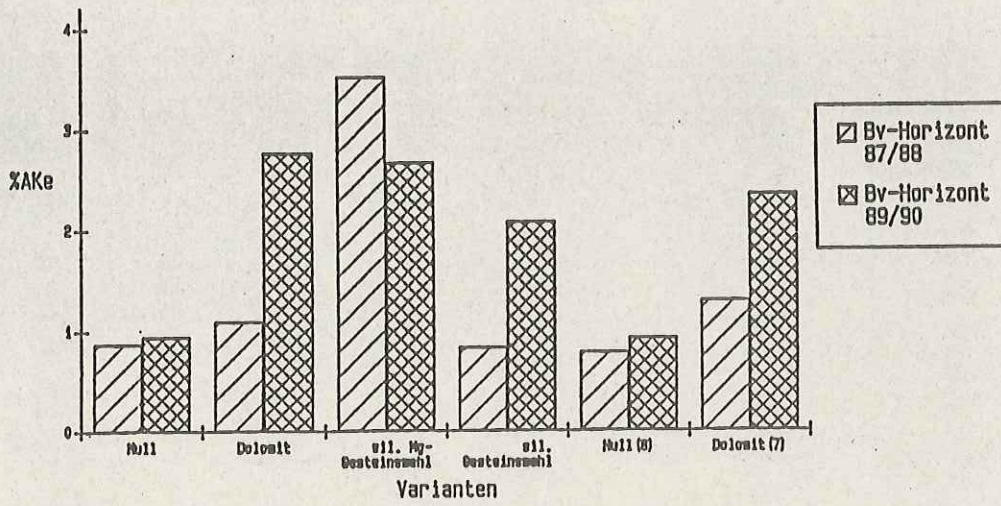
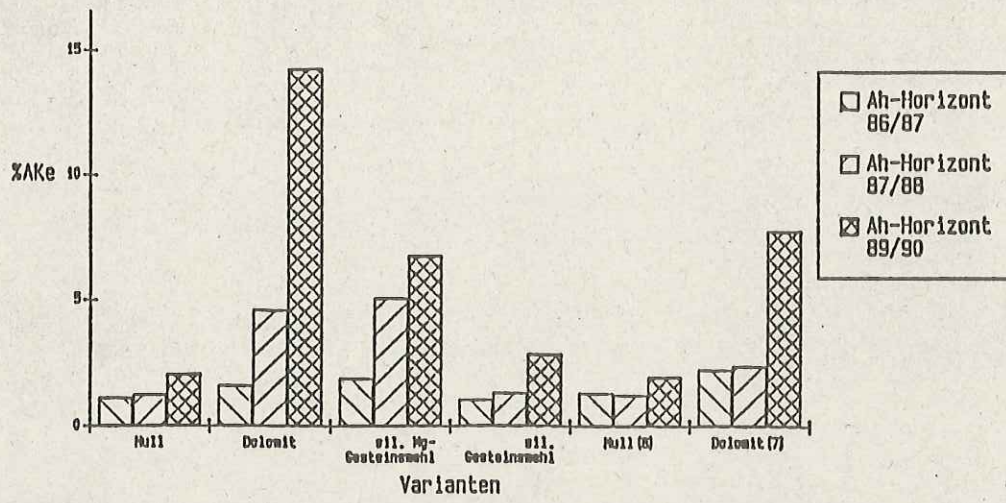
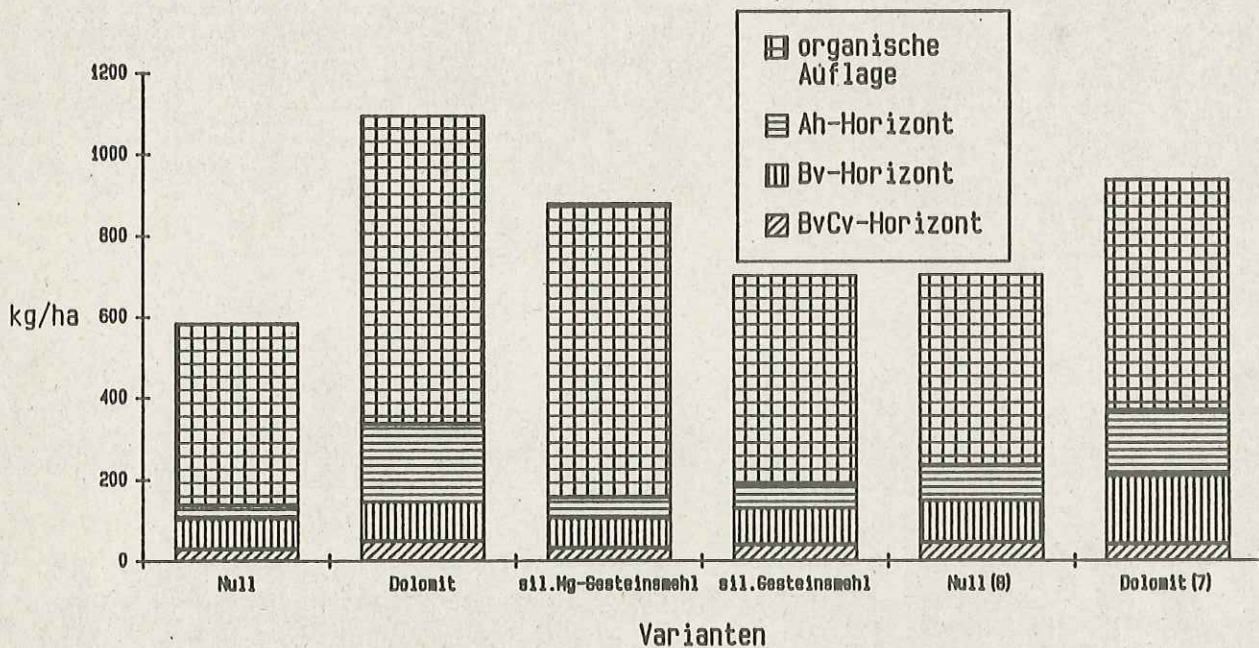


Abb. 15: Austauschbares Magnesium im Mineralboden der Versuchsvarianten



Der pflanzenverfügbare Calciumvorrat (Abb. 16; Tab. 19, im Anhang) wird durch die Dolomitausbringung bis in den  $B_V C_V$ -Horizont vergrößert.

Abb. 16: Calciumvorräte in der organischen Auflage und im Mineralboden der Versuchsvarianten zum Zeitpunkt der Probennahme im Winter 1989/90



Setzt man die Vorräte zu den mit dem Dolomit ausgebrachten Elementmengen (Tab. 18, im Anhang) in Relation, so befinden sich nach fast 4 Jahren noch ca. 46 % des ausgebrachten Calciums in der organischen Auflage, 23 % im  $A_h$ -Horizont, 4 % im  $B_V$ -Horizont und ca. 3 % im  $B_V C_V$ -Horizont. Ungünstiger stellt sich die Vorraterhöhung in der Steillage (Parzelle "Dolomit(7)") dar. Möglicherweise verlagert sich das sehr feine Material oberflächlich.

Im gleichen Zeitraum beschränkt sich die - statistisch nicht absicherbare - Vorraterhöhung an Calcium nach Ausbringung des silikatischen Gesteinsmehles mit Magnesit fast ausschließlich auf die organische Auflage (92 %).

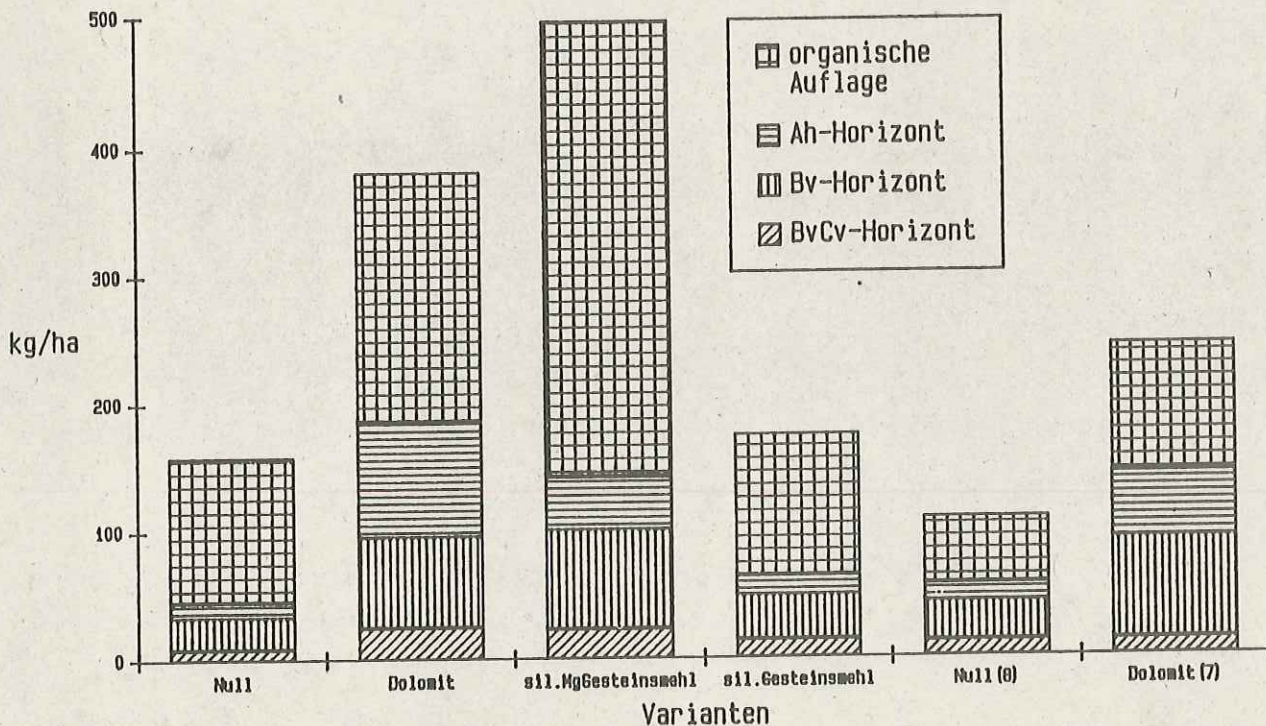
Auch in den Flächen mit dem silikatischen Gesteinsmehl ohne Magnesit befinden sich nur 16 % des ausgebrachten Calciums im durchwurzelten Mineralboden (Abb. 16; Tab. 19, im Anhang).

Der Magnesiumvorrat (Abb. 17; Tab. 20, im Anhang) nimmt sowohl in der Dolomitfläche als auch in der Fläche mit silikatischem Gesteinsmehl mit Magnesit bis in die unteren durchwurzelten Mineralbodenhorizonte stark zu.

Das Magnesium aus dem dem silikatischen Gesteinsmehl zugefügten gebrannten Magnesit ist leicht löslich und schnell verfügbar. Gleichzeitig werden bestimmte Anteile rasch in die Tiefe verlagert, wobei sich dies bodenchemisch nur relativ kurz auswirkt. Nachhaltiger ist jedoch die Zufuhr von Magnesium über den Dolomit (Abb. 15).

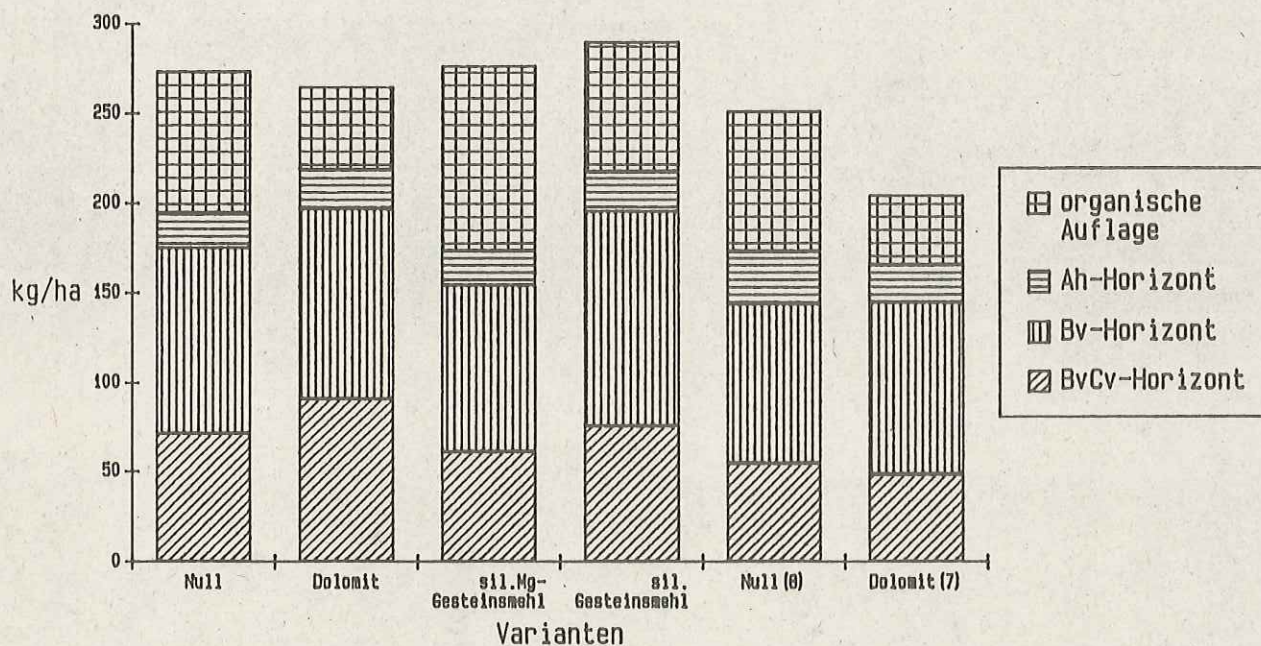
Entsprechend des geringeren Gehaltes und der geringen Lösungsrate erhöht sich in der Fläche mit silikatischem Gesteinsmehl ohne Magnesit der Magnesiumvorrat im Mineralboden nur geringfügig.

Abb. 17: Magnesiumvorräte in der organischen Auflage und im Mineralboden der Versuchsvarianten zum Zeitpunkt der Probennahme im Winter 1989/90



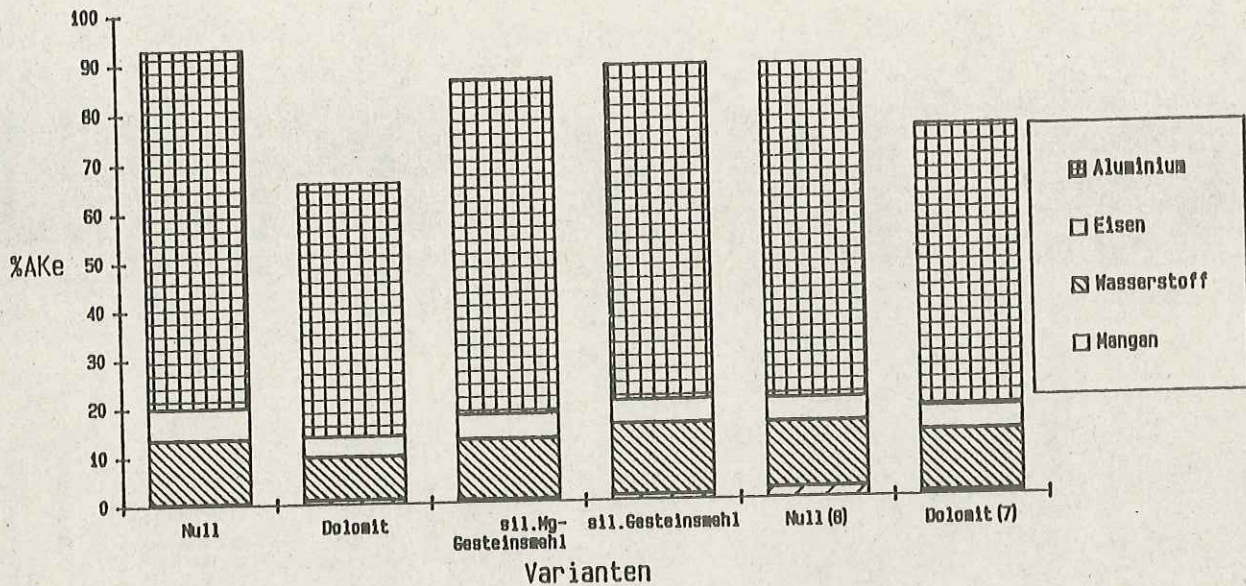
Der Vorrat an pflanzenverfügbarem Kalium erhöht sich im Mineralboden bei keiner Variante - auch nicht nach Gesteinsmehlausbringung - deutlich (Abb. 18; Tab. 22, im Anhang).

**Abb. 18: Kaliumvorräte in der organischen Auflage und im Mineralboden der Versuchsvarianten zum Zeitpunkt der Probennahme im Winter 1989/90**



Wie die Austauscherbelegung mit Kationsäuren im  $A_h$ - und  $B_v$ -Horizont ausweist (Abb. 19; Tab. 22, im Anhang), wird in der Dolomitparzelle insbesondere Aluminium von den Bodensorbentien verdrängt. In den silikatischen Gesteinsmehlflächen beschränkt sich dieser Vorgang im wesentlichen auf den Austausch von Kationbasen gegen Aluminium im  $A_h$ -Horizont, wobei jedoch eine eindeutige Absenkung der Aluminiumbelegung ausgebleibt. Entsprechend der Entwicklung der Basensättigung gibt es keine deutliche Veränderung hinsichtlich der Kationsäurebelegung in den tieferen Mineralbodenhorizonten.

Abb. 19: Kationsäurebelegung im  $A_h$ -Horizont der Versuchsvarianten zum Zeitpunkt der Probennahme im Winter 1989/90



### 3.3 Auswirkungen der Gesteinsmehlgaben auf die Nährelementversorgung der Fichten

Die Stickstoffversorgung (Abb. 20; Tab. 23, im Anhang) des jüngsten Nadeljahrganges verbessert sich fast 4 Jahre nach der Dolomitausbringung deutlich. Die anderen Gesteinsmehlarten haben keine entsprechenden Effekte zur Folge. Die beiden Varianten in der Steillage (Null(8) und Dolomit(7)) weisen insgesamt eine geringere Stickstoffversorgung auf. Möglicherweise ist dies eine Folge von geringeren Nitrifikationsraten am Nordhang bei gleichzeitig größerem Oberflächenabfluß und höherer Flachgründigkeit und damit bei einem potentiell geringeren Nährstoffangebot. Die höheren Gesamtstickstoffvorräte im Boden der Steillageparzellen (Abb. 8) scheinen zu bestätigen, daß der Stickstoffpool hier nicht voll ausgenutzt wird.

Die Phosphorversorgung ist bei fast allen Varianten normal. Lediglich in der Variante "Null(8)" in der Steillage werden die Bäume mangelhaft versorgt. Auch hier deuten höhere Gesamtphosphorvorräte in den Steillageparzellen (Abb. 9) darauf hin, daß nicht pflanzenverfügbare Phosphorformen vorliegen.

Calciummangel gibt es in keiner Variante, auch nicht in den Nullflächen. Auf den Dolomitflächen verbessert sich die Calciumversorgung. Dies zeigt sich insbesondere bei den Spiegelwerten des dritten Nadeljahrganges (Abb. 21). Es ist bekannt (FIEDLER et al. 1973), daß Calcium bei ausreichend pflanzenverfügbarem Vorrat mit höherem Alter der Nadeln in zunehmender Menge eingelagert wird.

Abb. 20: Elementgehalte der Nadeln des 1. Nadeljahrganges zum Zeitpunkt der Probenahme im Winter 1989/90 im Vergleich zur Nullbeprobung 1986

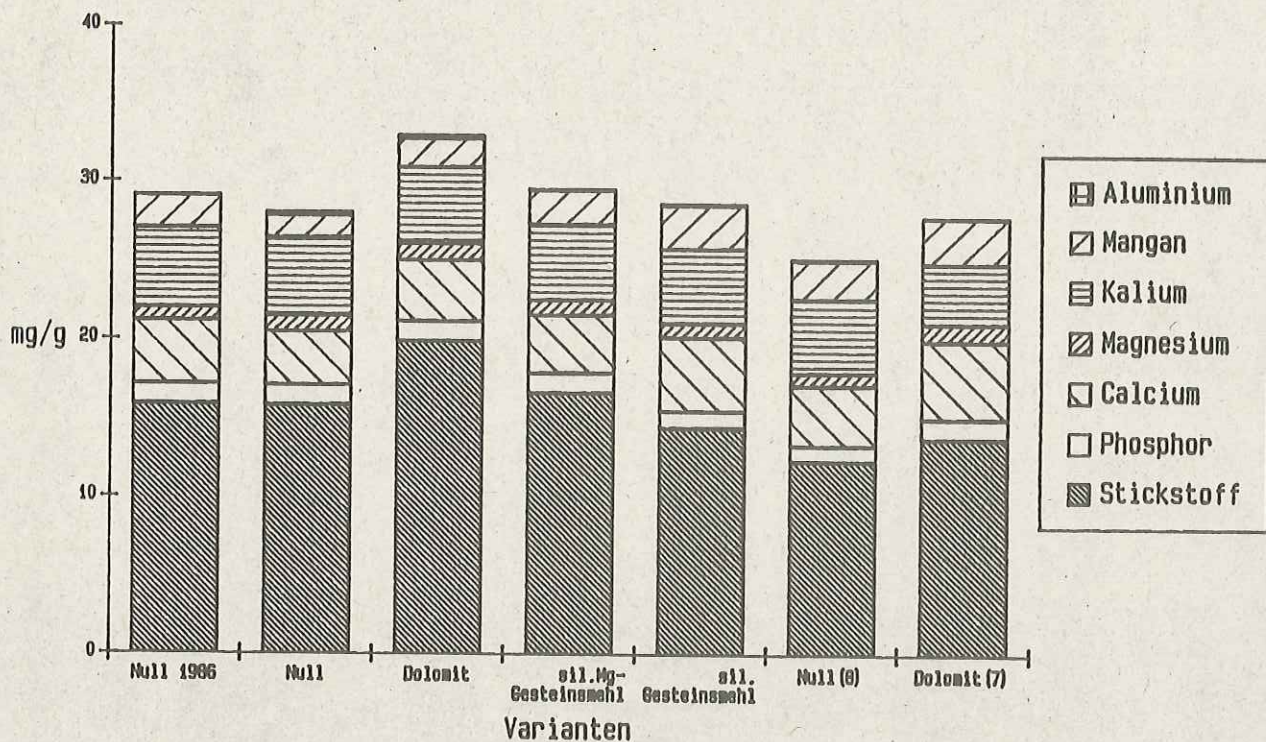
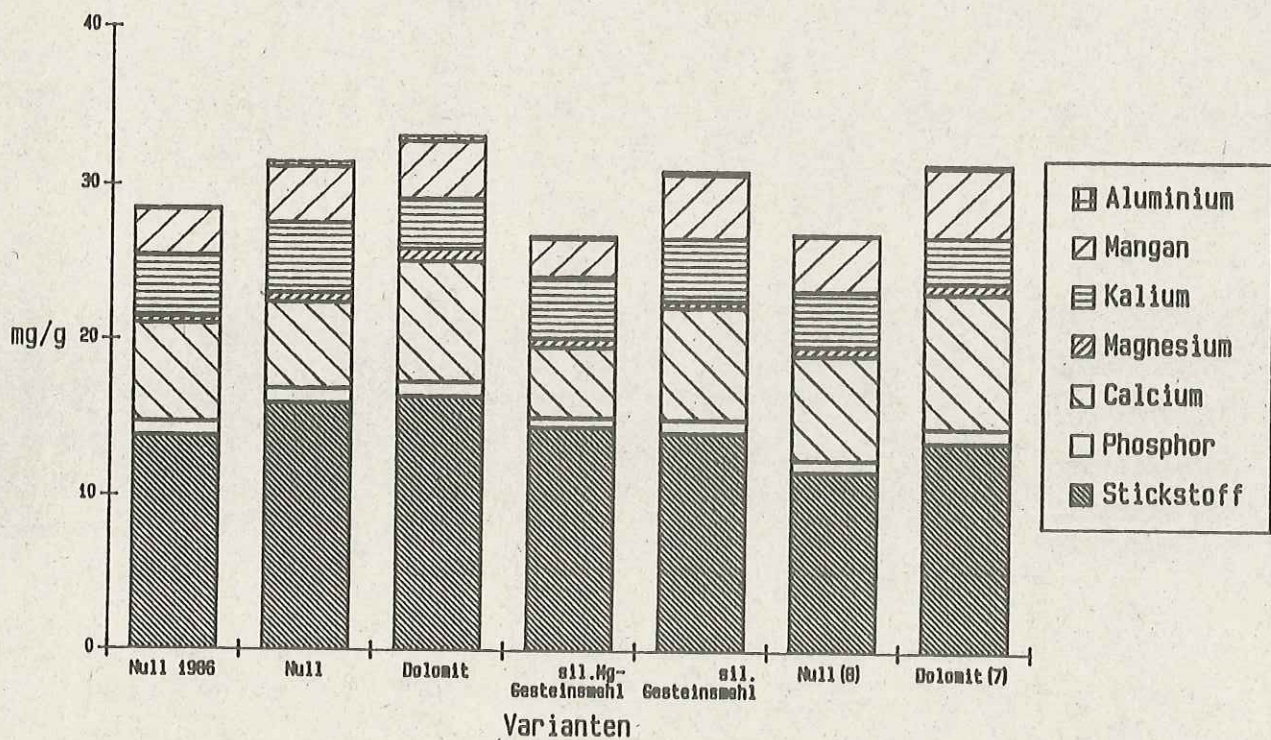


Abb. 21: Elementgehalte der Nadeln des 3. Nadeljahrganges zum Zeitpunkt der Probenahme im Winter 1989/90 im Vergleich zur Nullbeprobung 1986



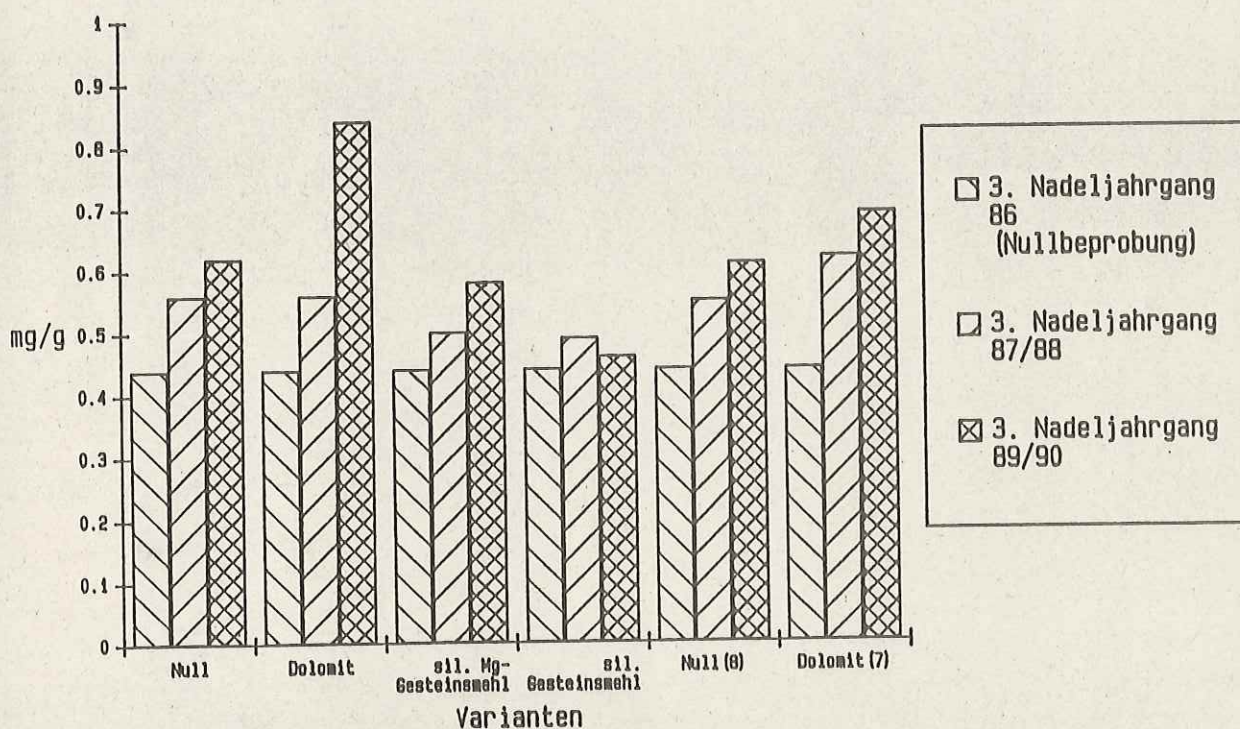


Da durch interne Verlagerungsprozesse Magnesium stets aus den älteren Sprossen in die jüngsten Triebe verlagert wird, kann gerade an den älteren Nadeljahrgängen die Magnesiumversorgung besser beurteilt werden als am zuletzt gebildeten Nadeljahrgang.

Die Fichten der Nullparzellen werden bei Nadelspiegelwerten mit deutlich unter 1 mg Magnesium je g Trockensubstanz nur schwach mit Magnesium versorgt (nach BERGMANN, 1983; VAN DEN BURG, 1985). Die Magnesiumversorgung verbessert sich gegenüber den Nullflächen nur auf den Dolomitflächen bei Betrachtung der Spiegelwerte des dritten Nadeljahrganges (Abb. 22).

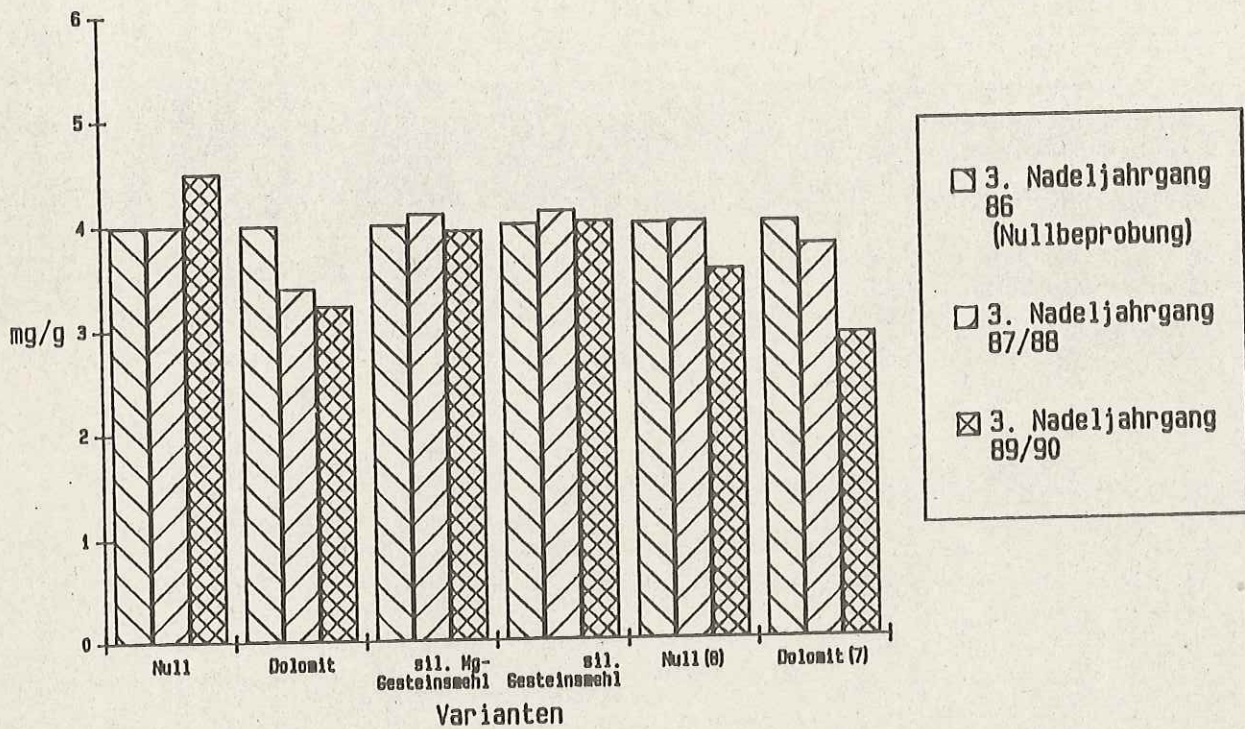
Das verbesserte Magnesiumangebot aus dem silikatischen Gesteinsmehl mit Magnesit wird offensichtlich von den Fichten nicht ausgenutzt.

Abb. 22: Magnesiumgehalt in den Nadeln des 3. Nadeljahrganges



Die Kaliumversorgung aller Fichten ist bei Spiegelwerten unter 5 mg Kalium je g Trockensubstanz schwach (nach BERGMANN, 1983; VAN DEN BURG, 1985). Der aus der Literatur bekannte Kalium-Calcium-Antagonismus (FIEDLER et al., 1973) ist auf den Dolomitflächen zu beobachten, wenn der 3. Nadeljahrgang als Weiser ausgewählt wird (Abb. 23).

Abb. 23: Kaliumgehalt in den Nadeln des 3. Nadeljahrganges



### 3.4 Ansprache der okular erkennbaren Schadsymptome

An den für die chemischen Nadelanalysen gewonnenen Ästen werden okular erkennbare Symptome und Veränderungen beschrieben (Abb. 24-26). Die Streuung der Einzelwerte ist jedoch so groß, daß sich statistisch keine signifikanten Unterschiede herausrechnen lassen (Tab. 24, im Anhang). Auch die Nadelfarbe (Abb. 25 und 26, Tab. 25, im Anhang) läßt keine Rückschlüsse auf Veränderungen hinsichtlich der Gesundheit der Bäume und ihrer Nährelementversorgung zu.

Abb. 24: Geschätzte Benadelungsdichte an den im Winter 1989/90 für chemische Nadelanalysen gewonnenen Ästen

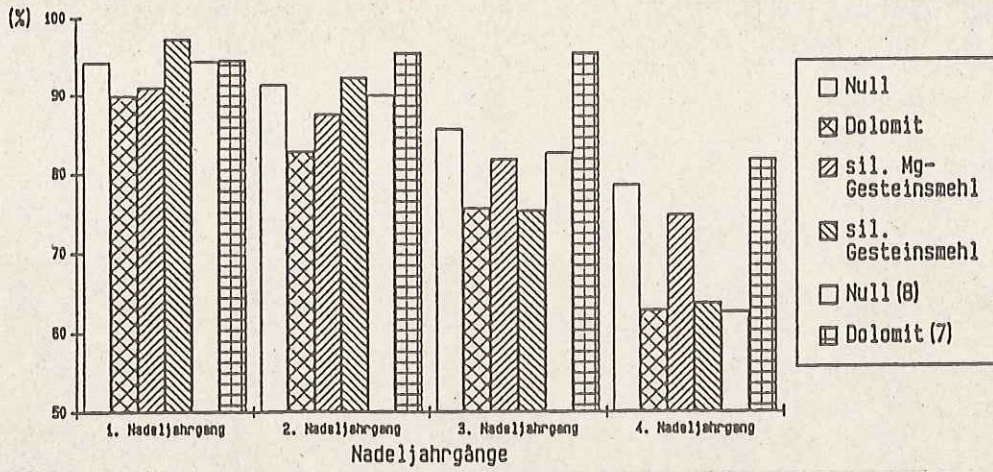


Abb. 25: Farbe der Nadeln an den im Winter 1989/90 für chemische Nadelanalysen gewonnenen Ästen

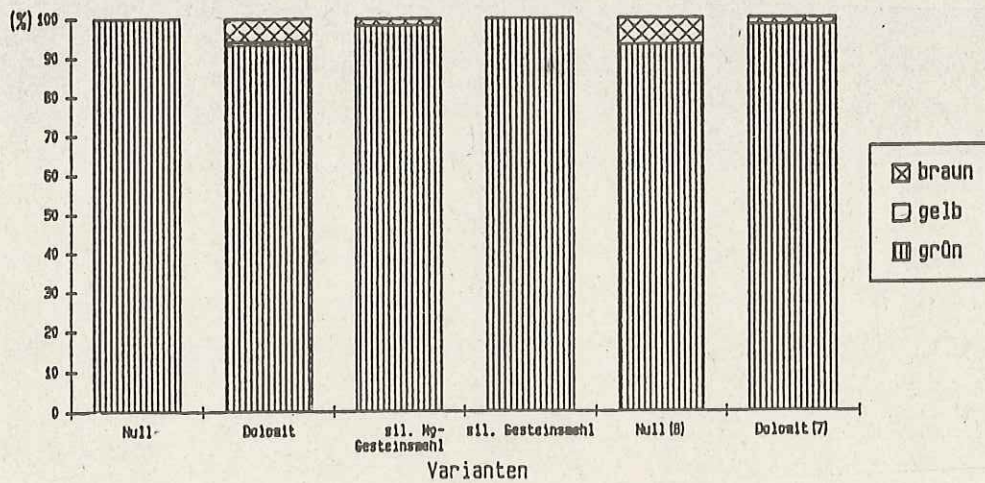
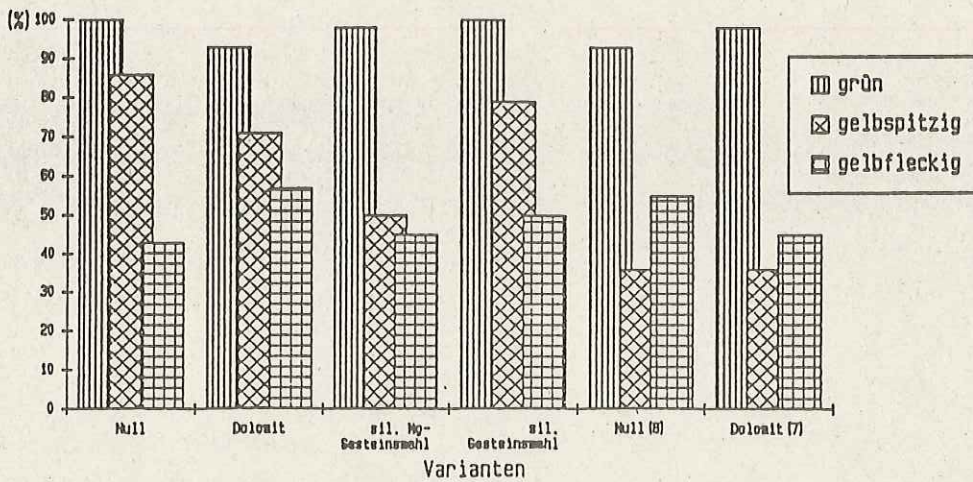
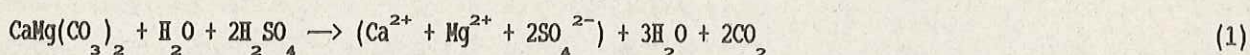


Abb. 26: Farbmerkmale der grünen Nadeln (in % der insgesamt eingeschätzten Nadeln)

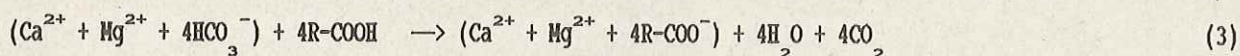
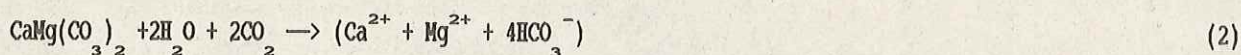


#### 4 DIE EIGNUNG DER DOLOMITISCHEN UND SILIKATISCHEN GESTEINSMEHLE FÜR BODENSCHUTZ-, RESTAURATIONS- UND MELIORATIONSMASSNAHMEN

Bodenschutzmaßnahmen bezwecken die Abpufferung mineralischer Säuren aus Luftschadstoffen in Waldökosystemen. Bei der Einbringung von Dolomit als Puffersubstanz läuft nach BE-ESE (1989) folgende Reaktion ab (hier dargestellt am Beispiel von Schwefelsäure als zu neutralisierende mineralische Säure):



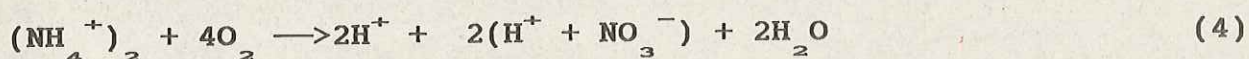
Die mineralische Säure wird dabei neutralisiert. Das entstehende Neutralsalz wird in dissoziierter Form mit dem Sickerwasser in die Tiefe verlagert. Dabei werden in der unmittelbaren Reaktionsumgebung Säurestärken abgemildert, ersichtlich am steigenden pH-Wert in der organischen Auflage. Im Mineralboden finden Austauschprozesse der Kationbasen Calcium und Magnesium gegen Kationsäuren, wie Aluminium und Eisen, statt, mit der Folge von momentanen Säureausträgen in tiefere Mineralbodenbereiche, wie es auch MARSCHNER (1990) in Kalkungs- und Düngungsversuchen gezeigt hat. Durch diese Vorgänge lassen sich zum einen die Steigerung der Basensättigung im oberen Mineralbodenhorizont und die anhaltend tiefen pH-Werte in den unteren Horizonten des hier beschriebenen Versuches erklären. Gleichzeitig neutralisiert Dolomit auch organische Säuren in der Humusauflage (nach HILDEBRAND, 1990):



In dem veränderten, die mikrobielle Aktivität begünstigenden, chemischen Milieu wird die Humusmineralisierung beschleunigt, und Nitrifikationsprozesse werden stimuliert. Der so durch die Kalkung ausgelöste Humusvorratsabbau (vgl. Tab. 5) entspricht nach knapp 4 Jahren ca. 45 % des in der Nullfläche vorgefundenen Humusvorrates. Ähnliche Prozesse hat MARSCHNER (1990) beschrieben, wobei in dessen Versuchen hochreaktive, leicht lösliche Kreidekalle dafür verantwortlich waren. In unserem Versuch basiert die hohe Reaktivität des Dolomites auf einer Feinvermahlung bis 0,09 mm Größtkorn. Dolomite mit diesem Vermahlgrad sind die praxisübliche Verblaseware, die von erdgebundenen Fahrzeugen ausgebracht werden. Die Ausbringung feinstvermahlener Dolomite ist also mit Gefahren verbunden, zumal

es beim Verblasen zu bedenklichen, verfahrensbedingten Überdosierungen kommt (BECKER und BRÄUNINGER, 1986). Auf diese Gefahren soll im Folgenden näher eingegangen werden:

Humusmineralisierung und Nitrifikationsprozesse haben morphologische, chemische und biologische Veränderungen in der organischen Auflage zur Folge. Der so eingeleitete Umbau von rohhumusartigen zu moder- oder gar mullartigen Humusformen ist mit seinen positiven langfristigen Effekten einer Protonenfreisetzung bei der Oxidation von Ammonium und einem möglichen erhöhten Nitrataustrag mit dem Sickerwasser gegenüberzustellen.



Zweifellos gehen die Stickstoff- und Kohlenstoffvorräte in der Humusaufgabe der gekalkten Fläche gegenüber der Nullfläche stark zurück. Insgesamt nimmt jedoch der Stickstoffvorrat im durchwurzelten Raum - nicht signifikant - nur um ca. 6 % ab (Abb. 8; Tab. 7, im Anhang). Gleichzeitig belegen die Nadelanalysen eine vermehrte Stickstoffaufnahme durch die Bäume. Die Stickstoffverluste halten sich demnach, falls sie überhaupt eintreten, in einem sehr begrenzten Rahmen. Nach dieser indirekten Stickstoffdüngung ist mit einem Biomassezuwachs, welcher auch mit einer gesteigerten Kohlenstoffbindung verbunden wäre, zu rechnen, was allerdings noch nachzuweisen ist. Gelingt es also, die mobilisierten Elementvorräte wenigstens zum größten Teil durch Bodenlebewesen oder über die Wurzelaufnahme in der Kraut-, Strauch- und Baumvegetation zu binden, so können negative ökosystemare Auswirkungen begrenzt werden.

Im Rohhumus überwiegen wenig zersetzte organische Bestandteile mit nur geringen Bindungs- und Austauschkapazitäten (HEMPFLING, 1988). Jene werden mit zunehmender Zersetzung, also Entwicklung zu besseren Humusformen, stark vergrößert (SCHACHTSCHABEL et al., 1984). Gleichzeitig wird der Mineralboden über eine gesteigerte Bioturbation besser in den Nährelementkreislauf einbezogen (ZIEGLER, 1990). Möglicherweise ist die beginnende bessere Nährelementversorgung der Fichten auf den Dolomitparzellen in unserem Versuch bereits auf solche Umsetzungsprozesse zurückzuführen, zumal das über rasch lösliches Magnesit gegebene Magnesium bei der Silikatvariante offensichtlich nicht ausgenutzt wird.

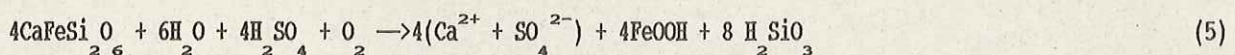
Aus der Stärke der Auflageschichten im Humusprofil (Abb. 5; Tab. 5, im Anhang) kann jedoch geschlossen werden, daß bisher nur die  $\text{O}_L$ - und  $\text{O}_F$ -Lagen an den Umsetzungsprozessen beteiligt sind und daß die  $\text{O}_H$ -Lage noch in alter Stärke erhalten ist. Auf die Möglichkeit daß gerade die L-Lage unter günstigen Voraussetzungen sehr schnell umgesetzt werden kann, haben BEYER et al. (1991) hingewiesen. Nach deren Erkenntnissen wird der Abbau der angelieferten Streu durch die Kalkung über eine höhere Abundanz der zersetzenden Bodenlebewesen angeregt und der Akkumulation von wenig zersetzter organischer Substanz entgegengewirkt. Ein Umbau in stabile Humusformen mit hoher chemischer Elastizität (nach ULRICH, 1987)

setzt voraus, daß auch die H-Lage in eine gesteigerte Bioturbation mit einbezogen wird. Kalkungsmaßnahmen unter den dargestellten Modalitäten können dieses Zieles bei Erhaltung eines dicht geschlossenen Kronendaches - wie es in diesem Fall aus Versuchsgründen angestrebt wurde - wohl nur in einem längeren Zeitraum als die hier beobachteten 4 Jahre erreichen.

Die in der Dolomitvariante abgelaufenen Vorgänge verdeutlichen damit die Problematik und die Gratwanderung, die mit einer Bodenschutzkalkung beschriftet wird. Von der Ausbringung von ausschließlich feinstvermahlenden Kalken und Dolomiten ist also insbesondere auf sorptionsarmen und nur wenig bewachsenen, bzw. schwach bestockten Standorten abzuraten.

Hinsichtlich der Reaktionsfreude der Dolomite, die sehr stark vom Vermahlungsgrad abhängt (SAUERBECK und RIETZ, 1985b), muß also ein Weg gefunden werden, der sowohl eine Adsorption basischer Kationen in der Tiefe fördert, als auch unerwünschte Nebenwirkungen weitgehend einschränkt. Größere Bestandteile des Dolomits lassen verminderte Reaktivitäten und nur langfristig eine Erhöhung der Basizität erwarten. Der Anteil der feinen Fraktionen muß demnach so hoch bemessen werden, daß immer noch ein ausreichend hohes Puffervermögen und eine moderate vertikale Wirkung gewährleistet ist.

Bei der Ausbringung von Gesteinsmehlen erkennt HILDEBRAND (1990) nach Laborversuchen keine zur dolomitischen Reaktion vergleichbaren Risiken. Seine Analysen des Bodenporenwassers deuteten weder auf eine zusätzliche Lösung von organischen Säuren noch auf eine gesteigerte Nitratbildung hin. Bei silikatischen Gesteinsmehlen müssen demnach andere Reaktionsmechanismen vorliegen als bei karbonatischen Puffersubstanzen. So stellen die Silikate eine Austauschmatrix für Kationen dar. Das silikatische Gesteinsmehl in der Ausbringungsmenge von 3 to je ha besitzt eine Austauschkapazität von etwa 2 kmol eq je ha, das silikatische Gesteinsmehl mit Magnesit in gleicher Ausbringungsmenge etwa 10 kmol eq je ha (vgl. Tab.3, im Anhang). Da lediglich Kationbasen (Ca, Mg, K, Na) in den Gesteinsmehlen austauschbar vorliegen (Tab. 3, im Anhang), kann eine ökosystemunschädliche Protonenkonsumtion durch Austauschprozesse einsetzen. Dies reicht nicht aus, um allein die jährlichen Säureeinträge aus Luftschadstoffen bis über 3 kmol eq je ha und Jahr (BLOCK, 1990) längerfristig zu neutralisieren. Protonen können jedoch zusätzlich durch die einsetzende Silikatverwitterung des wenig mobilen und überwiegend in der Streuauflage verbleibenden Gesteinsmehles gepuffert werden. Die Verwitterungsreaktionen der in den verwendeten Gesteinsmehlen überwiegend vorhandenen Pyroxene laufen vorwiegend über Hydrolyse und Oxidation ab (SCHACHTSCHABEL et al., 1984):



Mineralische Säuren (hier dargestellt als Schwefelsäure) werden dabei neutralisiert,  $\text{Fe}^{2+}$  wird bspw. zu  $\text{Fe}^{3+}$  oxidiert, und es entsteht Kieselsäure.

Aus den pH-Werten des Bodens im beschriebenen Versuch ergeben sich jedoch keine Hinweise auf die Neutralisationsleistung der Gesteinsmehle (Tab. 14, im Anhang). Wie sich in weiteren Versuchen gezeigt hat, über die zu einem späteren Zeitpunkt berichtet wird, besitzt der Chemismus der Bodenlösung einen besseren Zeigerwert. Die Bodenlösung wurde in diesem Versuch jedoch nicht untersucht, so daß die Neutralisationsleistung der Gesteinsmehle gegenüber eingetragenen Säuren aus Luftschadstoffdepositionen nicht eindeutig beurteilt werden kann.

Für das Versuchswesen muß aus diesen Erkenntnissen gefolgert werden, daß es zur Untersuchung von Bodenschutzmaßnahmen nicht ausreicht, den Festbodenchemismus in periodischen Zeitabständen oder gar nur am Anfang und Ende eines Versuches zu analysieren. Erst über eine Analyse der jeweiligen Bodenlösung ist es möglich, Reaktionen zu beschreiben, die durch Bodenschutzmaßnahmen ausgelöst werden.

Eine **Bodenrestauration** soll über eine Restabilisierung von durch Säureeinwirkung aufgeweiteten Tonmineralen die Austauschkapazitäten der Böden insbesondere für basische Kationen erhöhen. Eine sofort wirksame und tiefgreifende Bodenrestauration über eine Anreicherung des Bodens mit Gesteinsmehlen ist bei der Ausbringung vertretbarer Mengen schon rein rechnerisch nicht möglich. Die effektive Austauschkapazität des Bodens in den unbehandelten Kontrollflächen beträgt 357 kmol eq/ha (Null), bzw. 441 kmol eq/ha (Null(8)). Mit 3 to/ha Gesteinsmehl wird diese Kapazität um ca. 2 (silikatisches Gesteinsmehl), bzw. 10 (silikatisches Gesteinsmehl mit Magnesit) kmol eq erweitert, das sind nur ca. 0,5 bis 3 % der ohnehin vorhandenen effektiven Austauschkapazität.

Auch BUTZ-BRAUN (1991, in diesem Band) findet in diesem Versuch auf den behandelten Parzellen keine Hinweise für eine Restabilisierung der im Boden vorhandenen Tonminerale nach der Einbringung von Gesteinsmehlen, einschließlich Dolomit.

Eine **Bodenmelioration** hat im Gegensatz zur Bodenrestauration das Ziel, einen Bodenzustand unabhängig von dessen Stabilisierungsgrad insbesondere im Hinblick auf die Pflanzenernährung zu verbessern.

So wird der austauschbare Calciumvorrat nach der Behandlung mit silikatischem Gesteinsmehl mit Magnesit um 14 %, das sind fast 20 kg/ha, und nach der Behandlung mit silikatischem Gesteinsmehl um 36 %, das sind 50 kg/ha, gesteigert. Die Steigerungsrate beträgt bei Dolomit sogar 143 %, das sind 198 kg/ha (Dolomit-Parzelle 7: 56 % = 132 kg/ha).

Der austauschbare Magnesiumvorrat erhöht sich nach der Behandlung mit dem angereicherten silikatischen Gesteinsmehl um fast 200 %, das sind ca. 90 kg/ha, und nach der Behandlung mit dem naturbelassenen silikatischen Gesteinsmehl um 41 %, das sind ca. 19 kg/ha. Auch hierbei werden die Steigerungsraten gegenüber der Dolomitbehandlung mit über 300 % = 140 kg/ha (Dolomit-Parzelle 7: 150 % = 86 kg/ha) nicht erreicht.

Auch Kalium liegt in silikatischen Gesteinsmehlen noch in nennenswerten Anteilen in austauschbarer Form vor (Tab. 2 und 3, im Anhang). Darauf hat bereits EMMERMANN (1984) hingewiesen. Die austauschbaren Kaliumvorräte im Mineralboden steigen dennoch nicht deutlich an.

Die Kationenaustauschprozesse sowohl an den Gesteinsmehlen als auch an der Bodenmatrix beruhen auf dem Streben nach einem Gleichgewichtszustand zwischen Austauscher und umgebender Lösung. Trotzdem verlaufen die Austauschvorgänge nicht einfach proportional zur analytisch bestimmten Lösungskonzentration der Elemente. Sowohl in der Bodenlösung als auch an der Bodenmatrix gibt es für jedes Element bestimmte Bindungskräfte, die einen Austausch beeinflussen. Die Bindungsstärken der Kationen an der Austauscheroberfläche hängen von ihren Ladungen und Molekülmassen ab. Sie steigen mit zunehmender Ladung und größerer Masse. In der Bodenlösung wird die Aktivität eines Elementes neben der Lösungskonzentration zusätzlich durch seine Wertigkeit und seine Hydratationsenergie beeinflusst, da einerseits die Anziehungskräfte zwischen Kationen und Anionen bei stärkerer Hydratation geringer sind, da aber andererseits bei einer Adsorption am Austauscher die Kationen teilweise dehydratisiert werden müssen. Die Austauschvorgänge wurden auf der Grundlage dieser Gesetzmäßigkeiten von GAPON (nach SCHACHTSCHABEL et al., 1984) in einer Gleichgewichtsgleichung beschrieben, bei der die Aktivitäten der mehrwertigen Kationen in der jeweiligen Lösung zur reziproken Potenz ihrer Wertigkeit erhoben und ins Verhältnis zu den adsorbierten Anteilen der Elemente am Austauscher gesetzt wurden:

$$\left( \frac{C_{E2}}{C_{E3}} \right)_s = K_{E2/E3} * \left( \frac{\sqrt{A_{E2}}}{\sqrt[3]{A_{E3}}} \right)_l \quad (6)$$

<b>C</b>	=	<b>Konzentration</b>	<b>K<sub>E2/E3</sub></b>	=	<b>Proportionalitätskoeffizient</b>
<b>E2</b>	=	<b>zweiwertiges Element</b>			<b>(nach GAPON)</b>
<b>E3</b>	=	<b>dreiwertiges Element</b>	<b>A</b>	=	<b>Aktivität der Elemente</b>
<b>s</b>	=	<b>sorbiert</b>	<b>l</b>	=	<b>in Lösung</b>



Aus der notwendigen Reduktion des Aktivitätenverhältnisses dieser Gleichgewichtsgleichung geht hervor, daß die Aktivität, also die Eintauschenergie der einwertigen Alkaliionen schwächer ist als die der zweiwertigen Erdalkaliionen und diese wiederum schwächer als die der dreiwertigen Kationen, wie z.B. Aluminium (HILDEBRAND, 1986).

In unserem Versuch wird insbesondere Aluminium (Tab. 22, im Anhang) gegen Magnesium (Tab. 17, im Anhang) und z.T. Calcium (Tab. 16, im Anhang) ausgetauscht. Ein Eintausch von Kalium ist bei geringeren Lösungskonzentrationen an eine besondere Bodenstruktur gebunden. So kann es unabhängig von seiner Ladung und Hydratation an kaliumspezifischen Eintauschpositionen bevorzugt adsorbiert werden (SCHACHTSCHABEL et al., 1984). Solche Positionen sind insbesondere die keilförmig aufgeweiteten Ränder von Illiten und hochgeladene, stark aufgeweitete Tonminerale, wie sie BUTZ-BRAUN (1991, im gleichen Band) im Mineralboden vorgefunden hat. Wenn die Kaliumsättigung in solchen kaliumspezifischen Eintauschpositionen gegen Null geht, verändert sich der über einen weiten Bereich konstante Proportionalitätskoeffizient nach GAPON (vgl. Gleichung 6), d.h., die Eintauschstärke verlagert sich zugunsten des ansonsten eintauschschwächeren Kaliums.

Es wird also - wie tendenziell gezeigt - im Boden der mit silikatischen Gesteinsmehl behandelten Fläche zu geringen Teilen eingetauscht, mit der Folge einer Vorratserhöhung an pflanzenverfügbarem Kalium.

Diese Verhältnisse verlagern sich aber bereits beim mit Magnesium angereicherten silikatischen Gesteinsmehl zugunsten des eintauschstärkeren Magnesiums, so daß hierbei trotz gleichem Kaliumgehalt keine Vorratserhöhung erfolgt.

PFLEIDERER (1986) fand nach der Ausbringung von 270 to/ha Basaltmehl, also bei einer 90 mal höheren (!) Ausbringungsmenge als in unserem Versuch, meliorative Effekte durch verbesserte Nährstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. Ihre Befunde sind wohl auf die erhebliche Veränderung der Konzentrationsverhältnisse in der Bodenlösung zurückzuführen.

Unsere Beurteilung einer besseren Nährelementversorgung der Bäume beschränkt sich auf die Veränderung der Elementgehalte in den Nadeln. Diese haben sich nicht entscheidend gegenüber der Kontrollvariante verbessert. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß auch bei der Kontrollvariante allenfalls bei Magnesium eine schwache Versorgung festzustellen ist und eine allgemeine deutliche Verbesserung der Nährelementversorgung somit nicht zu erwarten ist.

Auch die okular erkennbaren Schadsymptome sind sehr unspezifisch, so daß nicht beurteilt werden kann, ob die Bodenschutzmaßnahmen und die beginnende Bodenmelioration darauf überhaupt Einfluß nehmen können.

Die Versuchsergebnisse lassen den Schluß zu, daß die Wirkung der silikatischen Gesteinsmehle in der im Versuch verwendeten Dosis von 3 t/ha hinsichtlich von Bodenschutzmaßnahmen nicht mit der von Dolomit in gleicher Ausbringungsmenge vergleichbar ist. Einer Erhöhung der Dosis stehen jedoch Gefährdungspotentiale, wie Auswirkungen feinstvermahlener Gesteinsmehle auf die Bodenfauna (SNOEK, 1982) oder auf den Sickerwasserchemismus (SCHÜLER, 1990), entgegen, die in weiteren Untersuchungen vor einer Praxisanwendung eingegrenzt werden müssen.

Auch sind die Probleme der Ausbringungstechnik für dieses feinstvermahlene Material nicht gelöst, zumal von den erdgebundenen Verfahren mit Düngerstreuern wegen der intensiven Flächenbefahrung mit der Gefahr von bodenphysikalischen Schäden (BECKER et al., 1986) oder Verblasegeräten mit sehr geringer Verteilgenauigkeit (BECKER und BRÄUNINGER, 1986) abgegangen werden muß.

Selbst die Ausbringung von Dolomit ist nicht unproblematisch. Dennoch können und müssen tonmineralreiche Standorte mit höher reaktiven Kalken bzw. Dolomiten vor Säureeinträgen geschützt werden, um negative Auswirkungen auf den Bodenzustand abzuwenden. Je reaktionsfreudiger Dolomite sind, desto größer ist die Gefahr einer Übersteuerung der Neutralisationsprozesse in der Humusaufgabe.

Daher ist eine Kalkung stets in waldbauliche Bodenschutzmaßnahmen einzubinden. EDER (1991) hat solche Maßnahmen beispielhaft angeführt:

- Der Akkumulation von Nadelstreu und damit der Entkoppelung des Nährstoffkreislaufes kann durch frühzeitige und starke Pflegeeingriffe bei gleichzeitiger Erhaltung von Laubbäumen entgegengewirkt werden. Geschieht dies rechtzeitig vor anstehenden Kalkungsmaßnahmen, so kommt es durch den vermehrten Licht- und Wärmegenuß zu einer Aktivierung des Bodenlebens und der Bodenvegetation, die Voraussetzung für eine höhere Elastizität der betroffenen Ökosysteme sind.
- Langfristig ist eine höhere Diversität der Baumvegetation anzustreben. Insbesondere anspruchsvolle, tief- und intensivwurzelnende Baumarten werden zur Stabilisierung geschädigter Waldökosysteme benötigt.

Angesichts der anhaltenden Bedrohung der Wälder und der Waldböden durch Immissionen, deren drastische Verringerung gefordert werden muß, sind ausgewogene, aufeinander abgestimmte waldbauliche Maßnahmen geboten .

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

1986 wurde im rheinland-pfälzischen Forstamt Linz ein Versuch angelegt zur Erprobung von Bodenschutzmaßnahmen mit feinvermahlenem Dolomit, 0 - 0,09 mm, silikatischem Gesteinsmehl mit Magnesit und nicht angereichertem, silikatischem Gesteinsmehl, beide ebenfalls feinvermahlen (0 - 0,06 mm).

Laboruntersuchungen des ausgebrachten Materials verweisen auf eine höhere Säureneutralisationskapazität des Dolomits, aber gleichzeitig auf bessere Säureneutralisationsraten der silikatischen Gesteinsmehle. Diese intensiveren chemischen Reaktionen werden auf die größere reaktive Oberfläche der Gesteinsmehle aufgrund der höheren Mahlfeinheit zurückgeführt.

Die Freilandversuche zeigen, daß nach der Ausbringung des wegen der Feinstvermahlung hochreaktiven Dolomits ein beträchtlicher Humusschwund erfolgt, daß aber die dabei mobilisierten Nährelemente, insbesondere Stickstoff, im Nährelementkreislauf verbleiben. Gleichzeitig erhöht sich die Basensättigung im Mineralboden deutlich. Die silikatischen Gesteinsmehle haben dagegen keine vergleichbaren Wirkungen zur Folge.

Für die forstliche Praxis ergibt sich daraus, daß die Dolomitausbringung gemeinsam mit unterstützenden waldbaulichen Maßnahmen erfolgen muß, um die Abpufferung saurer Luftschadstoffeinträge weitgehend ökosystemunschädlich zu leisten.

Die Nährelementversorgung der Bäume verbessert sich unabhängig von der Art der Gesteinsmehle nur in einem unbedeutenden Ausmaß. Dies mag an der ohnehin weitgehend befriedigenden Nährelementversorgung im Ausgangszustand liegen.

Eine Wiederherstellung des ursprünglichen Bodenzustandes (Bodenrestoration) ist mit den untersuchten Maßnahmen nicht möglich.

## SUMMARY

In 1986 dolomite rock meal, silicate rock meal with magnesia and pure silicate rock meal were applied in a field trial in the forest district Linz (Rheinland-Pfalz). Especially the buffering effects of the finely ground materials against acidic air pollution input in a spruce forest ecosystem are investigated.

Laboratory investigations show a higher acid neutralization capacity of dolomite, but better acid neutralization rates of both silicate rock meals.

In the field experiments the humus layer decreases after dolomite application. However the mobilized nutrient elements, especially nitrates, remain in the nutrient cycle. At the same time the base saturation in the soil increases significantly. The silicate rock meals have no comparable effects, however.

The nutrition of the trees increases only insignificantly independent of the kind of the buffer substances. This may be explained through the fairly good initial nutrient status of the trees.

In conclusion the application of dolomite can support the buffering of acidic deposition input in the soil without damaging the ecosystem. Anyhow it should be combined with silvicultural measures such as

- early and intensive thinnings with simultaneously preservation of deciduous trees,
- striving for higher diversity of trees in the long term.

## 6 LITERATURVERZEICHNIS

- BECKER, G. und BRÄUNINGER, A., 1986: Bestandesdüngung mit Verblasegeräten - Beurteilungskriterien und Empfehlungen -. FoHo, 41, 33 - 36
- BECKER, G., HOFMANN; R. und GROSS; M., 1986: Boden- und Wurzelschäden durch Befahrung von Waldbeständen. FoHo, 41, 367 - 370
- BEESE, F., 1989: Wirkungen von Kalkungs- und Düngungsmaßnahmen auf die chemische Zusammensetzung der Bodenlösung. Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 45, 27 - 48
- BEYER, L., BLUME, H.-P., IRMLER, U. und HENSS, B., 1991: Veränderungen des Humuskörpers einer Parabraunerde unter Wald in 25 Jahren. Forstw. Cbl., 110, 34 - 46
- BERGMANN, W., 1983: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Entstehung und Diagnose. G. Fischer Vlg., Jena
- BLOCK; J., 1990: Ergebnisse der Stoffdepositionsmessungen in rheinland-pfälzischen Waldgebieten 1984 - 1989. Mitt. aus d. Forstl. Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 14/90
- BLOCK, J. und NIESAR, M., 1989: Waldbodenversauerung durch Luftverunreinigungen. AFZ, 44, 954 - 956
- BLUM, W.E.H., HERBINGER, B., MENTLER, A., OTNNER, F., POLLACK, M., UNGER, E. und WENZEL; W.W., 1989: Zur Verwendung von Gesteinsmehlen in der Landwirtschaft, II. Wirkung von Gesteinsmehlen als Bodenverbesserungsmittel. Z. f. Pflanzenern., Bodenkde, 152, 427 - 430
- BREDEMEIER, M. und ULRICH, B., 1989: Depositionsbedingte und ökosysteminterne Anteile der Säurebelastung von Waldböden. AFZ, 44, 256 - 261
- BUNDESMINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 1990: Arbeitsanleitung für bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald. Selbstvlg.

- BUTZ-BRAUN, R., 1991:** Veränderungen an Tonmineralen zwischen 1988 und 1990 an Böden aus der Versuchsfläche bei Linz. Mitt. aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 18, 77 - 116
- ECKHARDT, F.E.W., 1979:** Über die Einwirkung heterotropher Mikroorganismen auf die Zersetzung silikatischer Minerale. Z. f. Pflanzenern., Bodenkde, 142, 434 - 445
- EDER, W., 1991:** Luftschadstoffe in Waldstandorten, ihre Auswirkungen und Gegenmaßnahmen. Tagungsband zur Jahrestagung des Bunds für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V. am 24.05.1991 in Kirchheimbolanden (im Druck)
- EMMERMANN, K.-H., 1984:** Möglichkeiten der Bodenverbesserung durch Gesteinsmehl. Die Naturstein-Industrie, Selbstvlg.
- ENCKE, B.-G., 1988:** Grundsätze für die Düngung im Wald. AFZ, 43, 280 - 282
- FIEDLER, H.J., 1988:** Bodenchemische Gesichtspunkte zur Wiederaufforstung in Immissionsgebieten der Mittelgebirge. Wiss. Z. d. TU Dresden, 37, 205 - 210
- FIEDLER, H.J., NEBE, W. und HOFFMANN, F., 1973:** Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. G. Fischer Vlg., Stuttgart
- v. FRAGSTEIN, P., 1982:** Steinmehle in der Landwirtschaft. Die Natursteinindustrie, 5, 5 - 11
- HEMPFLING, R., 1988:** Charakterisierung verschiedener Waldhumusformen und ihrer Dynamik durch analytische Pyrolyseverfahren. Bayreuther bodenkdl. Ber., Bd. 6, 126 S.
- HENZE, R., 1987:** Naturkalke korrekt bewerten. FoHo, 42, 155 - 156
- HILF, H.H., 1937:** Basaltgrus - der Nachhaltsdünger armer Sandböden. FA, 13, 113 - 116
- HILF, H.H., 1938:** Die Düngung mit Basaltabfällen. FA, 14, 93 - 101
- HILDEBRAND, E.E., 1986:** Nutzen und Risiken der Forstdüngung aus bodenchemischer Sicht. IMA-Querschnittsseminar des KfK-PEF "Restabilisierungsmaßnahmen-Düngung, 90 - 97

- HILDEBRAND, E.E., 1989:** Die ökochemische Wirkung von Forstdüngungen, dargestellt durch den Lösungstransport im fließenden Makroporenwasser. *Österr. Forstztg.*, **3**, 78 - 81
- HILDEBRAND, E.E., 1990:** Der Einfluß von Forstdüngungen auf die Lösungsfracht des Makroporenwassers. *AFZ*, **45**, 604 - 607
- KRAPFENBAUER, A. und GASCH, J., 1989:** Der Waldbodenhumus als Zustandsweiser. *Österr. Forstztg.*, **3**, 28 - 32
- MARSCHNER, B., 1990:** Elementumsätze in einem Kiefernforstökosystem auf Rostbraunerde unter dem Einfluß einer Kalkung/Düngung. *Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme, R. A*, Bd. 60, 192 S.
- MEIWES, K.-J., KÖNIG, N., KHANA, P.K., PRENZEL, J. und ULRICH, B., 1984:** Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralböden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden, *Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben d. Univ. Göttingen*, Bd. 7, 1 - 67
- MURACH, D., 1984:** Die Reaktion der Feinwurzeln von Fichte (*Picea abies* Karst.) auf zunehmende Bodenversauerung. *Göttinger Bodenkdl. Ber.*, Bd. 7
- PFLEIDERER, H., 1986:** Wirkungen meliorativer Gaben von Gesteinsmehlen zu Sandboden und von Gesteinsmehlen zu Tonboden auf den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturpflanzen und die Veränderung einiger bodenphysikalischer und -chemischer Kennwerte. *Diss. d. Univ. Hohenheim*
- SAUERBECK, D. und RIETZ, E., 1985a:** Ein Verfahren zur Bestimmung der Reaktionsfähigkeit kohlensaurer Düngekalke. *Landwirtschaftl. Forschung*, **41**, 682 - 690
- SAUERBECK, D. und RIETZ, E., 1985b:** Einfluß von Herkunft und Mahlfeinheit auf die Umsetzung kohlensaurer Düngekalke in verdünnter Säure. *VDLUFA-Schriftenreihe 16, Kongreßbd.*, 431 - 438
- SAUTER, U. und FOERST, K., 1987:** Hinweise für den Einsatz von Silikatgesteinsmehlen zur Waldbodenverbesserung. *FoHo*, **42**, 27 - 30
- SAUTER, U. und MEIWES, K.J., 1990:** Auswirkungen der Kalkung auf den Stoffaustrag aus Waldökosystemen mit dem Sickerwasser. *FoHo*, **45**, 605 - 610

- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., HARTGE, K.-H. und SCHWERTMANN, U., 1984:** Lehrbuch der Bodenkunde. F. Enke-Vlg., Stuttgart
- SCHEFFER, S., ULRICH, B. und HIESKERMANN, P., 1957:** Die Bedeutung der Chelatisierung in der Agrikulturchemie und Bodenkunde. Z. f. Pflanzenern., Bodenkde., 120, 146 - 155
- SCHRÖTER, H., ECKSTEIN, K., HARTMANN, G., HEIDINGSFELD, N., LAKENBERG, E., LAMMEL, A., RACK, A., ZACK, A. und ZWIRGELMAYER, G., 1984:** Diagnose und Klassifizierung der neuartigen Waldschäden. AFZ, Sonderdruck
- SCHÜLER, G., 1988:** Herkömmliche Methoden der Nadelprobennahme im Vergleich zum Helikoptereinsatz. AFZ, 43, 924 - 925
- SCHÜLER, G., 1990:** Vergleichender Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen, Versuchskonzept und erste bodenchemische Auswirkungen. Kolloquiumsbericht der Forstl. Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Trippstadt, 14.05.1990
- SINGER, A. und NAVROT, J., 1976:** Extraction of metals from basalt by humic acids. Nature, Nr. 262, 479 - 481
- SNOEK, H., 1982:** Spezialsteinmehl gegen Schadpilze und Insekten. Die Natursteinindustrie, 5, 12
- TYNER, E.H., 1935:** The feeding power of plants for the potassium in feldspar, exchangeable form and dilute solution. Soil Sci., 39, 405 - 422
- ULRICH, B., 1986:** Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben, langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. Forstwiss. Cbl., 105, 421 - 435
- ULRICH, B., 1987:** Stabilität, Elastizität und Resilienz von Waldökosystemen unter dem Einfluß saurer Deposition. FA, 58, 232 - 239
- VAN DEN BURG, J., 1985:** Foliar analysis for determination of tree nutrient status - a compilation of literature data. Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos - en Landschapsbouw "de Dorschkamp", Wageningen, Rapport-no 414



VELDE, B. und BRUSEWITZ, A.M., 1986: Compositional variation in component layers in natural illite/smectite. *Clays and Clay Minerals*, 34, 651 - 657

ZIEGLER, F., 1990: Zum Einfluß von Regenwürmern und mineralischer Substanz auf die Zersetzung von Buchenstreu und Gerstenstroh im Modellversuch. *Bayreuther Bodenkdl. Ber.*, Bd. 13, 165 S.

ZÖTTL, H.W., 1985: Waldschäden und Nährelementversorgung. *Düsseldorfer Geobot. Kolloquium*, 7, 31 - 41

## 7 ANHANG: TABELLEN

Tab. 1: Ergebnisse der Waldschadenserhebung 1983 und 1984 im Forstamt Linz,  
Gemeindewald Rheinbreitbach, Abt. 50 d

Jahr	Schadklasse			
	0	1	2	3
1983	60	40	-	-
1984	40	50	10	-

Tab. 2: Inhaltsstoffe der verwendeten Gesteinsmehle

	Dolomit	mit Magnesit angereichertes silikatisches Gesteinsmehl	silikatisches Gesteinsmehl
Gesamt-P O	-----	0,6 %	0,7 %
CaO <sup>2 5</sup>	31,7 %	13,9 %	14,6 %
MgO	19,2 %	24,4 %	8,5 %
K O	-----	1,8 %	2,1 %
Na <sup>2</sup> O	-----	1,3 %	1,5 %
Al <sup>2</sup> O	-----	10,5 %	12,5 %
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	-----	9,8 %	11,5 %
SiO <sup>3</sup>	-----	37,3 %	42,8 %
Pb <sup>2</sup>	0,54 ppm	4,5 ppm	7,2 ppm
Cd	0,02 ppm	0,19 ppm	0,28 ppm
Co	2,9 ppm	53 ppm	63 ppm
Cu	2,5 ppm	57 ppm	67 ppm
Zn	9 ppm	72 ppm	28 ppm
As	0,5 ppm	1,0 ppm	1,2 ppm

**Tab. 3: Austauschbare Kationen in den silikatischen Gesteinsmehlen**

	mit Magnesit angereichertes silikatisches Gesteinsmehl	silikatisches Gesteinsmehl
Ak <sub>e</sub>	3,245 kmol eq/to	0,659 kmol eq/to
Ca	10,46 % Ak <sub>e</sub>	74,54 % Ak <sub>e</sub>
Mg	86,41 % Ak <sub>e</sub>	6,99 % Ak <sub>e</sub>
K	2,49 % Ak <sub>e</sub>	14,75 % Ak <sub>e</sub>
Na	0,64 % Ak <sub>e</sub>	3,70 % Ak <sub>e</sub>
H	0 % Ak <sub>e</sub>	0 % Ak <sub>e</sub>
Fe	0 % Ak <sub>e</sub>	0 % Ak <sub>e</sub>
Mn	0,001 % Ak <sub>e</sub>	0,01 % Ak <sub>e</sub>
Al	0 % Ak <sub>e</sub>	0 % Ak <sub>e</sub>
Ca	6,8 kg/to	9,8 kg/to
Mg	34,1 kg/to	0,6 kg/to
K	3,2 kg/to	3,8 kg/to

**Tab. 4: Ausbringungsmenge, Mahlfeinheit und basische Wirksamkeit der Gesteinsmehle**

	Dolomit	silikatisches mit Magnesit angereichertes Gesteinsmehl	silikatisches Gesteinsmehl
Ausbringungsmenge (to/ha)	3	3	3
Mahlfeinheit	0 - 0,09 mm	0 - 0,06 mm	0 - 0,06 mm
basisch wirksame Stoffe (% CaCO <sub>3</sub> eq)	104,4	89,4	50,9
Ca (% CaCO <sub>3</sub> eq)	56,7	24,8	26,1
Mg (% CaCO <sub>3</sub> eq)	47,7	60,6	21,1
K (% CaCO <sub>3</sub> eq)	-----	1,9	1,3
Na (% CaCO <sub>3</sub> eq)	-----	2,1	2,4
Reaktivität pH 2,0 (%)	24,0	49,4	75,8
Reaktivität pH 3,0 (%)	16,2	33,6	52,7
Reaktivität pH 3,5 (%)	14,0	29,1	33,1
Säureneutralisationskapazität (kmoleq/ha)	62,7	53,6	30,5
Säureneutralisationsrate pH 2,0 (kmoleq/ha)	15,0	26,5	23,1
Säureneutralisationsrate pH 3,0 (kmoleq/ha)	10,2	18,0	16,1
Säureneutralisationsrate pH 3,5 (kmoleq/ha)	8,8	15,6	10,1

Tab. 5: Stärke der Auflageschichten im Humusprofil, Humusform und Humusvorrat 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
Auflagenstärke O <sub>L</sub> (cm)	1,5	+ 0	0,6	+ 0,25	1,1	+ 0,35	1,1	+ 0,23	1,5	+ 0,58	0,75	+ 0,29
					1) Sign	n.s.	1) Sign	n.s.	1) Sign	n.s.		2) Sign
Auflagenstärke O <sub>F</sub> (cm)	3,6	+ 0,95	1,6	+ 0,85	3,3	+ 0,85	2,6	+ 0,68	3,5	+ 1,22	1,6	+ 0,48
					1) Sign	*	1) Sign	n.s.	1) Sign	n.s.		*
Auflagenstärke O <sub>L</sub> (cm)	1,0	+ 0,40	1,1	+ 0,48	2,0	+ 0,80	1,3	+ 0,59	1,0	+ 0,41	1,0	+ 0,41
					1) Sign	n.s.	1) Sign	n.s.	1) Sign	n.s.		n.s.
Humusform	rohhumusartiger Moder		typischer Moder bis mullartiger Moder		typischer Moder bis rohhumusartiger Moder		typischer Moder bis rohhumusartiger Moder		typischer Moder bis rohhumusartiger Moder		typischer Moder	
Humusvorrat (to/ha)	147	+ 26,6	81	+ 34,5	149,9	+ 34,03	120	+ 25,7	144	+ 33,9	78	+ 6,9
					1) Sign	n.s.	1) Sign	n.s.	1) Sign	n.s.		**

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant ( $d > 0,10$ )

\* = signifikant ( $d < 0,05$ )

\*\* = hoch signifikant ( $d < 0,01$ )

Tab. 6: Kohlenstoffvorräte (kg/ha) im Humus und Mineralboden 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
organische Auflage	61072	+ 1077	30294	+ 1938	64077	+ 1993	50317	+ 1991	62842	+ 1894	33682	+ 643
A <sub>h</sub> -Horizont	27013	+ 7411	29675	+ 7357	28004	+ 3538	25112	+ 2281	40821	+ 5430	36954	+ 3980
B <sub>v</sub> -Horizont	71869	+ 7876	71895	+ 10825	77225	+ 12170	78050	+ 10105	69933	+ 17943	12086	+ 12113
B <sub>v</sub> C <sub>v</sub> -Horizont	5715	+ 16	5314	+ 148	6544	+ 1287	9384	+ 2548	10599	+ 3130	7934	+ 3162
Gesamtvorrat	165671	+ 14195	137179	+ 19973	176634	+ 13632	157443	+ 16926	184194	+ 22137	199073	+ 4327

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)  
 (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)  
 \* = signifikant (d < 0,05)  
 \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

Tab. 7: Stickstoffvorräte (kg/ha) im Humus und Mineralboden 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S
organische Auflage	2381	+ 71	1262	+ 38	2441	+ 60	1919	+ 109	2535	+ 170	1387	+ 66
A-Horizont <sub>h</sub>	1398	+ 317	1550	+ 286	1399	+ 115	1358	+ 120	2111	+ 235	1817	+ 245
B-Horizont <sub>v</sub>	4071	+ 366	4574	+ 531	4431	+ 787	4264	+ 485	4425	+ 923	6214	+ 655
B C-Horizont <sub>v v</sub>	1143	+ 3	1063	+ 30	941	+ 442	1014	+ 170	1265	+ 361	995	+ 419
Gesamtvorrat	8993	+ 753	8449	+ 825	9219	+ 1167	82553	+ 799	10335	+ 966	10411	+ 75

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)  
 (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)  
 \* = signifikant (d < 0,05)  
 \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

Tab. 8: Phosphorvorräte (kg/ha) im Humus und Mineralboden 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
organische Auflage	174	+ 2,83	91,5	+ 2,12 ***	170,75	+ 24,58 n.s.	143,25	+ 16,15 *	147,5	+ 7,78	82	+ 7,07 **
A-Horizont <sub>h</sub>	121,5	+ 17,68	144,5	+ 9,19 n.s.	124	+ 5,6 n.s.	127,25	+ 6,65 n.s.	249,5	+ 17,68	220,5	+ 58,69 n.s.
B-Horizont <sub>v</sub>	564	+ 4,24	566	+ 25,46 n.s.	621	+ 112,71 n.s.	627	+ 64,53 n.s.	1113,5	+ 369,82	1113	+ 264,46 n.s.
B C-Horizont <sub>v v</sub>	270	+ 42,43	204,5	+ 27,58 n.s.	247,5	+ 39,03 n.s.	236,8	+ 51,99 n.s.	528,5	+ 23,33	446	+ 93,34 n.s.
Gesamtvorrat	1129,5	+ 17,68	1006,5	+ 13,44 *	1163,5	+ 170,23 n.s.	1112,5	+ 152,55 n.s.	2039	+ 418,61	1861,5	+ 236,88 n.s.

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)  
 (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)  
 \* = signifikant (d < 0,05)  
 \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)  
 \*\*\* = höchst signifikant (d < 0,001)



Tab. 9: C/N-Verhältnisse (g/g) im Humus und Mineralboden 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)		
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	
organische Auflage	25,66	+ 1,22	23,99	+ 0,82	26,27	+ 1,13	26,24	+ 0,53	24,82	+ 0,91	24,31	+ 0,68	n.s.
A <sub>h</sub> -Horizont	19,22	+ 0,94	19,02	+ 1,25	20,61	+ 1,63	19,70	+ 0,70	19,31	+ 0,43	20,18	+ 0,53	n.s.
B <sub>v</sub> -Horizont	17,64	+ 0,35	15,69	+ 0,54	17,47	+ 0,71	18,39	+ 2,30	15,72	+ 0,78	19,46	+ 0,10	(*)
B <sub>v</sub> C <sub>v</sub> -Horizont	5,00	+ 0,001	5,00	+ 0,001	7,68	+ 2,67	11,24	+ 6,45	8,37	+ 0,09	8,02	+ 0,20	n.s.

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)

(\*) = schwach signifikant (d < 0,10)

\* = signifikant (d < 0,05)

\*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

Tab. 10: C/P-Verhältnisse (g/g) im Humus und Mineralboden 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)		
	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S	
organische Auflage	351,33	+ 12,45	331,70	+ 12,51	371,91	+ 77,42	354,57	+ 36,22	425,93	+ 8,02	413,17	+ 28,27	n.s.
A <sub>h</sub> -Horizont	220,08	+ 28,46	203,68	+ 38,16	231,55	+ 12,22	197,65	+ 19,09	163,37	+ 10,37	169,51	+ 26,71	n.s.
B <sub>v</sub> -Horizont	127,35	+ 12,97	127,62	+ 24,58	124,79	+ 3,53	124,38	+ 6,41	63,37	+ 5,04	112,96	+ 37,75	n.s.
B <sub>v</sub> C <sub>v</sub> -Horizont	21,41	+ 3,28	26,23	+ 4,18	26,35	+ 1,15	41,99	+ 17,88	20,20	+ 6,82	18,96	+ 11,08	n.s.

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)  
 (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)  
 \* = signifikant (d < 0,05)  
 \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

Tab. 11: Elementgehalte in der organischen Auflage (mg/kg) 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
Kalium	539,5	+ 74,5	583	+ 69,3	678	+ 158,2	589,75	+ 122,4	539	+ 12,7	495	+ 58,0
Calcium	3065	+ 835,5	9618,5	+ 2745,7	4691	+ 493,6	4202,5	+ 1293,5	3222	+ 96,2	7223	+ 2822,8
Magnesium	777	+ 291,3	2481,5	+ 863,4	2330	+ 1741	913	+ 638,2	361,5	+ 24,8	1268,5	+ 794,1
Aluminium	1724,5	+ 53,0	2412	+ 493,6	3186,8	+ 521,3 (*)	2738	+ 615,7	1661	+ 87,7	1816,5	+ 106,8

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant ( $d > 0,10$ )

(\*) = schwach signifikant ( $d < 0,10$ )

\* = signifikant ( $d < 0,05$ )

\*\* = hoch signifikant ( $d < 0,01$ )

Tab. 12: Ascheanteil (%), C/Ca- und Mg/Ca-Verhältnis (g/g) in der organischen Auflage 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S
Asche	21,44	+ 0,93	26,64	+ 4,91	20,45	+ 1,57	22,72	+ 3,69	19,62	+ 1,20	19,23	+ 2,36
C/Ca-Verh.	141,57	+ 36,39	41,18	+ 9,21	91,16	+ 11,97	103,83	+ 29,49	133,71	+ 8,02	63,67	+ 23,76
C/Mg-Verh.	732,59	+ 12,92	162,67	+ 46,70	304,68	+ 245,99	638,54	+ 382,62	1194,69	+ 117,68	415,52	+ 253,70

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

- n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)
- (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)
- \* = signifikant (d < 0,05)
- \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

**Tab. 13: pH-Werte (CaCl<sub>2</sub>) in der organischen Auflage der Versuchsf lächen**

Varianten	pH 1986/87	pH 1987/88	pH 1990	min <sup>1</sup> 1990	max <sup>2</sup> 1990
Null	3,3	3,0	3,5	3,4	3,5
Dolomit	3,6	5,1	4,8	4,8	4,9
mit Magnesit angerei- chertes silikatisches Gesteinsmehl	3,6	3,6	4,0	3,7	4,4
silikatisches Gesteinsmehl	3,5	3,4	3,5	3,3	3,8
Null (8)	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3
Dolomit (7)	4,1	4,1	3,9	3,7	5,2

<sup>1</sup> kleinster gemessener pH-Wert

<sup>2</sup> größter gemessener pH-Wert

Tab. 14: pH-Werte (CaCl<sub>2</sub>) in den Mineralbodenhorizonten

	A -Horizont			B -Horizont			B C -Horizont		
	1986/87	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90
	x	min <sup>1)</sup>	max <sup>2)</sup>	x	min <sup>1)</sup>	max <sup>2)</sup>	x	min <sup>1)</sup>	max <sup>2)</sup>
Null	3,5	3,2	3,2	3,7	3,7	3,7	3,9	3,9	3,9
Dolomit	3,5	3,5	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,9
Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl	3,5	3,4	3,3	3,7	3,6	3,8	3,8	3,8	3,9
sil. Gesteinsmehl	3,6	3,5	3,3	3,6	3,6	3,9	3,8	3,8	3,9
Null (8)	3,4	3,5	3,1	3,5	3,5	3,6	3,8	3,7	3,8
Dolomit (7)	3,2	3,5	3,3	3,4	3,4	3,4	3,8	3,7	3,9

<sup>1)</sup> kleinster gemessener pH-Wert

<sup>2)</sup> größter gemessener pH-Wert

Tab. 15: Basensättigung in den Mineralbodenhorizonten (% Ak<sub>e</sub>)

	A -Horizont			B -Horizont			B C -Horizont		
	1986/87	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90
	x	s	Sign <sup>1)</sup>	x	s	Sign <sup>1)</sup>	x	s	Sign <sup>1)</sup>
Null	4,68	6,77	6,88 + 0,84	4,71	4,05 + 0,46		4,28	4,38 + 0,46	
Dolomit	6,31	16,24	33,86 + 3,34 *	4,90	6,44 + 0,37 *	*	5,74	5,65 + 0,86	n.s.
Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl	5,44	9,73	13,53 + 2,14 *	8,25	6,00 + 1,30	(*)	5,51	6,14 + 0,86	n.s.
sil. Gesteinsmehl	4,92	6,46	10,85 + 1,44 *	4,39	4,85 + 0,47	n.s.	4,87	4,42 + 0,53	n.s.
Null (8)	4,39	5,30	11,22 + 1,23	3,68	4,36 + 0,04		5,05	3,49 + 0,76	
Dolomit (7)	7,76	7,14	24,02 + 6,89 n.s.	4,36	6,78 + 1,33	n.s.	4,69	4,57 + 0,11	n.s.

<sup>1)</sup> Unterschiede zur Nullfläche (bzw. Null (8) bei Dolomit (7)) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)  
 (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)  
 \* = signifikant (d < 0,05)  
 \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

Tab. 16: Austauschbares Calcium in den Mineralbodenhorizonten (% Ak<sub>e</sub>)

	A -Horizont			B -Horizont			B C -Horizont			
	1986/87	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	
		X	S	Sign <sup>1)</sup>	X	S	Sign <sup>1)</sup>	X	S	Sign <sup>1)</sup>
Null	1,90	4,05	3,70	+ 1,00	1,96	1,71	+ 0,35	1,46	1,55	+ 0,29
Dolomit	2,95	9,82	18,51	+ 3,19 (*)	1,89	2,29	+ 0,03	2,32	2,06	+ 0,44
Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl	1,99	3,15	5,32	+ 1,71	1,40	1,64	+ 0,49	1,68	1,64	+ 0,37
sil. Gesteinsmehl	2,10	3,90	6,59	+ 1,08 (*)	1,51	2,03	+ 0,36	1,43	1,89	+ 0,32
Null (8)	2,19	2,72	7,65	+ 2,18	1,30	1,89	+ 0,06	1,16	2,07	+ 0,62
Dolomit (7)	4,66	3,65	14,64	+ 5,20	1,68	2,98	+ 1,09	1,89	1,81	+ 0,50

<sup>1)</sup> Unterschiede zur Nullfläche (bzw. Null (8) bei Dolomit (7)) mit dem T-Test geprüft

- n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)
- (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)
- \* = signifikant (d < 0,05)
- \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)



Tab. 17: Austauschbares Magnesium in den Mineralbodenhorizonten (% Ak<sub>e</sub>)

	A -Horizont			B -Horizont			B C -Horizont		
	1986/87	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90	1987/88	1989/90
	$\bar{x}$	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S
Null	1,16	1,29	+ 0,14	0,88	0,95	0,75	+ 0,06	0,75	+ 0,06
Dolomit	1,64	4,61	+ 0,06 **	1,10	2,77	1,03	+ 0,34 (*)	1,68	+ 0,18 (*)
Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl	1,93	5,10	+ 0,60 ***	3,52	2,67	2,12	+ 0,48 *	1,89	+ 0,10 ***
sil. Gesteinsmehl	1,08	1,35	+ 0,50 *	0,84	1,27	0,86	+ 0,35 n.s.	1,10	+ 0,19 *
Null (8)	1,35	1,29	+ 0,12	0,79	0,93	0,76	+ 0,04	0,92	+ 0,31
Dolomit (7)	2,28	2,43	+ 1,77 n.s.	1,30	2,35	1,11	+ 0,05 ***	0,96	+ 0,20 n.s.

<sup>1)</sup> Unterschiede zur Nullfläche (bzw. Null (8) bei Dolomit (7)) mit dem T-Test geprüft

- n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)
- (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)
- \* = signifikant (d < 0,05)
- \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

**Tab. 18: Ausgebrachte Elementmengen bei einer Dosis von 3 t/ha Gesteinsmehl**

	Dolomit	mit Magnesit angereichertes silikatisches Gesteinsmehl	silikatisches Gesteinsmehl
ausgebrachtes Calcium	680 kg/ha	298 kg/ha	313 kg/ha
ausgebrachtes Magnesium	347 kg/ha	441 kg/ha	154 kg/ha
ausgebrachtes Kalium	-----	45 kg/ha	51 kg/ha

Tab. 19: Pflanzenverfügbare Calciumvorrat (kg/ha) im Humus und Mineralboden 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
organische Auflage	447,5	+ 122,3	759,5	+ 217,1	722,5	+ 75,6	515,3	+ 143,4	470,0	+ 14,1	570,5	+ 222,7
A <sub>n</sub> -Horizont	36,6	+ 12,1	190,5	+ 13,6	54,1	+ 19,9	59,0	+ 18,7	86,7	+ 30,5	158,9	+ 59,9
B <sub>v</sub> -Horizont	71,9	+ 13,2	96,6	+ 0,1	71,2	+ 22,7	89,2	+ 25,0	103,1	+ 18,1	167,8	+ 63,8
B <sub>v</sub> C <sub>v</sub> -Horizont	30,4	+ 5,2	49,8	+ 1,3	33,0	+ 5,4	40,7	+ 6,5	46,1	+ 18,2	41,7	+ 26,7
Gesamtvorrat	586,4	+ 102,3	1085,8	+ 217,1	872,4	+ 52,0	704,1	+ 174,4	705,9	+ 16,2	938,8	+ 373,1

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)  
 (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)  
 \* = signifikant (d < 0,05)  
 \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

Tab. 20: Pflanzenverfügbare Magnesiumvorrat (kg/ha) im Humus und Mineralboden 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)		
	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S	X	S	
organische Auflage	113,5	+ 43,1	196,0	+ 67,9	353,3	+ 261,6	111,0	+ 75,2	52,5	+ 3,5	100,5	+ 62,4	n.s.
A-Horizont <sub>h</sub>	12,5	+ 0,1	89,5	+ 8,8	41,8	+ 6,0	15,6	+ 4,6	14,4	+ 1,3	51,2	+ 12,8	n.s.
B-Horizont <sub>v</sub>	24,2	+ 0,4	70,8	+ 7,9	70,3	+ 12,4	34,4	+ 13,3	30,5	+ 3,3	79,8	+ 2,8	**
B C-Horizont <sub>v</sub>	8,9	+ 0,7	25,0	+ 3,3	23,4	+ 2,7	14,3	+ 2,2	12,5	+ 5,4	12,8	+ 3,4	n.s.
Gesamtvorrat	159,0	+ 43,6	381,3	+ 65,6	488,8	+ 260,1	175,3	+ 93,0	109,9	+ 4,3	244,3	+ 82,0	n.s.

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)  
 (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)  
 \* = signifikant (d < 0,05)  
 \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

Tab. 21: Pflanzenverfügbare Kaliumvorrat (kg/ha) im Humus und Mineralboden 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)		
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	
organische Auflage	79,0	+ 11,3	46,0	+ 5,7	103,3	+ 23,0	72,5	+ 13,7	78,5	+ 2,1	39,0	+ 4,2	*
A-Horizont <sub>p</sub>	19,8	+ 0,9	22,2	+ 0,5	19,3	+ 0,6	22,3	+ 1,2	29,3	+ 2,5	20,7	+ 0,5	n.s.
B-Horizont <sub>v</sub>	103,7	+ 1,0	105,6	+ 1,1	93,3	+ 11,1	119,8	+ 13,7	89,6	+ 19,6	96,6	+ 22,3	n.s.
B C-Horizont <sub>v v</sub>	71,3	+ 5,6	91,1	+ 12,1	60,9	+ 13,1	75,5	+ 0,96	54,3	+ 3,0	48,3	+ 11,8	n.s.
Gesamtvorrat	273,7	+ 5,7	264,8	+ 16,1	276,7	+ 34,5	290,1	+ 13,7	251,6	+ 17,0	204,5	+ 38,8	n.s.

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant (d > 0,10)  
 (\*) = schwach signifikant (d < 0,10)  
 \* = signifikant (d < 0,05)  
 \*\* = hoch signifikant (d < 0,01)

Tab. 22: Austauschbelegung der Bodensorbentien mit Kationsäuren 1989/90 (Ak<sub>0</sub>)

	Null			Dolomit			Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl			sil. Gesteinsmehl			Null(8)			Dolomit (7)			
	x	s	Sign	x	s	Sign	x	s	Sign	x	s	Sign	x	s	Sign	x	s	Sign	
																			1)
<b>Aluminium</b>																			
A-Horizont	73,16	+ 0,78	**	52,20	+ 1,38	**	68,45	+ 2,24	*	68,53	+ 2,62	*	68,33	+ 1,54		57,74	+ 6,72	n.s.	
B <sup>n</sup> -Horizont	83,74	+ 0,25	**	81,34	+ 0,16	**	82,75	+ 1,03	n.s.	82,15	+ 1,99	n.s.	83,83	+ 0,84		80,89	+ 2,14	n.s.	
B <sup>v</sup> C-Horizont	84,69	+ 1,63	n.s.	83,89	+ 1,46	n.s.	83,99	+ 1,92	n.s.	83,37	+ 1,07	n.s.	82,66	+ 2,11		85,36	+ 1,26	n.s.	
<b>Eisen</b>																			
A-Horizont	6,38	+ 0,29	n.s.	4,06	+ 2,10	n.s.	5,04	+ 0,85	*	4,76	+ 1,26	(*)	4,88	+ 1,19		4,84	+ 0,95	n.s.	
B <sup>n</sup> -Horizont	0,62	+ 0,30	n.s.	0,36	+ 0,18	n.s.	0,52	+ 0,32	n.s.	0,48	+ 0,38	n.s.	0,20	+ 0,08		1,04	+ 0,32	n.s.	
B <sup>v</sup> C-Horizont	0,04	+ 0,02	n.s.	0,26	+ 0,32	n.s.	0,03	+ 0,006	n.s.	0,05	+ 0,076	n.s.	0,02	+ 0,00		0,10	+ 0,11	n.s.	
<b>Mangan</b>																			
A-Horizont	0,47	+ 0,09	n.s.	1,06	+ 0,60	n.s.	0,63	+ 0,20	n.s.	1,33	+ 0,82	n.s.	2,24	+ 0,83		0,91	+ 0,45	n.s.	
B <sup>n</sup> -Horizont	1,46	+ 0,30	n.s.	1,72	+ 0,11	n.s.	1,18	+ 0,33	n.s.	1,87	+ 0,83	n.s.	2,37	+ 0,23		1,34	+ 0,65	n.s.	
B <sup>v</sup> C-Horizont	1,72	+ 0,37	n.s.	1,34	+ 0,47	n.s.	1,02	+ 0,27	n.s.	1,68	+ 0,68	n.s.	2,46	+ 0,95		0,58	+ 0,59	n.s.	
<b>Wasserstoff</b>																			
A-Horizont	13,12	+ 0,23	*	8,84	+ 0,45	*	12,37	+ 0,24	(*)	14,45	+ 1,64	n.s.	13,33	+ 0,06		12,51	+ 0,33	n.s.	
B <sup>n</sup> -Horizont	10,19	+ 0,64	n.s.	10,15	+ 0,23	n.s.	9,56	+ 0,06	(*)	10,73	+ 0,93	n.s.	9,26	+ 0,74		9,97	+ 0,48	n.s.	
B <sup>v</sup> C-Horizont	9,29	+ 0,81	n.s.	8,78	+ 0,46	n.s.	9,45	+ 1,18	n.s.	9,98	+ 0,776	n.s.	9,82	+ 0,39		9,28	+ 1,62	n.s.	

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant ( $d > 0,10$ )

(\*) = schwach signifikant ( $d < 0,10$ )

\* = signifikant ( $d < 0,05$ )

\*\* = hoch signifikant ( $d < 0,01$ )

Tab. 23: Nadelspiegelwerte des 1. und 3. Nadeljahrganges (mg/g) 1989/90

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
Stickstoff												
1. Nadeljahrg.	15,833	+ 0,649	19,892	+ 0,727	16,636	+ 0,694	14,465	+ 0,980	12,342	+ 0,690	13,814	+ 0,431
3. Nadeljahrg.	15,945	+ 0,518	16,402	+ 0,460	14,455	+ 0,637	14,114	+ 0,795	11,643	+ 1,605	13,570	+ 1,562
Phosphor												
1. Nadeljahrg.	1,257	+ 0,071	1,232	+ 0,113	1,240	+ 0,153	1,050	+ 0,098	0,992	+ 0,067	1,258	+ 0,014
3. Nadeljahrg.	0,925	+ 0,020	0,917	+ 0,046	0,603	+ 0,296	0,829	+ 0,070	0,755	+ 0,093	0,894	+ 0,120
Calcium												
1. Nadeljahrg.	3,379	+ 0,376	3,845	+ 0,324	3,661	+ 0,279	4,643	+ 1,103	3,804	+ 0,123	4,880	+ 0,488
3. Nadeljahrg.	5,560	+ 0,195	7,757	+ 0,210	4,621	+ 0,788	7,217	+ 1,851	6,702	+ 0,925	8,695	+ 0,508
Magnesium												
1. Nadeljahrg.	0,989	+ 0,088	1,052	+ 0,070	0,944	+ 0,231	0,886	+ 0,138	0,789	+ 0,116	1,093	+ 0,125
3. Nadeljahrg.	0,624	+ 0,045	0,842	+ 0,020	0,580	+ 0,224	0,457	+ 0,080	0,613	+ 0,082	0,692	+ 0,023
Kalium												
1. Nadeljahrg.	4,922	+ 0,111	4,904	+ 0,111	5,368	+ 0,871	4,684	+ 1,371	4,639	+ 0,353	3,777	+ 0,029
3. Nadeljahrg.	4,504	+ 0,252	3,237	+ 0,078	3,9436	+ 1,075	4,019	+ 1,319	3,551	+ 0,020	2,924	+ 0,036

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant ( $d > 0,10$ )

(\*) = schwach signifikant ( $d < 0,10$ )

\* = signifikant ( $d < 0,05$ )

\*\* = hoch signifikant ( $d < 0,01$ )

Tab. 24: Geschätzte Benadelungsdichte an den für chemische Nadelanalysen gewonnenen Ästen

	Null		Dolomit		Mg-angereichertes sil. Gesteinsmehl		sil. Gesteinsmehl		Null(8)		Dolomit (7)	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
1. Nadeljahrg.	94,3	+ 5,4	90,0	+ 10,0	91,0	+ 8,8	97,3	+ 4,6	94,4	+ 10,1	94,6	+ 6,9
2. Nadeljahrg.	91,4	+ 3,8	82,9	+ 7,6	87,6	+ 8,9	92,3	+ 7,5	90,0	+ 14,1	95,5	+ 5,2
3. Nadeljahrg.	85,7	+ 5,4	75,7	+ 11,3	81,9	+ 11,2	75,4	+ 19,6	82,7	+ 16,2	95,5	+ 6,9
4. Nadeljahrg.	78,6	+ 6,9	62,9	+ 17,0	74,8	+ 16,3	63,8	+ 22,4	62,7	+ 15,6	81,8	+ 18,3

1) Unterschiede zur Nullfläche mit dem T-Test geprüft

2) Unterschiede zur Nullfläche (8) mit dem T-Test geprüft

n.s. = nicht signifikant ( $d > 0,10$ )

(\*) = schwach signifikant ( $d < 0,10$ )

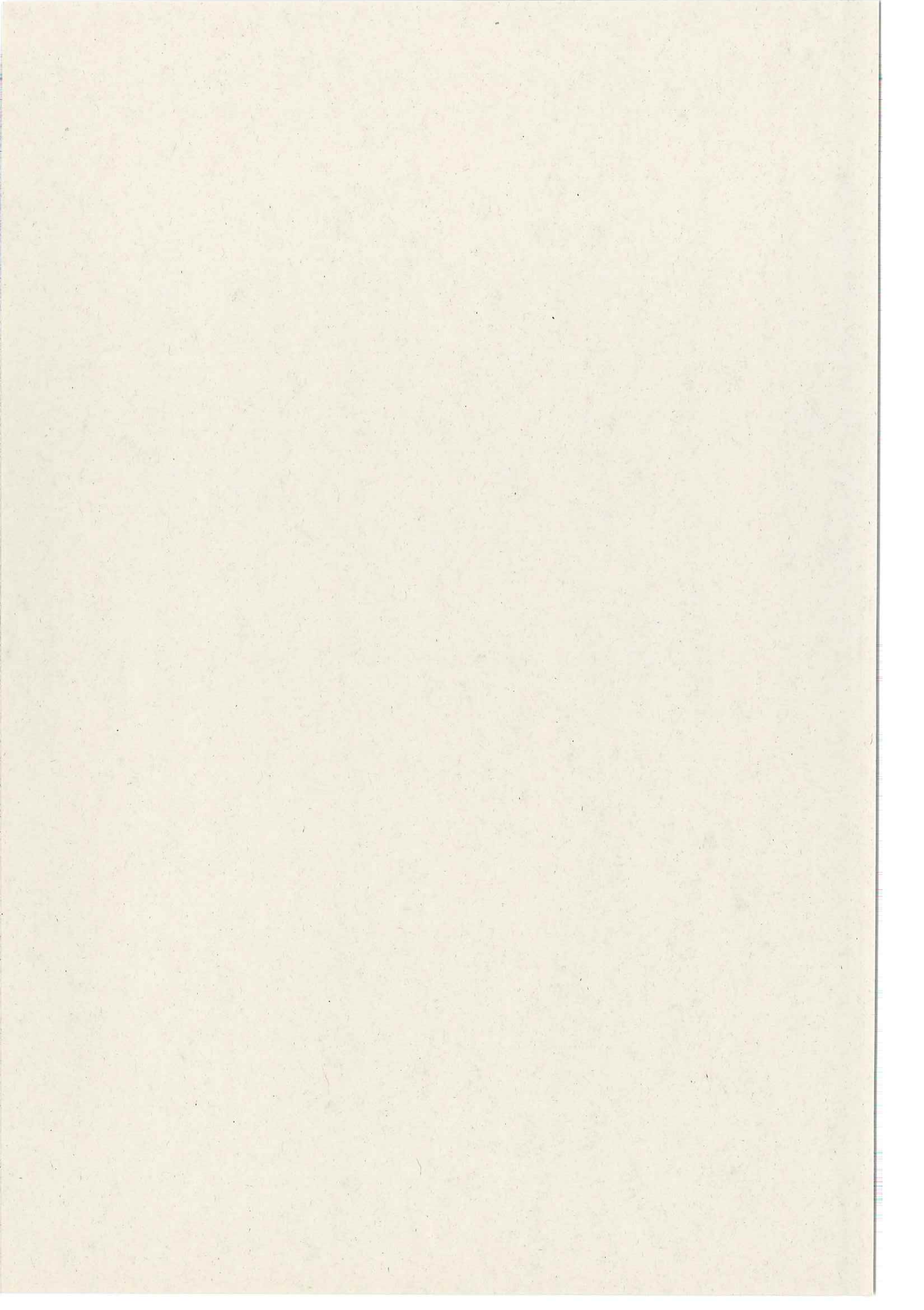
\* = signifikant ( $d < 0,05$ )

\*\* = hoch signifikant ( $d < 0,01$ )



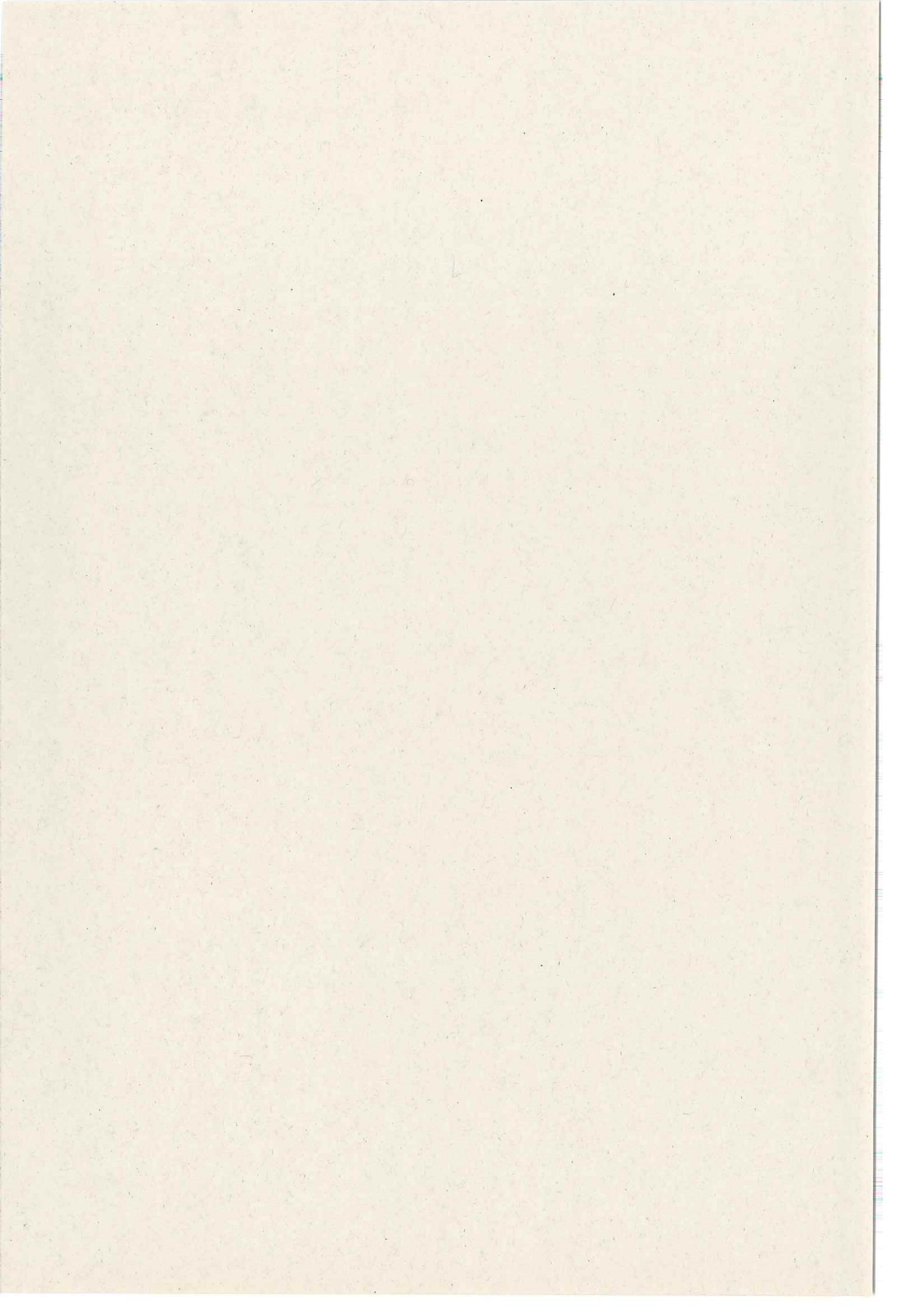
Tab. 25: Farbe der Nadeln an den für chemische Nadelanalysen gewonnenen Ästen  
 (% der Gesamtzahl)

	Null	Dolomit	Mg-anger. sil. Gesteinsmehl	sil. Gesteinsmehl	Null(8)	Dolomit (7)
Grün	100	93	98	100	93	98
Gelb	--	1	--	--	--	--
Braun	--	6	2	--	7	2
-----						
grüne Nadeln mit gelben Spitzen	86	71	50	79	36	36
grüne Nadeln mit gelben Flecken	43	57	45	50	55	45



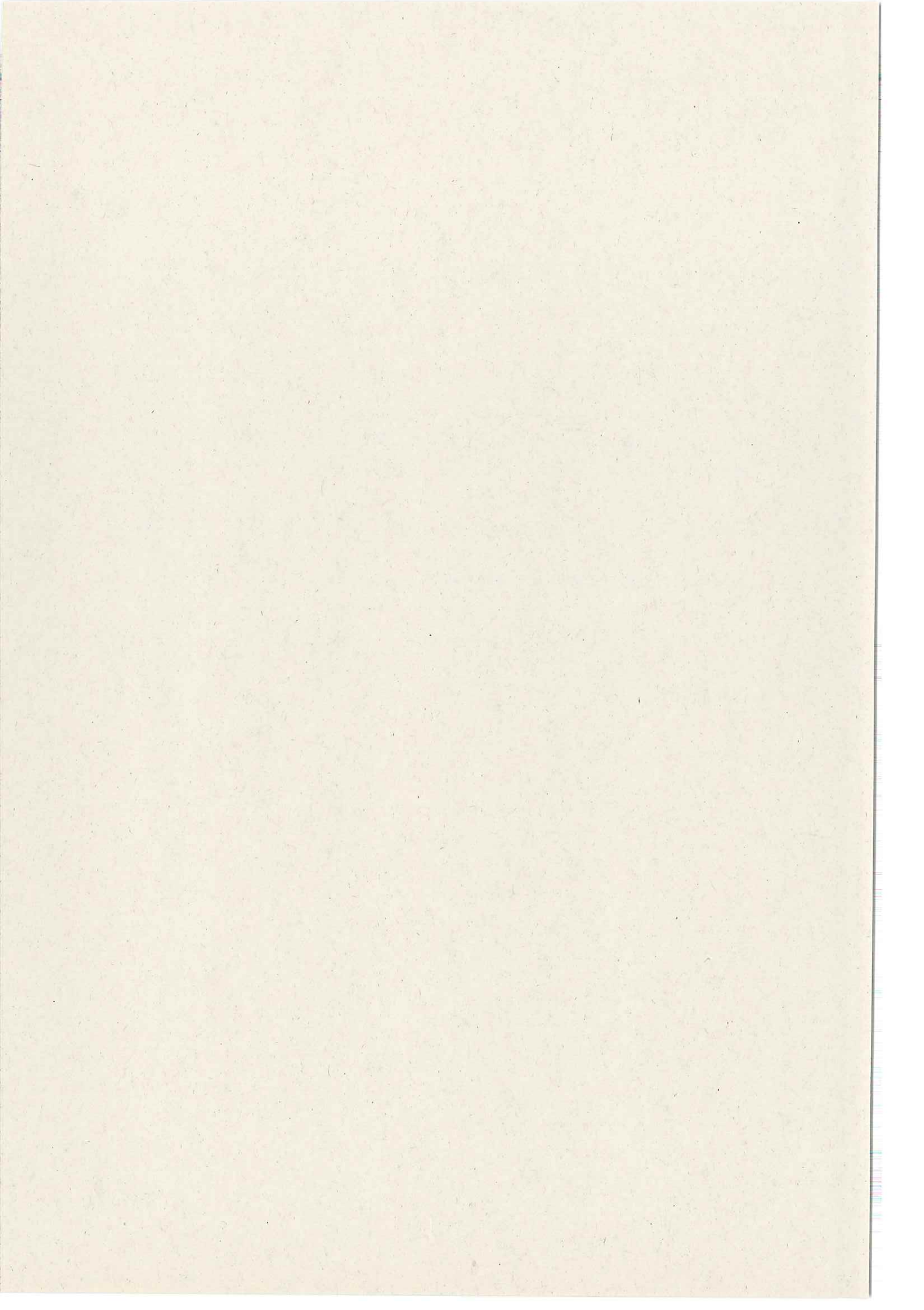
**Veränderungen an Tonmineralen  
zwischen 1988 und 1990  
in Böden nach Gesteinsmehlbehandlung  
im Forstamt Linz**

**Rüdiger Butz-Braun**



## **INHALTSVERZEICHNIS**

	Seite
<b>1 EINLEITUNG</b>	81
<b>2 METHODENBESCHREIBUNG</b>	82
<b>3 ERGEBNISSE</b>	83
3.1 Geologie und Ausgangsgesteine	83
3.2 Veränderungen an Tonmineralen innerhalb der einzelnen Parzellen zwischen 1988 und 1990	84
<b>4 DISKUSSION</b>	87
<b>5 ZUSAMMENFASSUNG - SUMMARY</b>	89
<b>6 LITERATURVERZEICHNIS</b>	90
<b>7 DANKSAGUNG</b>	92
<b>8 ANHANG 1: TABELLEN</b>	93
<b>9 ANHANG 2: ABBILDUNGEN</b>	99



## 1 EINLEITUNG

Tonminerale besitzen aufgrund ihrer geringen Korngröße und ihrer blättchenförmigen Struktur große spezifische Oberflächen, an denen Kationen (z.B. Kalium, Calcium und Magnesium) auf dem Wege des Ionenaustauschs gebunden und wieder freigesetzt werden können. Wichtige Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Tonminerale sind die unterschiedliche Schichtladung und die unterschiedlichen Anteile an Zwischenschichtkationen (Glimmerminerale: vor allem Kalium) bzw. Hydroxidzwischenschichten (Chlorite). Je geringer die Schichtladung und je höher der Anteil an Zwischenschichtkationen ist, um so besser ist die Fähigkeit der Tonminerale, Nährstoffe nachzuliefern. Durch Hydrolyse bzw. durch den Einfluß saurer Lösungen nimmt die Schichtladung ab. Damit nimmt gleichzeitig die Fähigkeit, Zwischenschichtkationen auszutauschen, zu. In stark sauren Böden, bei hohen Aluminiumkonzentrationen, kommt es durch den Einbau von Aluminiumhydroxidschichten zur Bildung sekundärer Chlorite (Bodenchlorite) mit einem geringen Sorptionsvermögen. Somit können sich Tonmineralveränderungen sowohl positiv als auch negativ auf den Fruchtbarkeitszustand von Böden auswirken. Wie in vielen Lehrbüchern der Bodenkunde zusammenfassend beschrieben ist (z.B. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1989; MÜLLER et al., 1989), durchlaufen die Tonminerale folgende Entwicklungsstadien: Glimmer (Illit) und Chlorite —> Wechsellagerungsminerale —> Vermiculite —> Smektite —> sekundäre Chlorite. In sehr stark versauerten Böden (pH < 3) werden die jeweiligen Tonminerale ganz aufgelöst.

Im wesentlichen werden die Veränderungen der Tonminerale von der Niederschlagsmenge, dem Ausgangsgestein und den Drainagebedingungen gesteuert (z.B. VALETON, 1988; MILLOT, 1970).

Mineralogische Untersuchungen geben auch Hinweise darauf, daß die erhebliche anthropogen bedingte Bodenversauerung in qualitativer und quantitativer Hinsicht Auswirkungen auf den Tonmineralbestand der Böden hat (TARRAH, 1989). Eine durch saure Luftschadstoffdepositionen ausgelöste Entwicklung bis hin zur Auflösung von Tonmineralen hätte, wie oben dargelegt, entscheidende Auswirkungen auf den Bodenchemismus und die Pflanzenernährung.

Werden der Boden und damit auch die Tonminerale mit z.B. Kalium, Calcium oder Magnesium angereichert, können diese Kationen wieder in die aufgeweiteten Zwischenschichten, zumindest der Illite, eingelagert werden, was wiederum zu einer Stabilisierung dieser Tonminerale führt (NIEDERBUDDE und KUSSMAUL, 1978; NIEDERBUDDE und SCHWERTMANN, 1980; VALETON, 1988).

Die hier beschriebenen Untersuchungen sollen mögliche Entwicklungsreihen und Stabilisierungseffekte nach Gesteinsmehlbehandlung aufzeigen. Die untersuchten Proben aus dem Forstamt Linz wurden 1988 und 1990 aus dem  $A_{h-}$ ,  $B_v-$  und  $B_{vC_v}$ -Horizont eines Waldbodens im

Rahmen des von SCHÜLER (1991, im gleichen Band) beschriebenen Versuches entnommen. Es sind homogenisierte Mischproben aus 5 (1988), bzw. 10 (1990) Einzelproben. Sie stammen aus acht Parzellen, die unterschiedlich behandelt wurden:

- Parzelle 1 und 7: mit 3 to/ha Dolomit;
- Parzelle 4 und 5: mit 3 to/ha silikatisches Gesteinsmehl;
- Parzelle 3 und 6: mit 3 to/ha mit Magnesit angereichertes silikatisches Gesteinsmehl;
- Parzelle 2 und 8: unbehandelt.

Im folgenden werden die Unterschiede der Tonmineralausstattung aus den Proben der unterschiedlichen Probennahmeterminen erläutert.

## 2 METHODENBESCHREIBUNG

Alle 48 Proben wurden mit Ultraschall behandelt und anschließend nach dem Atterbergverfahren fraktioniert. Die fraktionierte Teilprobe  $< 6,3 \mu\text{m}$  wurde in Form einer Paste ("Smear on glass", s. bei VORTISCH, 1982) auf einen Präparateträger aufgetragen, um so eine möglichst gute Textur der Tonminerale zu erhalten. Anschließend wurden die Minerale mit einem Röntgendiffraktometer bestimmt. Jedes in der Probe vorhandene Mineral erzeugt in dem Röntgendiffraktogramm bei bestimmten 2 Theta-Winkeln charakteristische Reflexe, aus denen die Basisabstände (d-Werte) der einzelnen Minerale berechnet werden können. Zur Dokumentation der Untersuchungen sind die Röntgendiffraktogramme im Anhang 2 (Abb. 3 - 17) dargestellt. Alle Proben wurden wie folgt geröntgt:

- a) lufttrocken:  $30-2^\circ 2\theta$
- b) Ethylenglycol ( $60^\circ\text{C}$ ,  $\geq 15$  h; BRUNTON 1955):  $22-2^\circ 2\theta$
- c) thermische Behandlung (2 h; geröntgt nach Abkühlung auf Raumtemperatur)
  1.  $350^\circ\text{C}$ ,  $22-2^\circ 2\theta$ ;
  2.  $450^\circ\text{C}$   $15-2^\circ 2\theta$ ;
  3.  $550^\circ\text{C}$   $22-2^\circ 2\theta$ .

Von den Proben des Ausgangsmaterials (Tonschiefer und Grauwacke) wurde je ein Trockenpulverpräparat angefertigt.



Parallel zur Röntgendiffraktometrie wurden die fraktionierten Teilproben ( $< 6,3 \mu\text{m}$ ) auf ihre chemische Zusammensetzung hin analysiert. Dazu wurde die Teilprobe mit  $\text{LiBO}_4$  gemischt, bei  $1200^\circ\text{C}$  geschmolzen und mittels einer energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht.

### 3. ERGEBNISSE

#### 3.1 Geologie und Ausgangsgesteine

Bei dem Ausgangsgestein, welches in den Parzellen 5 - 8 relativ dicht unterhalb der Oberfläche ansteht, handelt es sich um eine Abfolge von milden bis härteren Tonschiefern, die mit plattigen Grauwacken auf kleinem Raum wechsellagern. Nach BURRE (1978) zählt diese lithographische Einheit zu den Herdorfer Schichten (Siegener-Stufe - Unterdevon).

Die röntgendiffraktometrische Untersuchung ergab, daß die Tonschiefer, neben einem Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit (vermutlich eine Verwitterungsneubildung des Chlorits) im wesentlichen aus Illit/Muscovit bestehen. Chlorit tritt in kleineren Mengen auf. In den Grauwacken ist der Chloritanteil deutlich höher als bei den Tonschiefern, nämlich etwa gleich dem Illit/Muscovit-Anteil. Wechsellagerungsminerale treten hier nur untergeordnet auf.

Da die Tonschiefer und Grauwacken auf engem Raum (innerhalb weniger Dezimeter) wechsellagern und aus unterschiedlichen Mineralen bestehen, ist ein Vergleich zwischen den Parzellen nur bedingt möglich. Zudem ist der Verwitterungshorizont der Parzellen 1-4 deutlich mächtiger und weist damit andere Drainagebedingungen auf als die geklüfteten und geschieferten Gesteine der Parzellen 5-8, in denen ebenfalls (aufgrund des inhomogenen Ausgangsgesteins) unterschiedliche Drainagebedingungen auftreten können.

Somit können zwei Parameter, die die Veränderungen von Tonmineralen beeinflussen (s.o.), von Parzelle zu Parzelle unterschiedlich sein. Ein Vergleich der Tonminerale ist daher nur zwischen den beiden Probenahmeterminen (1988 und 1990) innerhalb einer Parzelle möglich - vorausgesetzt, daß es sich bei beiden Proben um das gleiche Ausgangsmaterial handelt.

### 3.2 Unterschiede bei Tonmineralen innerhalb der einzelnen Parzellen aus den Proben von 1988 und 1990

Die Tonminerale der einzelnen Bodenhorizonte, die genetisch aus den Grauwacken und Ton-schiefern entstanden sind, bestehen aus Kaolinit (wenig), Chlorit, Illit, einem Wechsella-gerungsmineral Chlorit/Vermiculit und seltener einem Wechsella-gerungsmineral Illit/Vermiculit (z.T. quellfähig). Semiquantitativ feststellbare Unterschiede sind hier durch die Abnahme von Chlorit und chloritischen Schichtanteilen in Chlorit/Vermiculit Wechsella-gerungsmineralen bei gleichzeitiger Zunahme vermiculitischer Tonminerale (bzw. Schichtanteile) gekennzeichnet. Ebenso gilt dies, jedoch in geringerem Umfang, auch für Illite. In Tab. 1 ist das Verhältnis der wichtigsten Basisreflexe für Tonminerale dargestellt. Bei der Berechnung wurden die Peakflä-chen - nach Umrechnung mit Korrekturfaktoren - zueinander in ein Verhältnis gesetzt. In den Röntgendiffraktogrammen des  $B_V C_V$ -Horizonts können aufgrund der steilen Reflexe bei der Flächenberechnung relativ große Fehler auftreten.

Als weiterer Maßstab für quantitative Unterschiede kann auch das Verhältnis zwischen 14 Å-Reflex und 7 Å-Reflex genommen werden, wie aus Tab. 2 zu ersehen ist.

In Tab. 3 sind die chemischen Zusammensetzungen aller Proben dargestellt. Weiterhin sind die Röntgendiffraktogramme aller Proben von 1988 und 1990 (unbehandelt; Ethylenglycol-behandelt; thermisch behandelt nach 350° C, 450° C und 550° C) im Anhang (Abb. 3 bis 17) nebeneinander aufgezeichnet. Besonders an den Röntgendiffraktogrammen der thermisch be-handelten Proben sind Veränderungen der Chlorit- bzw. Vermiculitschichten innerhalb der Wechsella-gerungsminerale Chlorit/Vermiculit zu erkennen.

Je geringer der Chloritanteil in dem Wechsella-gerungsmineral ist, um so schwächer ist die thermische Stabilität. Nimmt bei thermischer Behandlung der nahe 12 Å gelegene Peak in sei-ner Intensität ab, so haben dementsprechend auch die Schichtanteile thermisch stabilen Chlorits in den verschiedenen Wechsella-gerungsmineralen abgenommen (signifikant in den Proben der  $A_h$ -Horizonte, Abb. 5 bis 7). Entsprechendes gilt für thermisch stabilen Chlorit und zugehöri-gen 14 Å-Reflex, der sich bei 550° C erheblich verstärkt. Die hydratisierten Dreischichtsilika-te sind im allgemeinen schon ab 350° C irreversibel dehydratisiert (Kontraktion auf 10 Å). (Zusammenfassung bei WEAVER und POLLART, 1973; VORTISCH, 1983).

#### Parzelle 1 (Dolomit)

Das Verhältnis der Tonminerale Chlorit (7 Å), Illit (10 Å) und der Wechsella-gerungsminerale (14 Å) bleibt bei alleiniger Berücksichtigung der Ethylenglycol-behandelten Präparate in allen drei Horizonten in etwa unverändert (Tab. 1, im Anhang 1 u. Abb. 1, im Anhang 2).

Bei thermischer Behandlung zeigt sich jedoch eine starke Abnahme des Chlorits und der chloritischen Schichtanteile innerhalb des Wechsellagerungsminerals Chlorit/Vermiculit, d.h., die Probe aus 1990 ist stärker verwittert.

#### Parzelle 2 (unbehandelte Fläche)

Der Anteil der Wechsellagerungsminerale hat auf Kosten von Illit und Chlorit besonders im  $A_h$ -Horizont deutlich zugenommen (Tab. 1, im Anhang 1 und Abb. 1, im Anhang 2). Chloritschichten sind im  $A_h$ -Horizont in aufweitbare Dreischichtsilikate umgewandelt worden (Abb. 3, im Anhang 2). Im  $B_v$ -Horizont hat der Chloritanteil in dem Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit ebenfalls abgenommen. Im  $B_v C_v$ -Horizont sind keine qualitativen Unterschiede nachzuweisen.

#### Parzelle 3 (mit Magnesit angereichertes silikatisches Gesteinsmehl)

Im  $B_v C_v$ -Horizont ist eine relative Zunahme des 14 Å Peaks (Wechsellagerungsmineral) und Abnahme des 7 Å Peaks (überwiegend Chlorit) zu beobachten (Tab. 1, im Anhang 1 und Abb. 1, im Anhang 2). Im  $A_h$ - und  $B_v$ -Horizont sind dagegen bei Betrachtung der Ethylenglycol-behandelten Präparate keine Unterschiede der Tonmineralanteile zu erkennen.

Nach der thermischen Behandlung zeigt sich jedoch, daß der Chloritanteil in dem Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit des  $A_h$ -Horizonts so stark abgenommen hat, daß in der Probe aus 1990 nunmehr Vermiculit- und Smektitschichten dominieren (Abb. 3 bis 7, im Anhang 2).

#### Parzelle 4 (silikatisches Gesteinsmehl)

Unterschiede der Tonmineralanteile zeigen sich in allen drei Horizonten. Auffällig ist die Zunahme von Illit im  $B_v$ -Horizont und die relativ große Zunahme der Wechsellagerungsminerale im  $B_v C_v$ -Horizont (Tab. 1, im Anhang 1 und Abb. 1, im Anhang 2).

Wie in den Parzellen 2 und 3 ist es auch hier zur Bildung von aufweitbaren Dreischichtsilikaten im  $A_h$ -Horizont gekommen. Der Anteil eines Wechsellagerungsminerals Chlorit/Vermiculit war gegenüber den Parzellen 2 und 3 jedoch auch schon 1988 relativ niedrig, so daß nur eine geringfügigere Aufweitung der Vermiculite stattgefunden hat.

Auch im  $B_v$ -Horizont sind hier Tendenzen zur Bildung quellfähiger Tonminerale zu erkennen (Abb. 8 bis 12, im Anhang 2).

#### Parzelle 5 (silikatisches Gesteinsmehl)

Geringfügige quantitative Unterschiede treten in allen drei Horizonten auf. Wie in Parzelle 4 ist auch hier eine Zunahme des Illitanteils im  $B_v$ -Horizont zu verzeichnen.

Wie die thermischen Behandlungen zeigen, hat der Chloritanteil des Wechsellagerungsminerals Chlorit/Vermiculit in allen drei Horizonten etwas abgenommen. Aufweitbare Dreischichtsilikate haben sich nicht gebildet.

#### Parzelle 6 (mit Magnesit angereichertes silikatisches Gesteinsmehl)

Die Verteilung der Tonminerale hat sich kaum verändert. Im  $B_v C_v$ -Horizont ist eine leichte Abnahme von Illit und Chlorit zu verzeichnen (Tab. 1, im Anhang 1 und Abb. 2, im Anhang 2).

In allen drei Horizonten sind keine gravierenden qualitativen Unterschiede zwischen den beiden Probenahmeterminen erkennbar. Schon in der Probe aus 1988 sind im  $A_h$ -Horizont quellfähige Tonminerale vorhanden, die auch in der Probe aus 1990 unverändert auftreten.

#### Parzelle 7 (Dolomit)

Im  $A_h$ - und insbesondere im  $B_v$ -Horizont treten erhebliche quantitative (Tab. 1, im Anhang 1 und Abb. 2, im Anhang 2) und qualitative Veränderungen auf. Der Anteil eines Chlorit/Vermiculit Wechsellagerungsminerals war im  $A_h$ -Horizont bereits 1988 schon sehr gering, der Vermiculitanteil entsprechend größer. In der Probe aus 1990 hat sich der d-Wert von 14 Å auf 13,4 Å vollständig verkleinert. Nach Etyhlynglycol-Behandlung weitet der Reflex wiederum auf 14 Å auf (Abb. 3 und 4, im Anhang 2). Ein Wechsellagerungsmineral Illit/Vermiculit-Smektit hat sich neu gebildet. Da der Illitanteil stark abgenommen hat, ist es auch möglich, daß ein Teil der Illite vermiculitisiert wurde. Dafür spricht auch, daß in der chemischen Analyse ein Defizit von 0,6 %  $K_2O$  auftritt. Chlorit ist kaum noch vorhanden.

Auch im  $B_v$ -Horizont sind Anteile quellfähiger Tonminerale zu erkennen (Abb. 8 bis 12, im Anhang 2). Im  $B_v C_v$ -Horizont treten die Tonminerale unverändert auf.

#### Parzelle 8 (unbehandelte Fläche)

Die Tonminerale dieser Parzelle haben sich in den Proben von beiden Probenahmeterminen nur geringfügig verändert. Nur im  $A_h$ -Horizont tritt eine nennenswerte Zunahme der Wechsellagerungsminerale, bzw. Vermiculite und eine Abnahme von Chlorit und Illit auf.

#### 4 DISKUSSION

Naturgemäß - so auch hier in allen acht Parzellen - nimmt der Anteil der Verwitterungsneubildungen (Wechselagerungsminerale und aufgeweitete Dreischichtsilikate) vom  $B_V C_V$ -Horizont über den  $B_V$ -Horizont zum  $A_h$ -Horizont deutlich zu.

In den Proben des  $A_h$ -Horizonts aus 1990 hat, gegenüber den Proben aus 1988, der Anteil an Vermiculit, bzw. vermiculitischen Schichten der Wechselagerungsminerale auf Kosten der Chlorite bzw. chloritischen Schichten und z.T. auch Illite zugenommen. Im  $B_V$ - und  $B_V C_V$ -Horizont tritt dieser Trend nicht so deutlich hervor. Das bedeutet, daß zumindest im  $A_h$ -Horizont aller Parzellen eine Degradation der Tonminerale zu erkennen ist.

Die  $SiO_2$ - und auch die Quarz-Anteile nehmen im  $A_h$ - und  $B_V$ -Horizont auf Kosten der  $Al_2O_3$ - und  $Fe_2O_3$ -Anteile in den Proben aus 1990 zu (Tab. 3, im Anhang 1). Im  $B_V C_V$ -Horizont haben sich dagegen die Quarz- und  $SiO_2$ -Anteile nicht signifikant verändert.

Bei der Verwitterung von Illiten und Chloriten entstehen nach WILSON und NADEAU (1985) zunächst durch die Abfuhr von Kalium aus den Zwischenschichten der Illite bzw. Auflösung der Brucitschicht der Chlorite die Wechselagerungsminerale Illit/Vermiculit bzw. Chlorit/Vermiculit. Bei fortschreitender Verwitterung werden daraus nach weiterer Aufweitung Smektite gebildet. SCHWERTMANN (1976) beschrieb die Vermiculitisierung der Chlorite in nicht zu sauren Böden und humusarmen Systemen; TRIBUTH (1976) beschrieb die Umwandlung der glimmerartigen Schichtsilikate zu aufweitbaren Dreischicht-Tonmineralen. In stark versauerten Böden (CHURCHMAN, 1980) lösen sich die Tonminerale allmählich komplett auf.

1988 lagen bereits in allen Proben der Versuchspartellen Wechselagerungsminerale vor. Eine Zunahme der Vermiculite bzw. der Vermiculitschichten fand innerhalb des Wechselagerungsminerals Chlorit/Vermiculit in den Parzellen 1 bis 7 zwischen 1988 und 1990 statt.

Darüberhinaus ist es in den Parzellen 1 bis 4 und insbesondere in der Parzelle 7, wie oben beschrieben, zur Bildung quellfähiger Tonminerale - also einer Art Smektitisierung - vermutlich aus nicht quellfähigem Vermiculit gekommen.

In den Parzellen 6 bis 8 konnten bereits schon in den Proben aus 1988 quellfähige Tonminerale identifiziert werden.

In Parzelle 8, der Nullfläche, sind keine gravierenden qualitativen, sondern nur quantitative Veränderungen zu erkennen.

Die teilweise starke Zunahme von Silizium und Abnahme von Aluminium und Eisen (z.B. Parzelle 1,  $A_h$ -Horizont, Tab. 3, im Anhang 1) beruht wahrscheinlich auf der Abnahme des Tonmineralanteils innerhalb der untersuchten Fraktion. Die Verringerung des Kaliumgehaltes in den Parzellen 2 ( $B_V C_V$ ), 4 ( $B_V C_V$ ), 5 ( $B_V C_V$ ) und 7 ( $A_h$ - und  $B_V$ -Horizont) steht wahrscheinlich in Zusammenhang mit der Verringerung des Illitanteils.

Die tonmineralogischen Untersuchungen haben gezeigt, daß in allen Parzellen innerhalb eines Zeitraumes von nur zwei Jahren Tonmineraldegradationen nachgewiesen werden können. Dabei sind in den  $A_h$ -Horizonten in sieben der acht untersuchten Parzellen neben quantitativen auch qualitative Veränderungen eingetreten. Die Umwandlung der Tonminerale ist auch im  $B_V$ -Horizont an einigen Parzellen erkennbar und tritt im  $B_V C_V$ -Horizont ganz zurück.

Ob dabei die Behandlung mit Bodenhilfsstoffen die Vermiculitisierung und Smektitisierung beeinflusst hat, ist nicht sicher zu belegen, da es auch auf der Nullfläche (Parzelle 2) zu den gleichen Verwitterungsneubildungen wie in den behandelten Parzellen gekommen ist. Betrachtet man dagegen die Tonmineralveränderungen auf Parzelle 7 (Dolomit), die etwa die gleichen Voraussetzungen wie Parzelle 8 (Nullfläche) hat, ist es durchaus möglich, daß es durch die Zufuhr von basisch wirkenden Kationen zu einer Abpufferung und damit "nur" zu einer Smektitisierung gekommen ist. In Parzelle 8 ist dagegen eine Auflösung der Tonminerale nicht auszuschließen.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Tonminerale von Bodenproben des  $A_h$ -,  $B_v$ - und des  $B_vC_v$ -Horizontes, die 1988 und 1990 aus sechs mit Gesteinsmehlen behandelten und zwei unbehandelten Parzellen einer Versuchsfläche entnommen wurden, sind röntgendiffraktometrisch untersucht und miteinander verglichen worden.

Nach nur zwei Jahren hat sich in allen acht Parzellen im  $A_h$ -Horizont durch Vermiculitisierung und Smektitisierung der Chlorite und in geringem Umfang auch der Illite der Anteil an Wechsellagerungsmineralen erhöht. Besonders deutlich wird in einigen Parzellen die Zunahme der Vermiculitschichten bei gleichzeitiger Abnahme der Chloritschichten innerhalb des Wechsellagerungsminerals Chlorit/Vermiculit. Diese Degradation der Tonminerale ist zum Teil auch noch im  $B_v$ -Horizont zu erkennen und tritt im  $B_vC_v$ -Horizont ganz zurück.

Es gibt keine sicheren Hinweise dafür, daß die auf den Parzellen durchgeführte Behandlung mit Gesteinsmehlen den Tonmineralabbau wesentlich beeinflußt hat.

## SUMMARY

Clay minerals from soils of the  $E_h$ -,  $B_v$  and the  $B_vC_v$ -horizon, taken in 1988 and 1990 from six fertilized and two untreated plots of the same research area, have been compared after investigation by x-ray diffraction (XRD).

After already two years, the part of interstratified minerals in the  $E_h$ -horizons of all plots has increased, caused by vermiculitization and smectitization of chlorites and, in a lower range, of micas. In some plots the increase of vermiculite layers with a simultaneous decrease of chlorite layers within the interstratified chlorite-vermiculite is highly significant. This degradation of clay minerals is also partly noticed in the  $B_v$ -horizon and disappears in the  $B_vC_v$ -horizon.

There are no reliable indications for an influence of fertilization on the decomposition of the clay minerals.

## 6 LITERATURVERZEICHNIS

- BRUNTON, G., 1955: Vapor pressure glycolation of oriented clay minerals. Amer. Miner., 40, 124-126
- BURRE, O., 1978: Erläuterung zu Blatt 5309 Königswinter, Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Krefeld
- CHURCHMAN, G.J., 1980: Clay minerals formed from micas and chlorites in some New Zealand soils. Clay minerals 15, 59-76
- MÜLLER, G., EHWALD, E., FÖRSTER, I., HICKISCH, B., REUTER, G., 1989: Pflanzenproduktion - Bodenkunde. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 380 S.
- MILOT, G., 1970: Geology of clays - Weathering, sedimentology, geochemistry. Springer Vlg. Masson & Cie, New York, Heidelberg, Berlin, Paris, 429 S.
- NIEDERBUDDE, E.A. und KUSSMAUL, H., 1978: Tonmineraleigenschaften und -umwandlungen in Parabraunerde-Profilpaaren unter Acker und Wald in Süddeutschland. Geoderma 20, 239-255
- NIEDERBUDDE, E.A. und SCHWERTMANN, U., 1980: Clay mineralogy of soils. Geol. Jb., D 39, 99-114
- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P., 1984: Lehrbuch der Bodenkunde. Enke Verlag, Stuttgart, 442 S.
- SCHÜLER, G., 1991: Der Einsatz von Gesteinsmehlen zum Schutze säurebelasteter Wald-ökosysteme im rheinland-pfälzischen Forstamt Linz. Mitteilungen der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 18, 5 - 76
- SCHWERTMANN, U., 1976: Die Verwitterung mafischer Chlorite. Z. f. Pflanzenern. Bodenkde., 139, 27-36
- TARRAH, J., 1989: Verwitterungsbilanzen von Böden auf der Basis modaler Mineralbestände (am Beispiel des Bodenprofils Spanbeck 4). Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 52, 229 S.



- TRIBUTH, H., 1976:** Die Umwandlung glimmerartiger Schichtsilikate zu aufweitbaren Dreischichttonmineralen. *Z. f. Pflanzenern. Bodenkd.*, 139, 7-25
- VALETON, I., 1988:** Verwitterung und Verwitterungslagerstätten; in FÜCHTBAUER, H., *Sedimente und Sedimentgesteine, Sedimentpetrologie, Teil II.* Schweizerbart Vlg., Stuttgart
- VORTISCH, W., 1983:** Clay mineralogical studies of some tills in northern Germany. *Geologica et Palaeontologica*, 15, 167-192
- WEAVER, C.E. und POLLART, L.D., 1973:** The chemistry of clay minerals, *Developments in Sedimentology 15: VIII*, Elsevier Amsterdam, 213 S.
- WILSON, M.J. und NADEAU, P.H., 1985:** Interstratified clay minerals and weathering processes. in DREVER, J.J. (ed.), *The chemistry of weathering.* NATO ASI Series C, 149, 97-118, Reidel, Lancaster, Dordrecht, Boston

## 7 DANKSAGUNG

Für kritisches Lesen des Manuskriptes und wertvolle Diskussionsbeiträge bedanke ich mich bei Herrn PD Dr. W. Vortisch, Marburg/ Lahn, Fachbereich Geowissenschaften der Philipps-Universität Marburg

## 8 ANHANG 1: TABELLEN

**Tab. 1: Verteilung und Veränderungen der Tonmineralreflexe innerhalb  
der < 6,3 µm-Fraktion**

Die Textur der einzelnen Präparate kann unterschiedlich sein, was zu Veränderungen der Intensitäten führt. Die Verhältnisse der Tonmineralpeaks bleiben jedoch im Rahmen der gegebenen Schwankungen nahezu gleich.

Summe aller Tonminerale = 100 %

14 Å = Wechsellagerungsminerale (Verwitterungsneubildungen aus Illit und Chlorit) und Chlorit

10 Å = Illit

7 Å = Chlorit und Kaolinit

Å	14	Ah-		Bv-			BvCv-Horizont		
		10	7	14	10	7	14	10	7
<b>Parzelle 1</b>									
Dolomit									
1988	44	39	17	38	48	14	24	59	17
1990	45	39	16	35	50	15	22	57	21
Differenz	+ 1	0	- 1	- 3	+ 2	+ 1	- 2	- 2	+ 4

Å	14	Ah-		Bv-			BvCv-Horizont		
		10	7	14	10	7	14	10	7
<b>Parzelle 2</b>									
Nullfläche									
1988	42	40	18	29	52	19	26	55	19
1990	56	31	13	38	48	14	30	49	21
Differenz	+14	-9	- 5	+ 9	- 4	- 5	+ 4	- 6	+ 2

Å	14	Ah-		Bv-			BvCv-Horizont		
		10	7	14	10	7	14	10	7
<b>Parzelle 3</b>									
mit Magnesit angereichertes silikatisches Gesteinsmehl									
1988	56	29	15	47	32	21	23	50	27
1990	57	29	14	48	33	19	31	52	17
Differenz	+ 1	0	- 1	+ 1	+1	- 2	+ 8	+ 2	-10

Å	14	Ah-		Bv-			BvCv-Horizont		
		10	7	14	10	7	14	10	7
<b>Parzelle 4</b>									
silikatisches Gesteinsmehl									
1988	46	36	18	32	43	25	16	62	22
1990	52	28	20	36	51	13	31	53	16
Differenz	+ 6	- 8	+ 2	+ 4	+ 8	-12	+15	- 9	- 6

<u>Å</u>	14	<u>Ah-</u>		14	<u>Bv-</u>		<u>BvCv-Horizont</u>		
		10	7		10	7	14	10	7
<b>Parzelle 5</b>									
silikatisches Gesteinsmehl									
1988	53	28	19	42	41	17	29	54	17
1990	55	32	13	38	48	14	32	51	17
Differenz	+ 2	+ 4	- 6	- 4	+ 7	- 3	+ 3	- 3	0

<u>Å</u>	14	<u>Ah-</u>		14	<u>Bv-</u>		<u>BvCv-Horizont</u>		
		10	7		10	7	14	10	7
<b>Parzelle 6</b>									
mit Magnesit angereichertes silikatisches Gesteinsmehl									
1988	55	31	14	48	32	20	23	49	28
1990	59	27	14	51	31	18	29	52	19
Differenz	+ 4	- 4	0	+ 3	- 1	- 2	+ 6	- 3	- 3

<u>Å</u>	14	<u>Ah-</u>		14	<u>Bv-</u>		<u>BvCv-Horizont</u>		
		10	7		10	7	14	10	7
<b>Parzelle 7</b>									
Dolomit									
1988	56	31	13	35	51	14	34	51	15
1990	73	18	9	66	24	10	32	53	15
Differenz	+17	-13	- 4	+31	-27	- 4	- 2	+ 2	0

<u>Å</u>	14	<u>Ah-</u>		14	<u>Bv-</u>		<u>BvCv-Horizont</u>		
		10	7		10	7	14	10	7
<b>Parzelle 8</b>									
Nullfläche									
1988	49	36	15	37	48	15	30	54	16
1990	56	33	11	40	46	14	33	52	15
Differenz	+ 7	- 3	- 4	+ 3	- 2	- 1	+ 3	- 2	- 1

Tab. 2: Verhältnis zwischen 14 Å-Reflex (Wechselagerungsminerale, Vermiculit, Chlorit) und 7 Å-Reflex (Chlorit/Kaolinit)

Je größer der 7 Å-Reflex gegenüber dem 14 Å-Reflex, um so größer ist der Chloritanteil, vorausgesetzt, der Kaolinitanteil bleibt gleich.

Intensitäten = Peakfläche in  $\text{mm}^2$

Ah-Horizont

Parzelle	1988		1990	
	14 Å	7 Å	14 Å	7 Å
1	322	100	229	60
2	255	83	378	67
3	246	52	326	59
4	265	82	390	73
5	296	80	297	53
6	216	43	301	53
7	308	53	240	22
8	201	45	250	36
	s 1,00	x 4,15	s 2,08	x 6,17

Bv-Horizont

Parzelle	1988		1990	
	14 Å	7 Å	14 Å	7 Å
1	413	113	369	123
2	257	131	410	115
3	366	125	404	123
4	395	129	368	106
5	370	117	416	115
6	373	122	421	115
7	367	111	408	47
8	390	114	490	109
	s 0,50	x 3,07	s 1,85	x 4,22

BvCv-Horizont

Parzelle	1988		1990	
	14 Å	7 Å	14 Å	7 Å
1	233	131	254	187
2	262	152	354	188
3	142	129	352	145
4	143	146	331	131
5	323	145	362	141
6	141	132	350	190
7	355	123	359	125
8	310	125	350	127
	s 0,71	x 1,78	s 0,53	x 2,27

Tab. 3: Chemische Zusammensetzung der < 6,3 µm-Fraktion

Parzelle 1

	Ah-Horizont			Bv-Horizont			BvCv-Horizont		
	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.
Na O	0,13	0,08	- 0,05	0,17	0,14	- 0,03	0,20	0,20	0,00
MgO	0,59	0,38	- 0,21	0,62	0,45	- 0,17	0,61	0,63	+ 0,02
Al O	21,58	18,80	- 2,78	22,75	21,03	- 1,72	22,31	23,42	+ 1,11
SiO <sub>3</sub>	66,85	71,31	+ 4,46	65,35	67,76	+ 2,41	65,45	63,55	- 1,90
K O <sup>2</sup>	2,66	2,57	- 0,09	2,93	3,05	+ 0,12	3,32	3,51	+ 0,19
CaO	0,09	0,11	+ 0,02	0,06	0,05	- 0,01	0,02	0,00	- 0,02
TiO	1,51	1,40	- 0,11	1,44	1,51	+ 0,07	1,30	1,28	- 0,02
Fe O <sub>2 3</sub>	6,54	5,32	- 1,22	6,63	5,99	- 0,64	6,76	7,37	+ 0,61

Parzelle 2

	Ah-Horizont			Bv-Horizont			Bv-Cv-Horizont		
	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.
Na O	0,15	0,13	- 0,02	0,15	0,17	+ 0,02	0,19	0,21	+ 0,02
MgO	0,58	0,43	- 0,15	0,59	0,49	- 0,10	0,64	0,58	- 0,06
Al O	20,94	19,33	- 1,61	22,74	21,13	- 1,61	23,49	22,77	- 0,72
SiO <sub>3</sub>	67,61	70,46	+ 2,85	65,34	68,30	+ 2,96	64,12	65,36	+ 1,24
K O <sup>2</sup>	2,77	2,79	- 0,02	3,05	2,84	+ 0,21	3,63	3,33	- 0,30
CaO	0,06	0,04	+ 0,02	0,06	0,04	- 0,02	0,02	0,00	- 0,02
TiO	1,44	1,47	- 0,03	1,57	1,51	+ 0,06	1,40	1,34	- 0,06
Fe O <sub>2 3</sub>	6,42	5,31	- 1,11	6,46	5,48	- 0,98	6,47	6,38	- 0,09

Parzelle 3

	Ah-Horizont			Bv-Horizont			Bv-Cv-Horizont		
	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.
Na O	0,13	0,12	- 0,01	0,15	0,16	+ 0,01	0,15	0,15	0,00
MgO	0,58	0,38	- 0,20	0,59	0,54	- 0,05	0,62	0,55	+ 0,07
Al O	20,41	19,69	- 0,72	22,52	21,32	- 1,20	21,88	21,75	- 0,13
SiO <sub>3</sub>	68,36	69,86	+ 1,50	65,11	67,56	+ 2,45	65,64	66,37	+ 0,73
K O <sup>2</sup>	2,49	2,82	+ 0,33	2,85	2,80	- 0,05	2,98	3,12	+ 0,14
CaO	0,09	0,07	- 0,02	0,09	0,06	- 0,03	0,05	0,03	- 0,02
TiO	1,39	1,34	- 0,05	1,49	1,48	- 0,01	1,49	1,47	- 0,02
Fe O <sub>2 3</sub>	6,51	5,69	- 0,82	7,16	6,05	- 1,11	7,16	7,52	+ 0,36

Parzelle 4

	Ah-Horizont			Bv-Horizont			Bv-Cv-Horizont		
	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.
Na O	0,13	0,14	+ 0,01	0,16	0,17	+ 0,01	0,17	0,21	+ 0,04
MgO	0,52	0,47	- 0,05	0,52	0,43	- 0,09	0,59	0,58	+ 0,01
Al O	20,86	20,41	- 0,45	21,04	20,14	- 0,90	22,07	21,78	- 0,29
SiO <sub>3</sub>	67,74	68,81	+ 1,07	67,74	69,17	+ 1,43	65,78	66,42	+ 0,64
K O <sup>2</sup>	2,72	2,82	- 0,10	2,86	2,95	+ 0,09	3,37	3,08	- 0,29
CaO	0,08	0,06	- 0,02	0,02	0,01	- 0,01	0,01	0,00	- 0,01
TiO	1,49	1,42	- 0,07	1,47	1,34	- 0,13	1,45	1,40	- 0,05
Fe <sub>23</sub> O	6,42	5,84	- 0,56	6,14	5,74	- 0,40	6,52	6,51	- 0,01

Parzelle 5

	Ah-Horizont			Bv-Horizont			Bv-Cv-Horizont		
	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.
Na O	0,15	0,08	- 0,07	0,15	0,16	+ 0,01	0,20	0,20	0,00
MgO	0,48	0,45	- 0,03	0,57	0,56	- 0,01	0,65	0,60	- 0,05
Al O	20,35	18,56	- 1,89	22,17	21,78	- 0,39	23,14	22,29	- 0,85
SiO <sub>3</sub>	68,14	71,09	+ 2,95	65,63	65,72	+ 0,09	63,65	65,76	+ 2,11
K O <sup>2</sup>	2,78	2,40	- 0,38	2,87	3,04	+ 0,17	3,50	2,90	- 0,60
CaO	0,04	0,13	+ 0,09	0,07	0,04	- 0,03	0,03	0,00	- 0,03
TiO	1,41	1,34	- 0,07	1,53	1,37	- 0,16	1,29	1,32	+ 0,03
Fe <sub>23</sub> O	6,62	5,92	- 0,68	6,97	7,30	+ 0,33	7,51	6,87	- 0,64

Parzelle 6

	Ah-Horizont			Bv-Horizont			Bv-Cv-Horizont		
	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.
Na O	0,13	0,12	- 0,01	0,17	0,14	- 0,03	0,17	0,17	0,00
MgO	0,51	0,49	- 0,02	0,58	0,49	- 0,09	0,62	0,61	- 0,01
Al O	20,77	19,84	- 0,93	21,87	20,78	- 1,09	23,03	22,65	- 0,38
SiO <sub>3</sub>	67,96	69,22	+ 1,24	66,29	68,26	+ 1,97	64,09	64,74	+ 0,65
K O <sup>2</sup>	2,68	2,58	- 0,10	2,84	2,72	- 0,08	3,23	3,29	+ 0,06
CaO	0,09	0,09	0,00	0,05	0,06	+ 0,01	0,04	0,02	- 0,02
TiO	1,37	1,42	+ 0,05	1,44	1,48	+ 0,04	1,33	1,34	+ 0,01
Fe <sub>23</sub> O	6,44	6,21	- 0,23	6,71	6,03	- 0,68	7,45	7,13	- 0,32

Parzelle 7

	Ah-Horizont			Bv-Horizont			Bv-Cv-Horizont		
	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.
Na O	0,13	0,07	- 0,06	0,16	0,11	- 0,05	0,14	0,15	+ 0,01
MgO	0,47	0,43	- 0,04	0,58	0,50	- 0,08	0,58	0,66	+ 0,08
Al O	20,25	19,37	- 0,88	22,33	19,73	- 2,60	22,17	22,91	+ 0,72
SiO <sub>3</sub>	67,77	69,87	+ 2,10	64,40	68,25	+ 3,85	64,74	63,29	- 1,45
K O <sup>2</sup>	2,84	2,24	- 0,60	3,19	2,48	- 0,71	3,25	3,27	+ 0,02
CaO	0,05	0,17	+ 0,12	0,05	0,10	+ 0,05	0,04	0,05	+ 0,01
TiO	1,33	1,56	+ 0,23	1,40	1,70	+ 0,30	1,36	1,61	+ 0,25
Fe O <sub>2 3</sub>	7,11	6,26	- 0,85	7,85	7,10	- 0,75	7,67	8,01	+ 0,34

Parzelle 8

	Ah-Horizont			Bv-Horizont			Bv-Cv-Horizont		
	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.	1988	1990	Diff.
Na O	0,15	0,12	- 0,03	0,15	0,14	- 0,01	0,14	0,15	+ 0,01
MgO	0,55	0,61	+ 0,06	0,55	0,58	+ 0,03	0,61	0,62	+ 0,01
Al O	21,23	21,86	+ 0,73	22,16	21,57	- 0,59	21,90	21,87	- 0,03
SiO <sub>3</sub>	66,66	65,76	- 0,90	65,37	66,08	+ 0,71	64,78	65,68	+ 0,90
K O <sup>2</sup>	2,94	2,67	- 0,17	3,00	2,97	- 0,03	3,44	3,11	- 0,33
CaO	0,05	0,13	+ 0,08	0,06	0,07	+ 0,01	0,02	0,05	+ 0,03
TiO	1,35	1,45	+ 0,10	1,44	1,50	+ 0,06	1,45	1,48	+ 0,03
Fe O <sub>2 3</sub>	7,04	7,35	+ 0,31	7,24	7,06	- 0,16	7,62	7,01	- 0,61

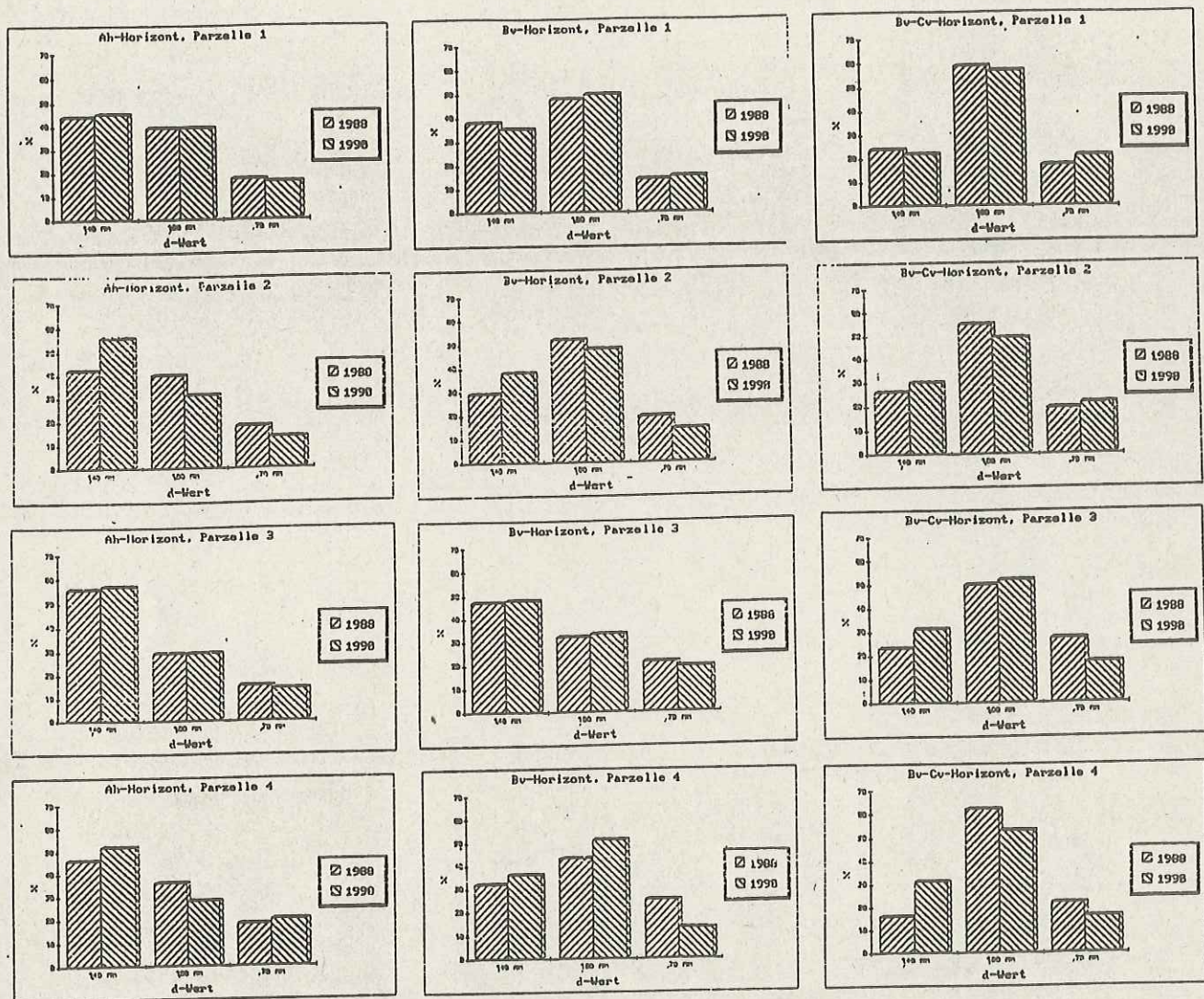
Fehlerbetrachtung

Na O	± 0,02,	MgO	± 0,12,	Al O	± 1,00,	SiO	± 1,00,
K O <sub>2</sub>	± 0,27,	CaO	± 0,02,	TiO <sub>2 3</sub>	± 0,04,	Fe O <sub>2 3</sub>	± 0,50



## 9 ANHANG 2: ABBILDUNGEN

Abb. 1: Verteilung und Veränderungen der Tonmineralanteile innerhalb der  $< 6,3 \mu\text{m}$ -Fraktion (vgl. Tab. 1)

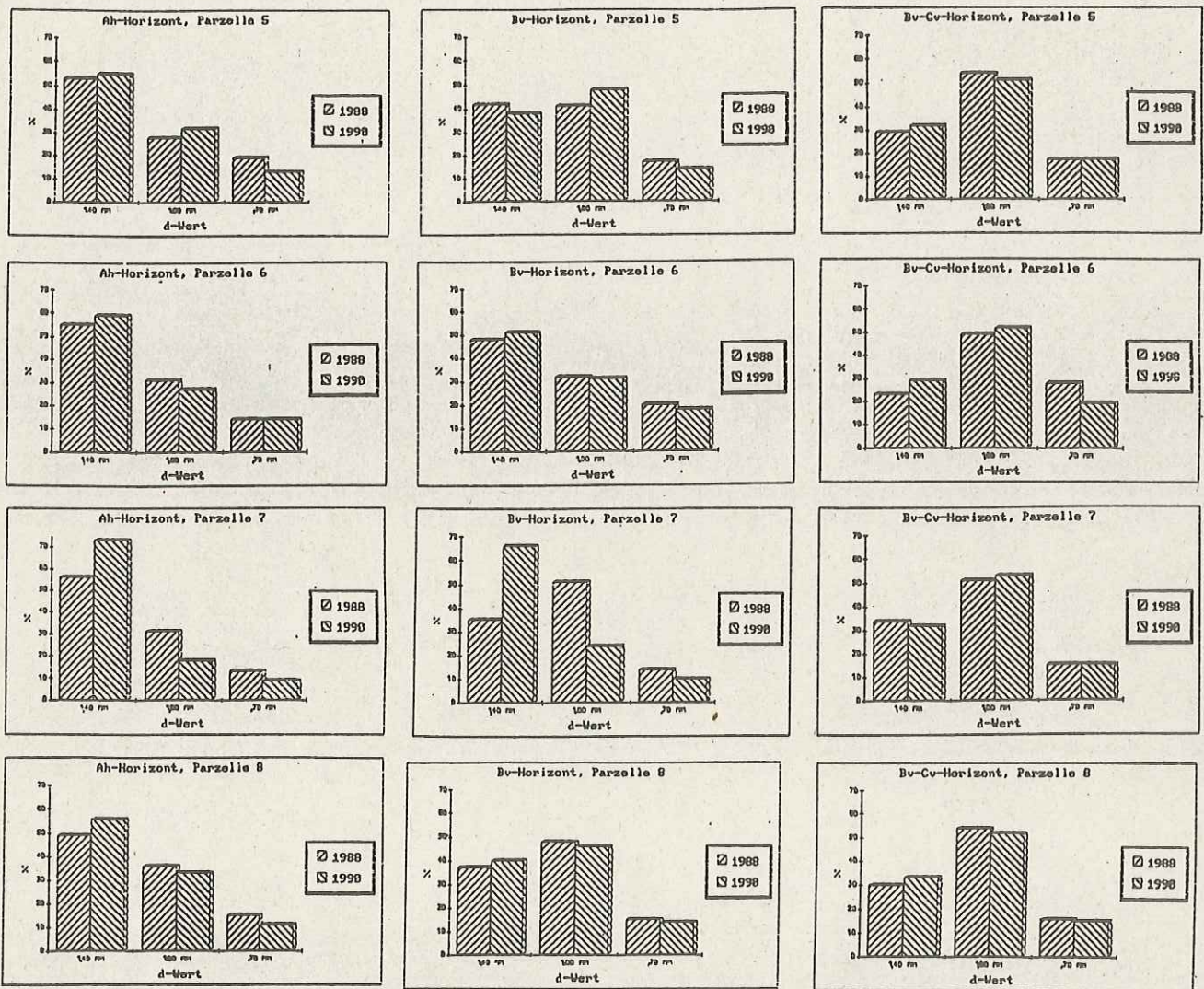


1.40 nm =  $14 \text{ \AA}$  = Wechsellagerungsminerale (Verwitterungsneubildungen aus Illit und Chlorit)

1.00 nm =  $10 \text{ \AA}$  = Illit

0.70 nm =  $7 \text{ \AA}$  = Chlorit und Kaolinit

Abb. 2: Verteilung und Veränderungen der Tonmineralanteile innerhalb der  $< 6,3 \mu\text{m}$ -Fraktion (vgl. Tab. 1)

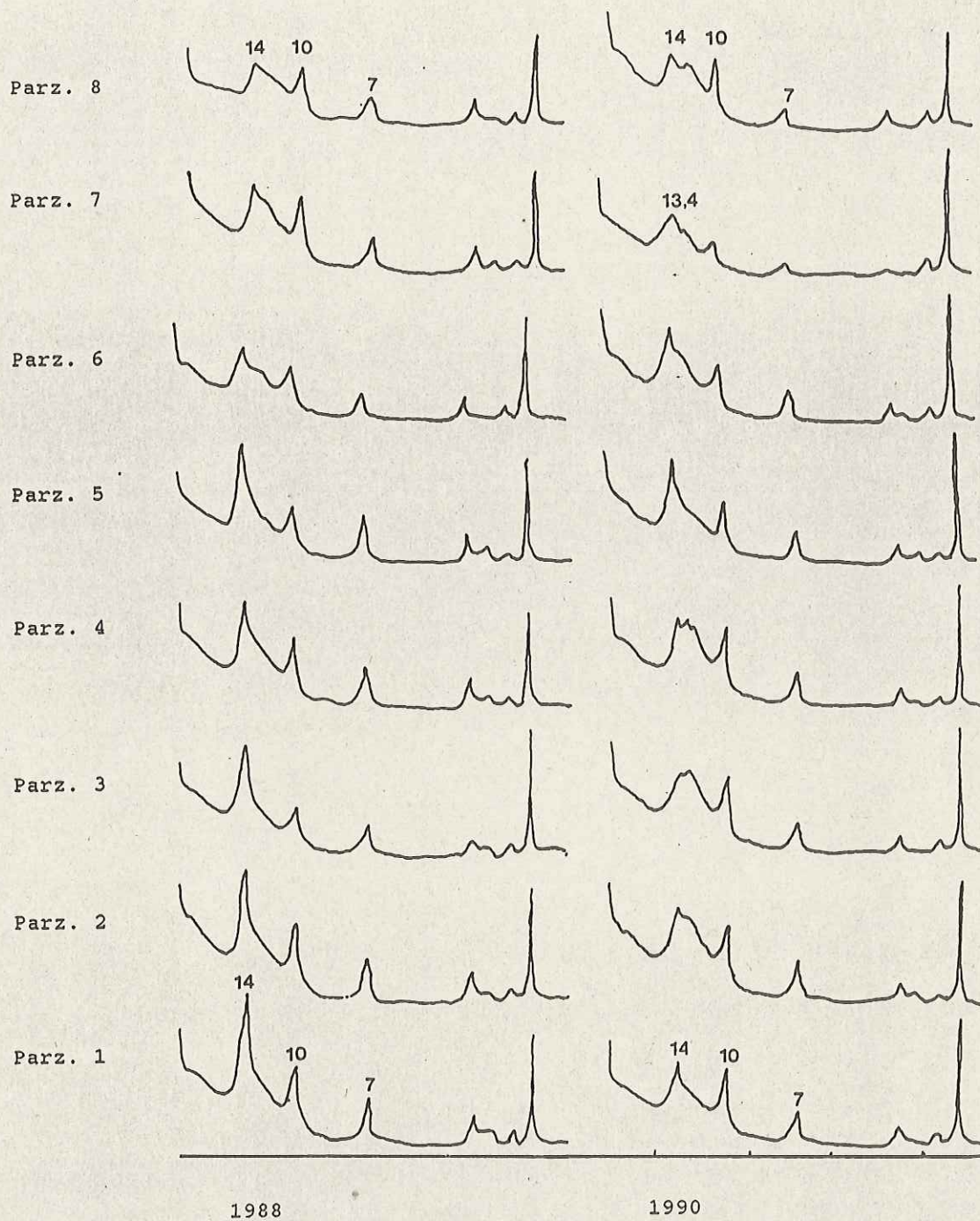


1.40 nm = 14 Å = Wechsellagerungsminerale (Verwitterungsneubildungen aus Illit und Chlorit)

1.00 nm = 10 Å = Illit

0.70 nm = 7 Å = Chlorit und Kaolinit

Abb. 3: Röntgendiffraktogramme der unbehandelten Texturpräparate aus dem  $A_h$ -Horizont

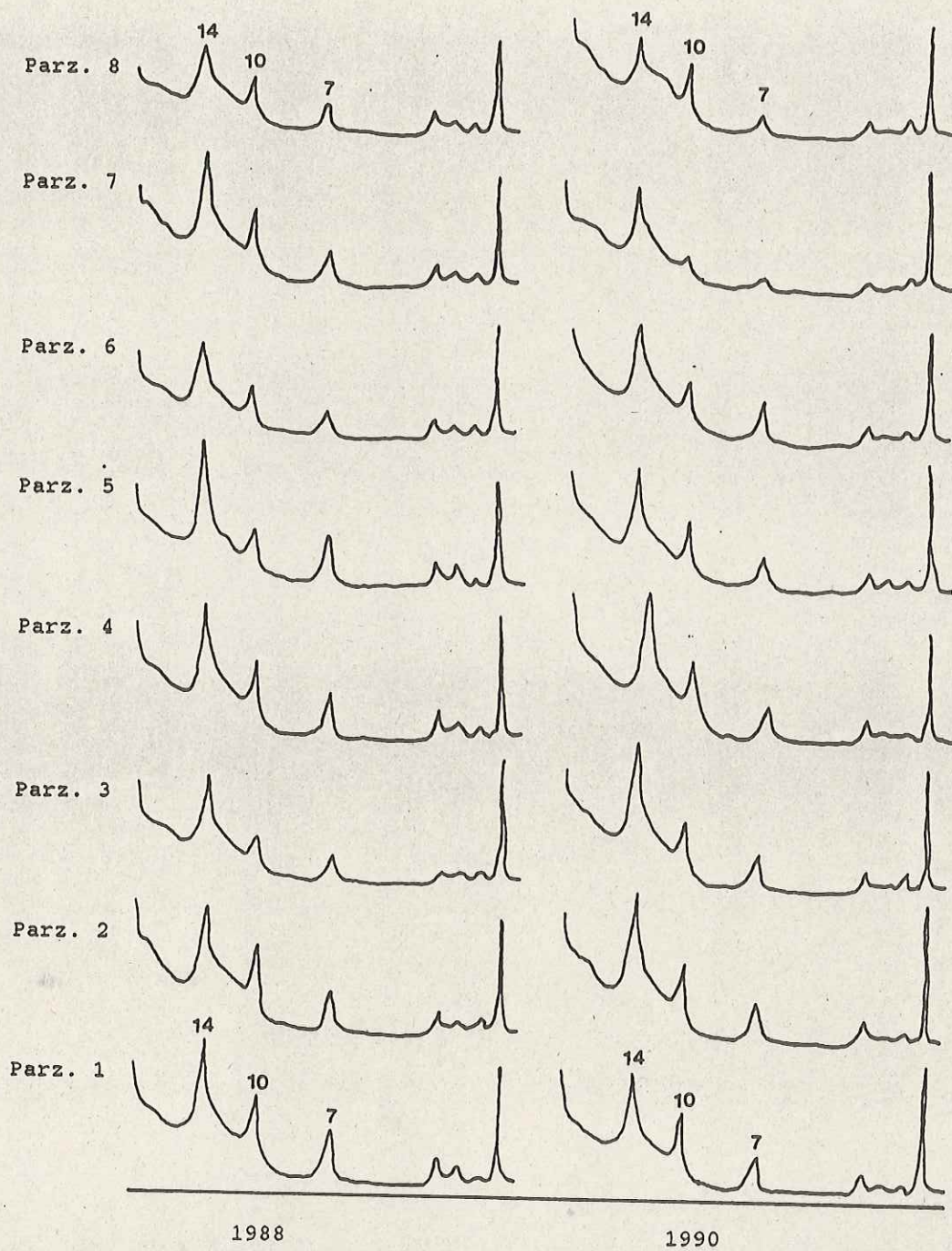


d-Werte in Ångström

14 = Wechsellagerungsminerale (Vermiculit, Chlorit);

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 4: Röntgendiffraktogramme der Etylenglycol-behandelten Präparate aus dem  $A_h$ -Horizont

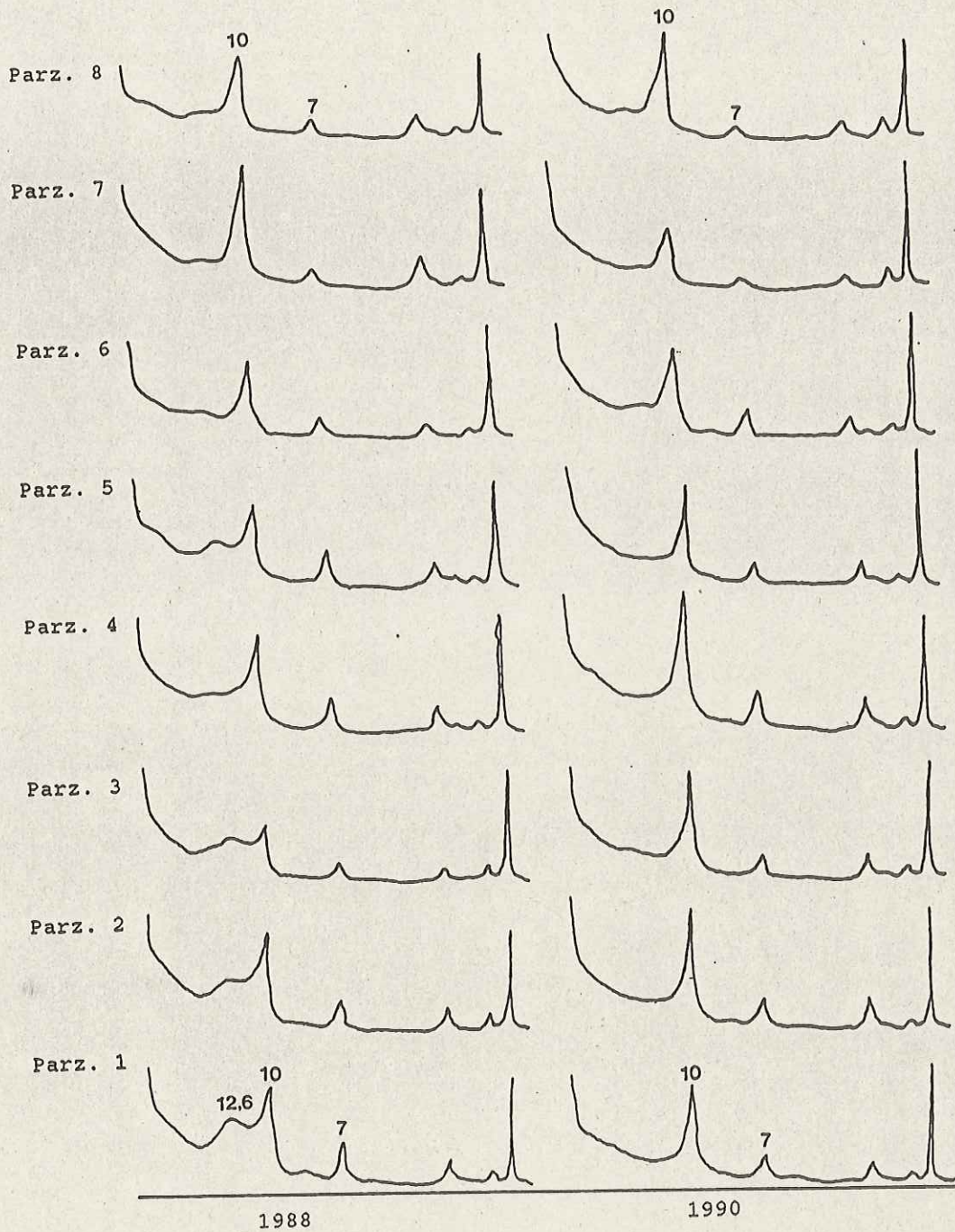


d-Werte in Ångström

14 = Wechsellagerungsminerale (Vermiculit, Chlorit);

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 5: Röntgendiffraktogramme der bei 350° C thermisch behandelten Präparate aus dem A<sub>h</sub>-Horizonte

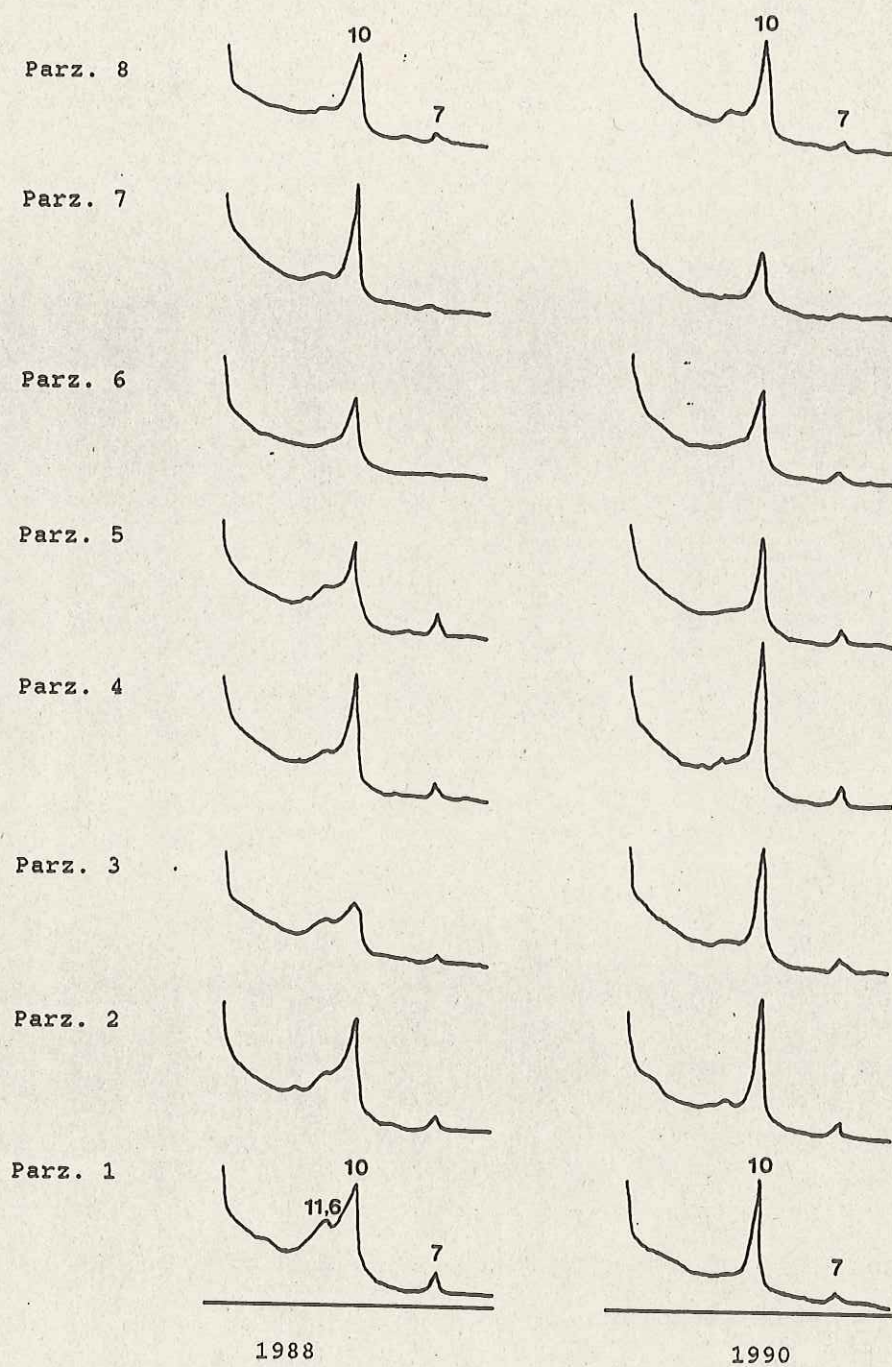


d-Werte in Ångström

12,6 = Wechsellagerungsmineral (Chlorit/Vermiculit);

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 6: Röntgendiffraktogramme der bei 450° C thermisch behandelten Präparate aus dem A<sub>h</sub>-Horizont

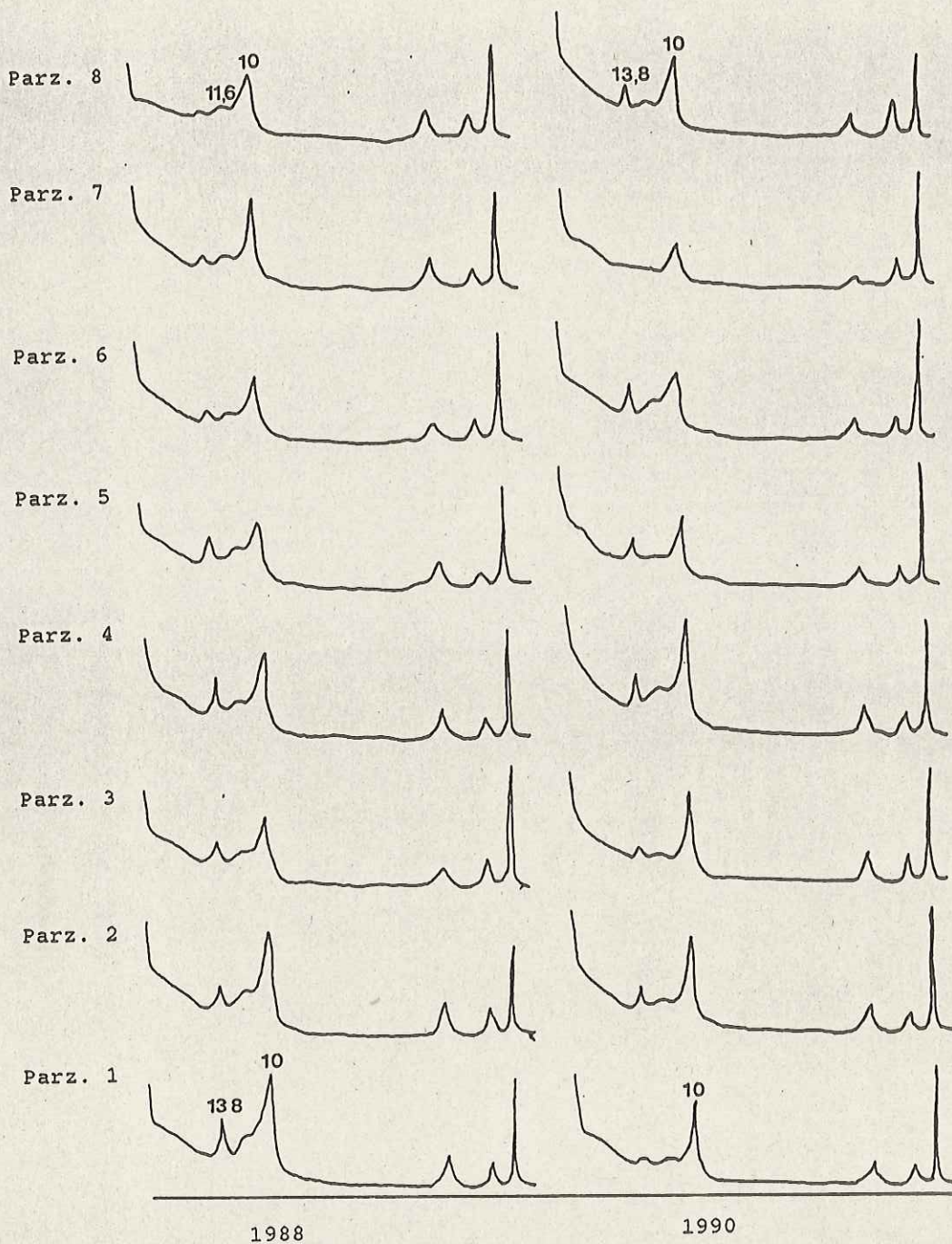


d-Werte in Ångström

11,6 = Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit;

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 7: Röntgendiffraktogramme der bei 550° C thermisch behandelten Präparate aus dem A<sub>h</sub>-Horizont

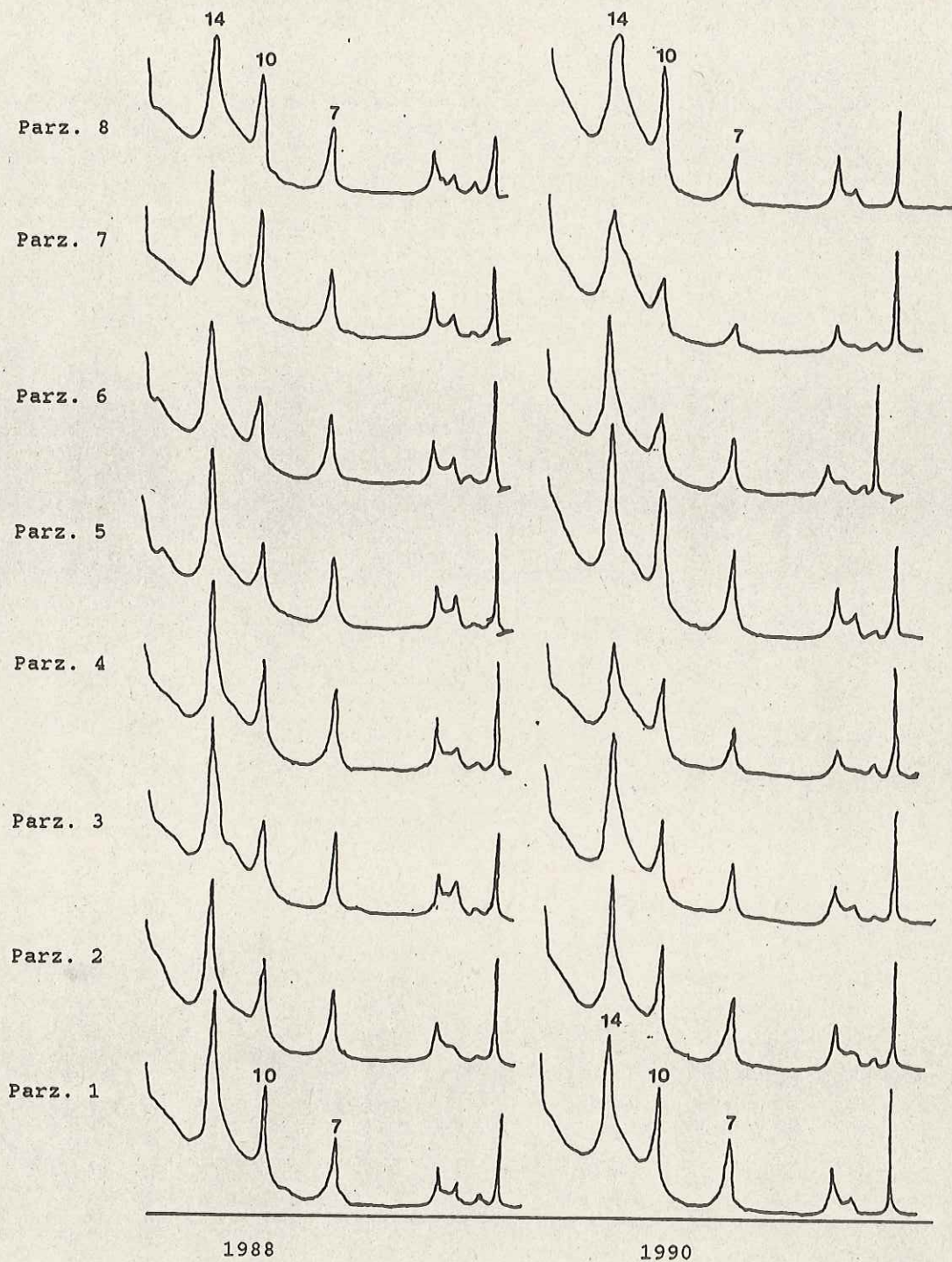


d-Werte in Ångström

13,8 = Chlorit; 11,6 = Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit;

10 = Illit

**Abb. 8: Röntgendiffraktogramme der unbehandelten Texturpräparate aus dem  $B_v$ -Horizont**



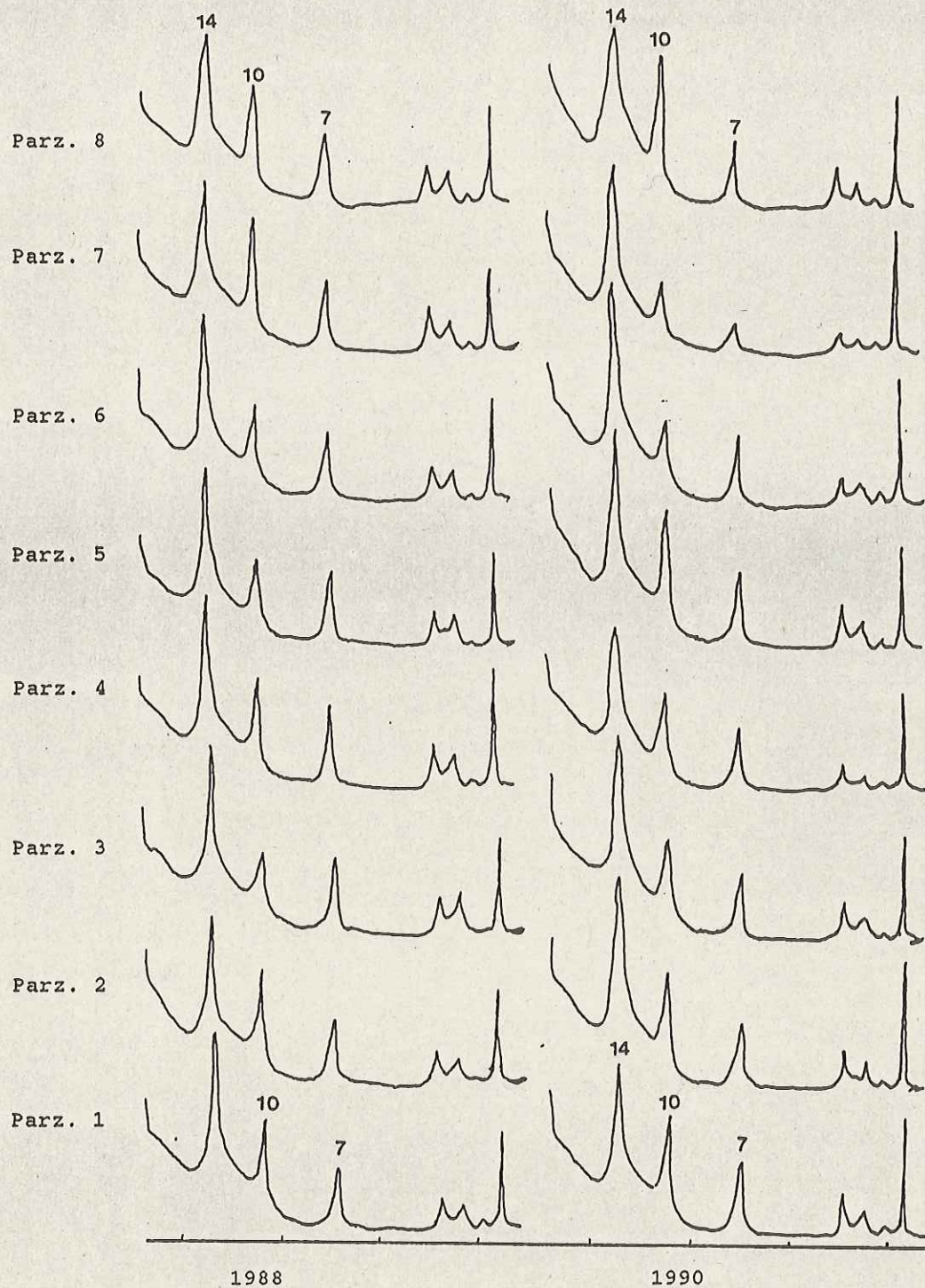
d-Werte in Ångström

14 = Wechselagerungsminerale (Vermiculit, Chlorit);

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)



Abb. 9: Röntgendiffraktogramme der Ethylenglycol-behandelten Präparate aus dem  $B_V$ -Horizont

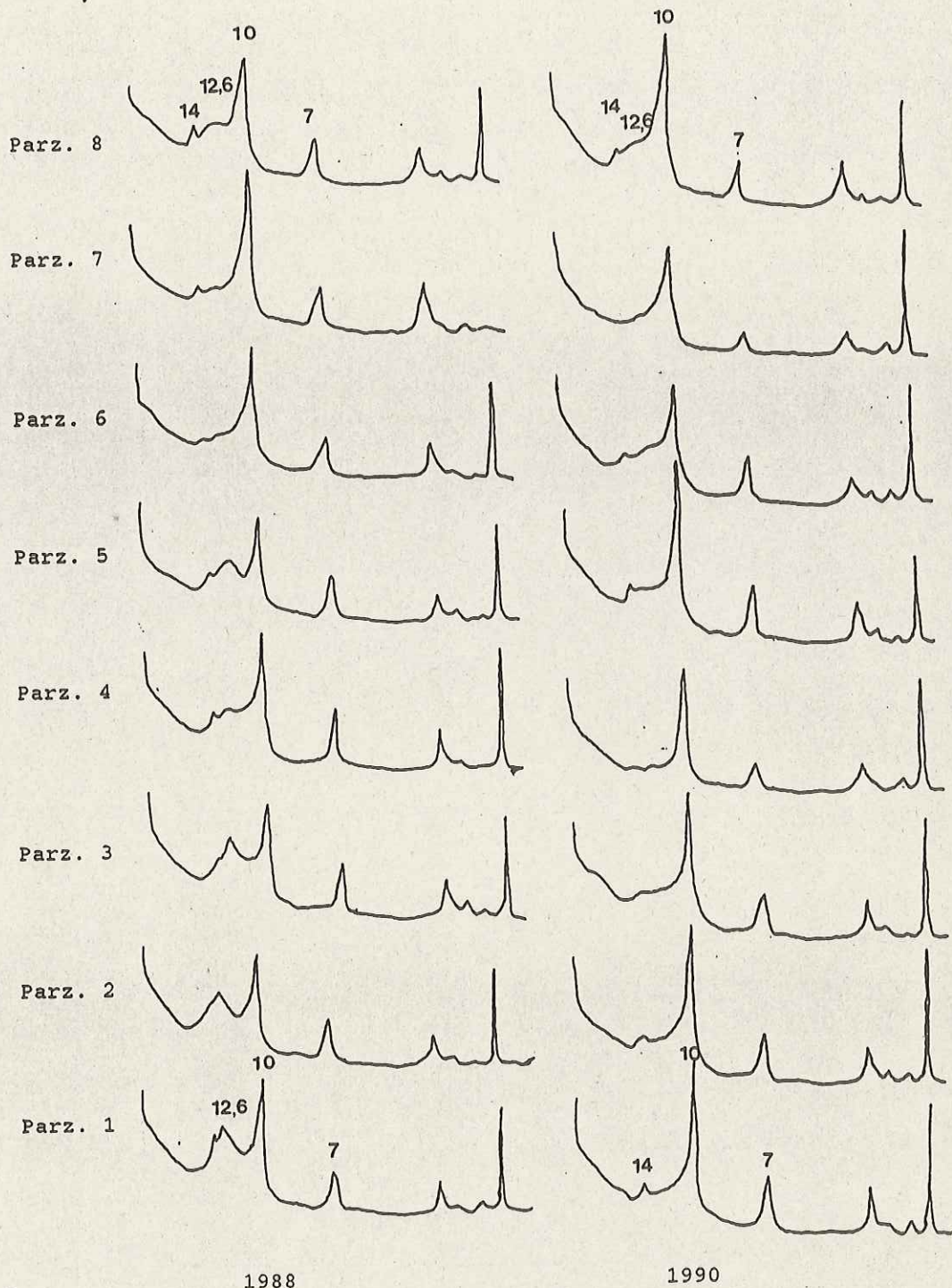


d-Werte in Ångström

14 = Wechsellagerungsminerale (Vermiculit, Chlorit);

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 10: Röntgendiffraktogramme der bei 350° C thermisch behandelten Präparate aus dem B<sub>v</sub>-Horizont

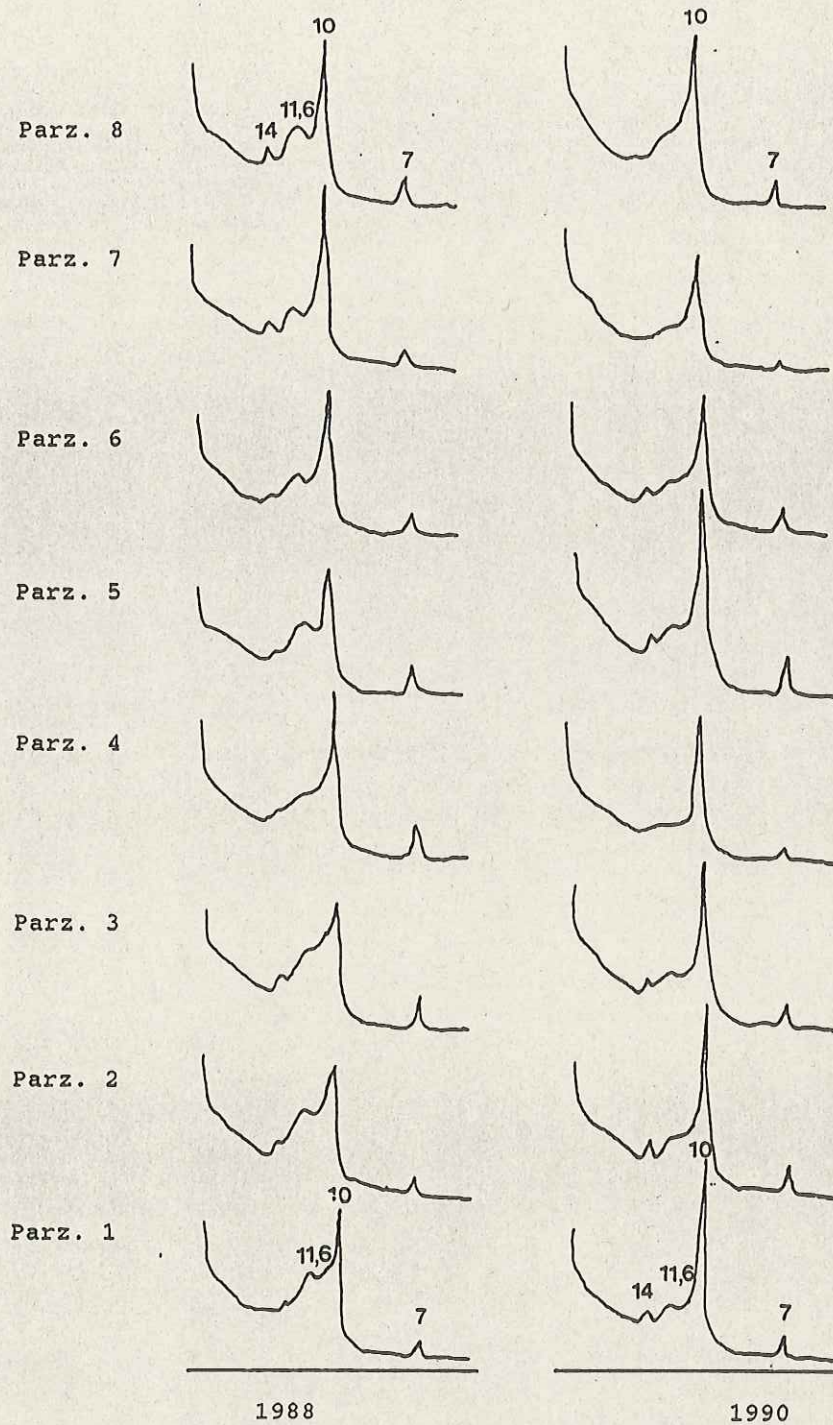


d-Werte in Ångström

14 = Chlorit; 12,6 = Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit;

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 11: Röntgendiffraktogramme der bei 450° C thermisch behandelten Präparate aus dem B<sub>v</sub>-Horizont

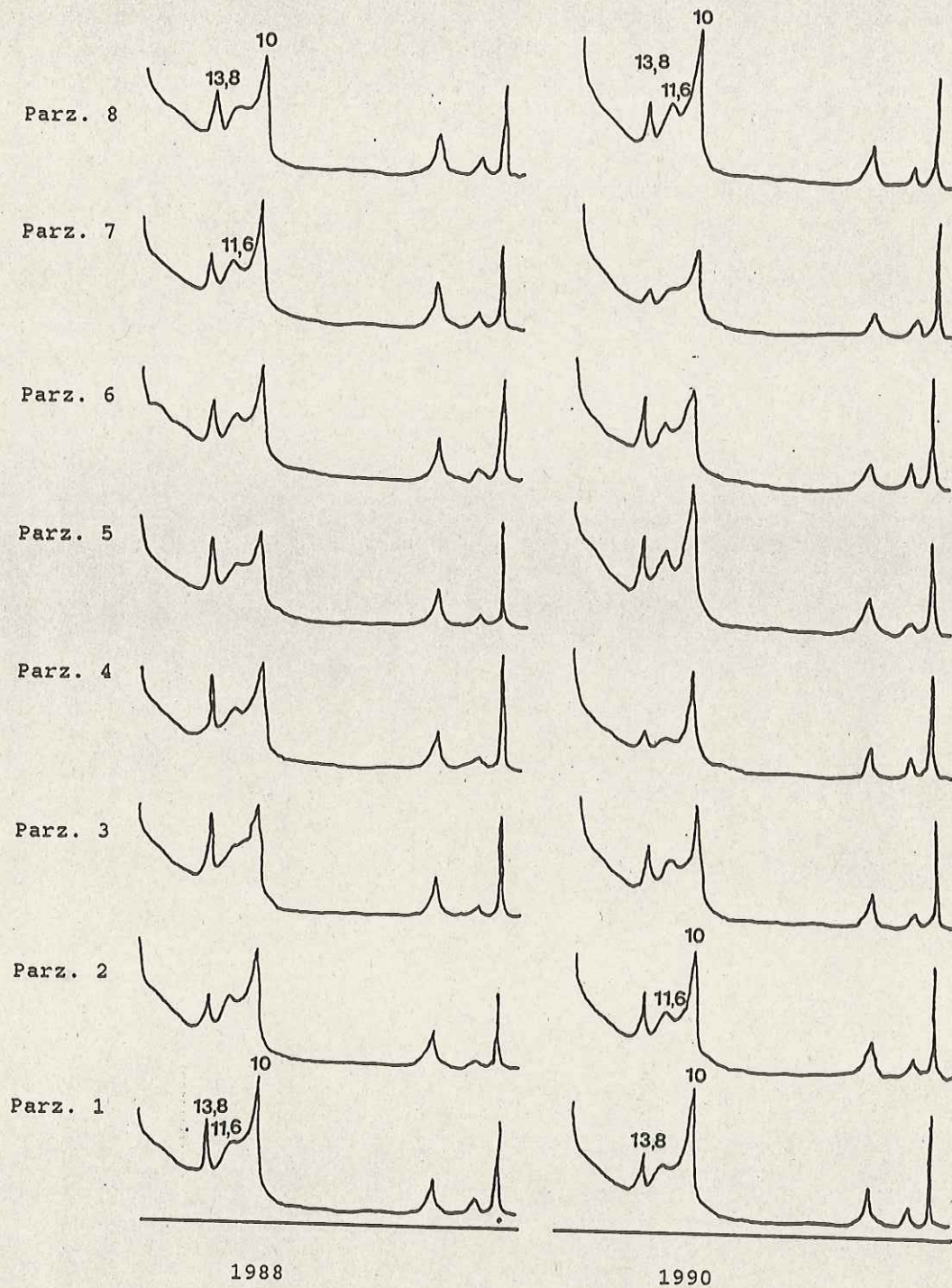


d-Werte in Ångström

14 = Chlorit; 11,6 = Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit;

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 12: Röntgendiffraktogramme der bei 550° C thermisch behandelten Präparate aus dem B<sub>v</sub>-Horizont

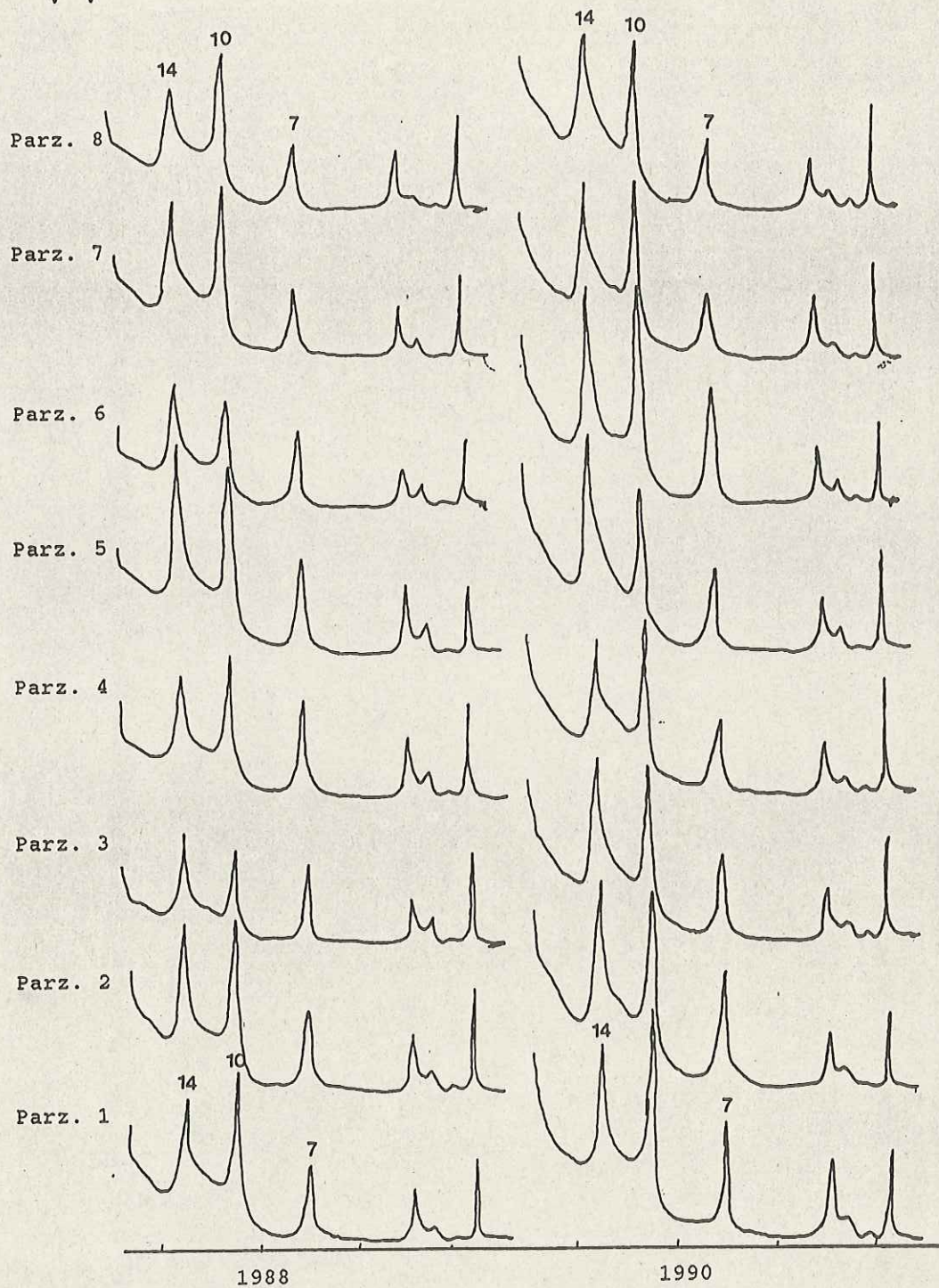


d-Werte in Ångström

13,8 = Chlorit; 11,6 = Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit;

10 = Illit

Abb. 13: Röntgendiffraktogramme der unbehandelten Texturpräparate aus dem  $B_V C_V$ -Horizont

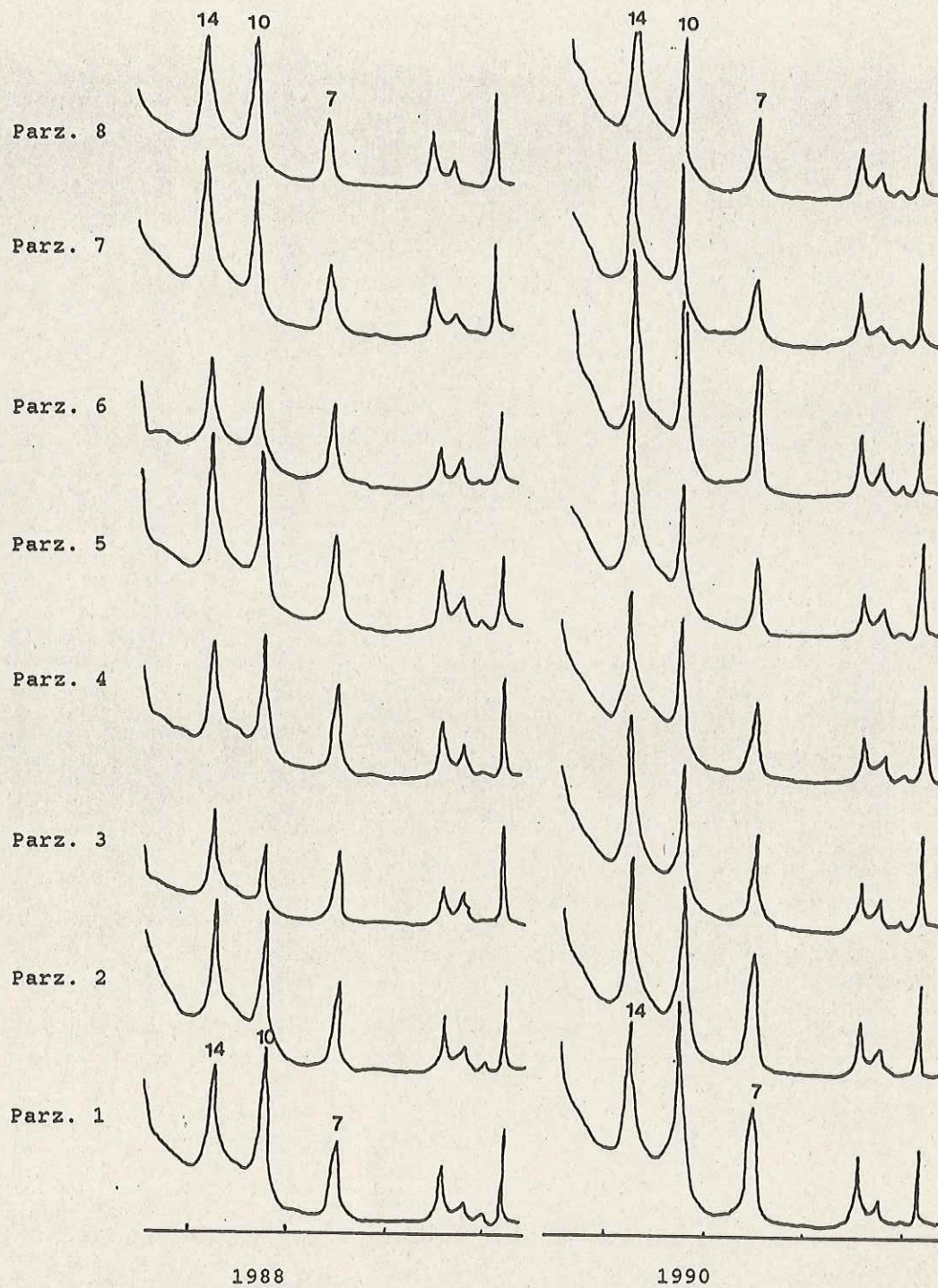


d-Werte in Ångström

14 = Wechsellagerungsminerale (Vermiculit, Chlorit);

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 14: Röntgendiffraktogramme der Ethylenglycol-behandelten Präparate aus dem  $B_V C_V$ -Horizonte

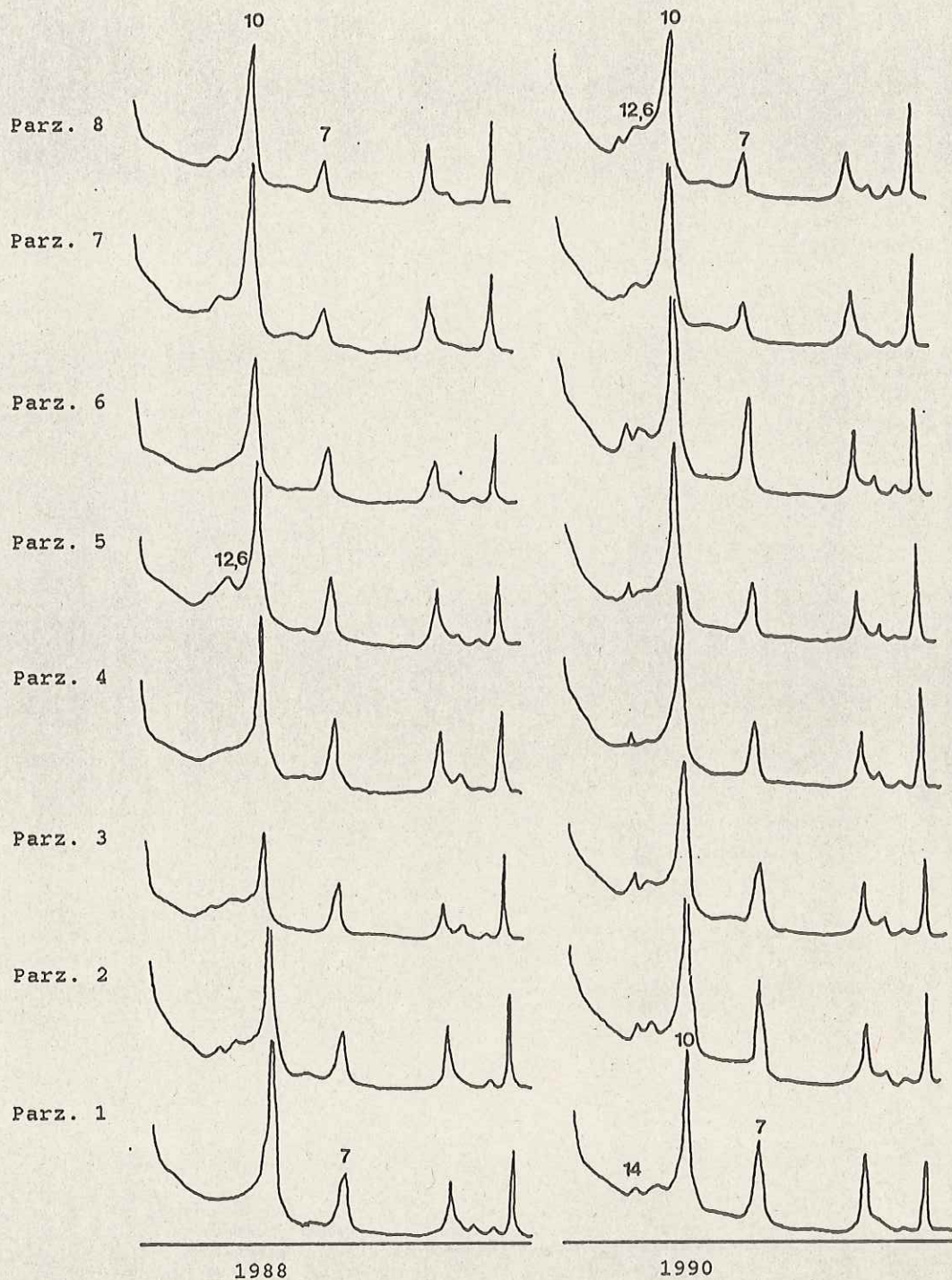


d-Werte in Ångström

14 = Wechsellagerungsminerale (Vermiculit, Chlorit);

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 15: Röntgendiffraktogramme der bei 350° C thermisch behandelten Präparate aus dem B<sub>v</sub>C<sub>v</sub>-Horizont

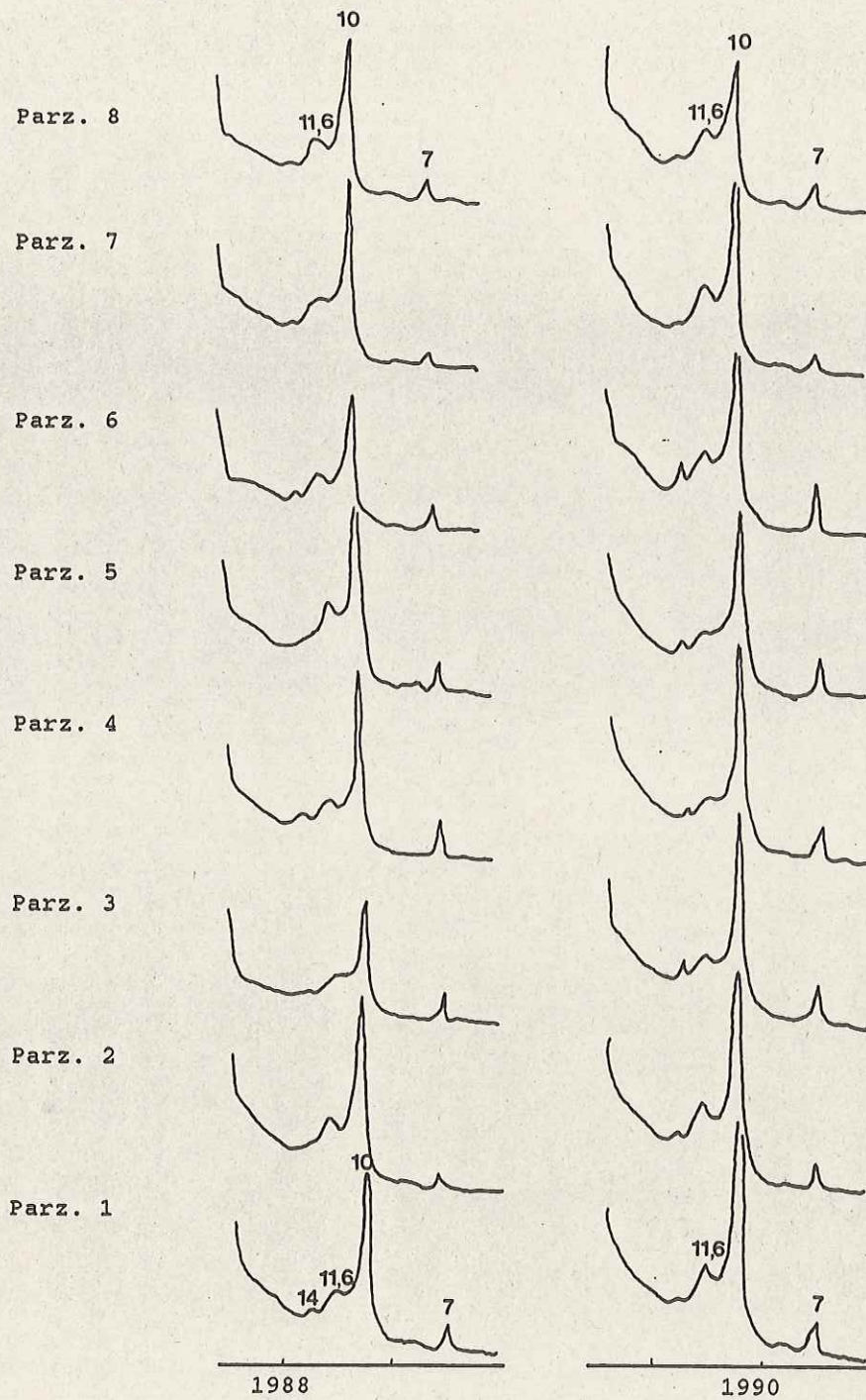


d-Werte in Ångström

14 = Chlorit; 12,6 = Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit;

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)

Abb. 16: Röntgendiffraktogramme der bei 450° C thermisch behandelten Präparate aus dem B<sub>v</sub>C<sub>v</sub>-Horizont



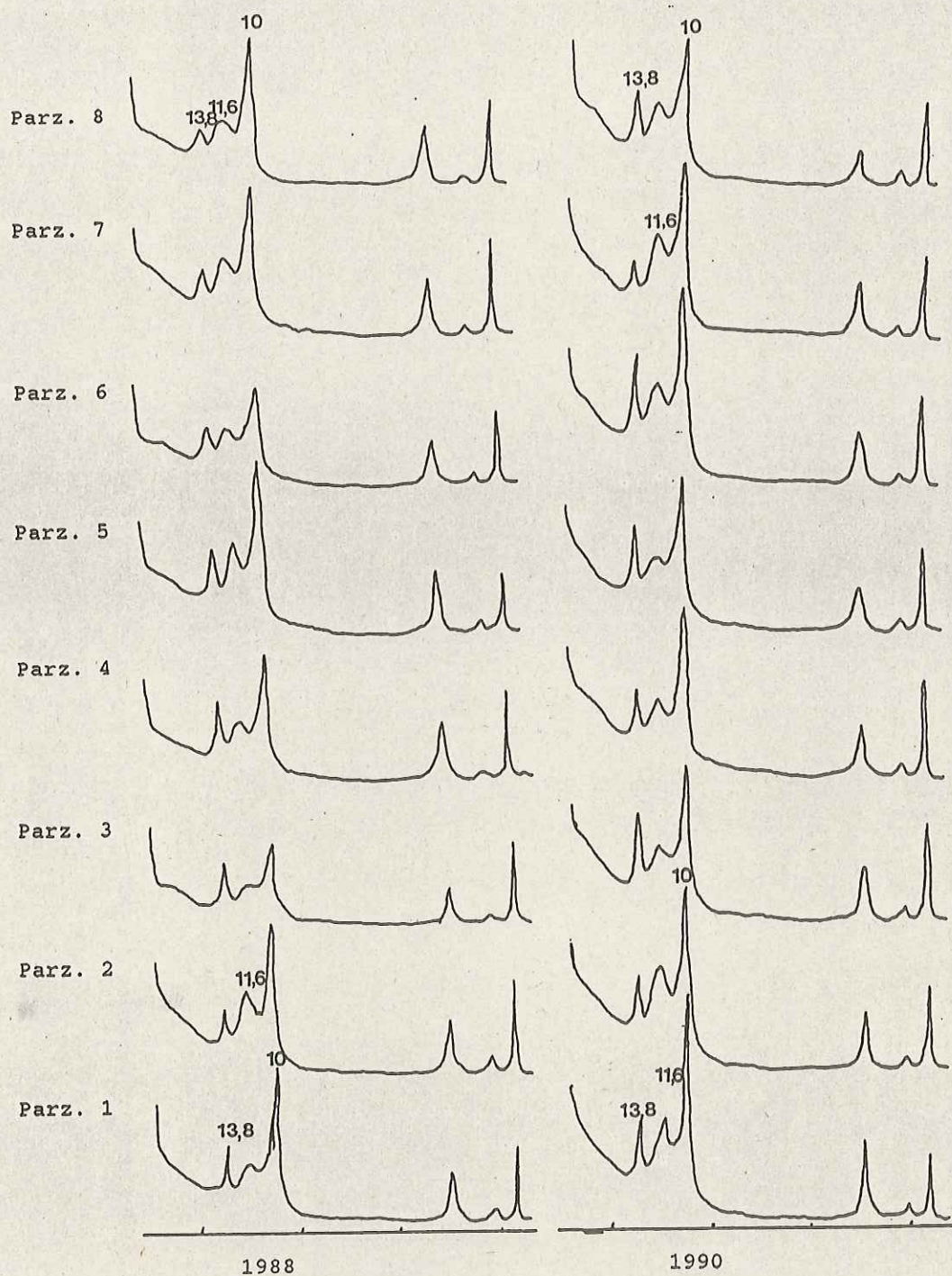
d-Werte in Ångström

14 = Chlorit; 11,6 = Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit;

10 = Illit; 7 = Chlorit (Kaolinit)



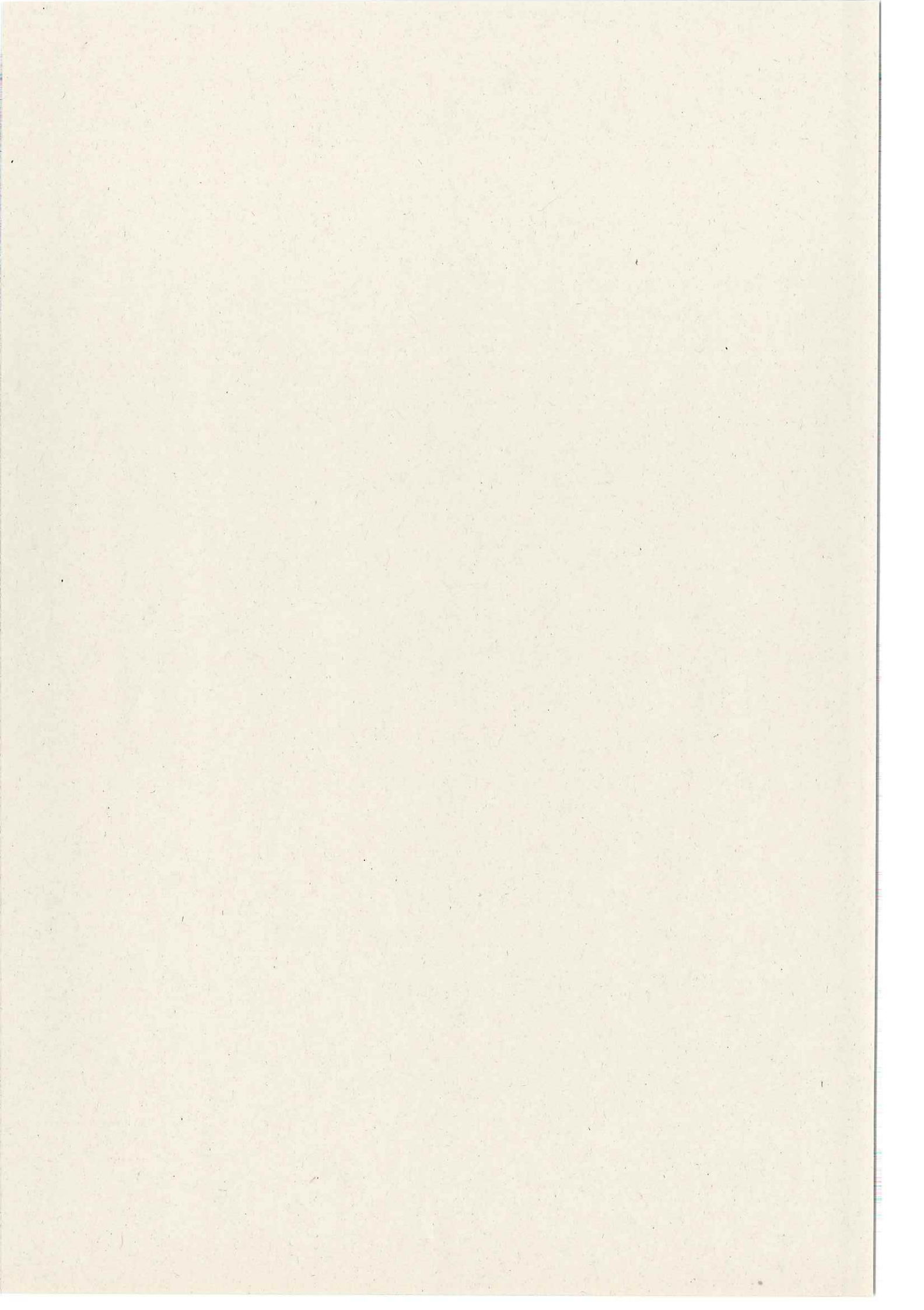
Abb. 17: Röntgendiffraktogramme der bei 550° C thermisch behandelten Präparate aus dem B<sub>v</sub>C<sub>v</sub>-Horizont



d-Werte in Ångström

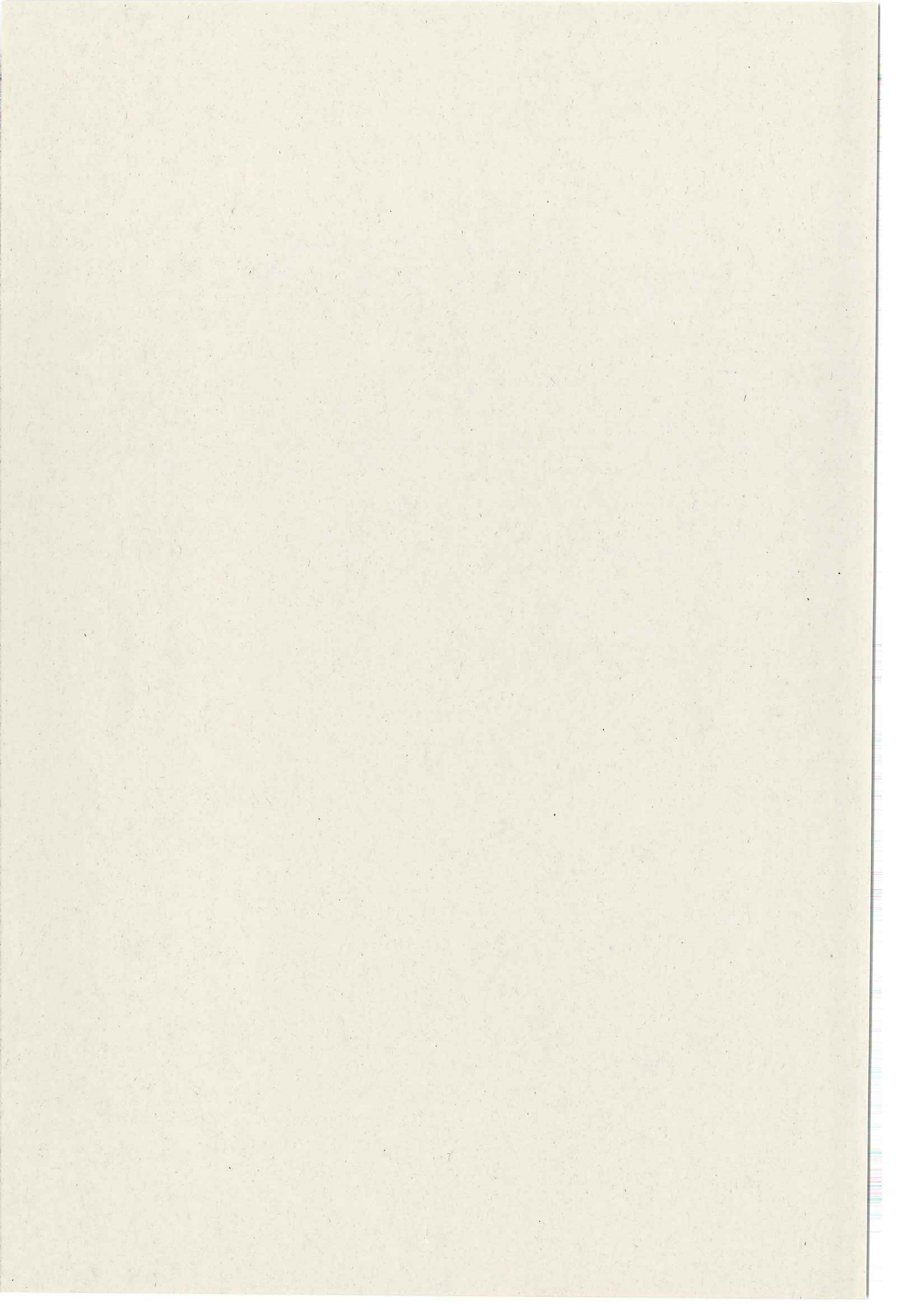
13,8 = Chlorit; 11,6 = Wechsellagerungsmineral Chlorit/Vermiculit;

10 = Illit



**Der Düngeversuch Hunsrück 1969  
mit Stickstoff, Phosphor und Calcium  
in Buchen- und Fichtenbeständen**

**Dieter Schöne und Gebhard Schüler**



## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>1 EINLEITUNG</b>	121
<b>2 VERSUCHSMETHODIK</b>	121
2.1 Versuchsanlage	121
2.2 Auswertungsmethode	124
<b>3 ERTRAGSKUNDLICHE ERGEBNISSE</b>	125
3.1 Periodischer Durchmesserzuwachs	125
3.1.1 Summarische Auswertung für die ungedüngten und gedüngten Bäume aller Versuchsflächen	125
3.1.2 Vergleichende Zuwachsanalyse der jeweils zusammengehörenden Versuchsflächenpaare	127
3.1.3 Periodischer Durchmesserzuwachs der Mittelstämme in Null- und Düngungspartellen	129
3.1.4 Einfluß der Bestandesstruktur auf das Zuwachsverhalten der ungedüngten und gedüngten Parallelfächen	132
3.2 Periodischer Grundflächenzuwachs	140
3.2.1 Bereinigung des Grundflächenzuwachses aufgrund unterschiedlicher Bestandesstrukturen	143
3.3 Stammform und periodischer Höhenzuwachs	144
3.4 Periodischer Volumenzuwachs	144
<b>4 VERSAUERUNGSGRAD DER BÖDEN UND NADELANALYSENERGEBNISSE</b>	145

	Seite
5 DISKUSSION	147
6 ZUSAMMENFASSUNG - SUMMARY	153
7 LITERATURVERZEICHNIS	155
8 ANHANG 1: STATISTISCHE ANALYSE ZUR UNTERSCHIEDUNG DER DÜNGEWIRKUNG ÜBER DEN VERGLEICH DER REGRESSIONSKOEFFIZIENTEN	156

## 1 EINLEITUNG

Ziel des 1969 als gemeinsames Projekt des Institutes für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen, der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt und der Forstdirektion Koblenz begründeten Versuches war es, die rein wirtschaftlich definierte Düngungswürdigkeit repräsentativer, vorher nicht eigens durchforsteter, mittelalter Buchen- und Fichtenbestände auf typischen Standorten des Mittleren Hunsrücks zu überprüfen. Die Versuchsflächen wurden somit in unterschiedlich strukturierten Beständen und auf nicht unmittelbar vergleichbaren Standorten angelegt. Eine Vielzahl unkontrollierter Einflüsse, die sich aus den Standorts- und Bestandesbedingungen ergeben, mußten somit die reine Düngewirkung überlagern.

Nach einer Laufzeit von 7 Vegetationsperioden ergaben die intensive ertragskundliche Auswertung einer Versuchsparzelle, sowie die darauffolgenden extensiveren Aufmessungen aller übrigen Flächen Aufschluß über das Bestandeswachstum. Es sollte ermittelt werden, ob durch die Düngung die Wachstumsbedingungen entscheidend verbessert werden können. Die Veröffentlichung der erhobenen und ausgewerteten Daten verdeutlicht die Schwierigkeiten, die sich aufgrund der methodischen Anlage der Versuche aus den Überlagerungseffekten ergeben.

Selbst wenn die Düngung mit Kalkammonsalpeter heute aufgrund der geänderten Umweltbedingungen auf den ersten Blick nicht mehr aktuell erscheint, so gibt die erneute Bearbeitung der seinerzeit erhobenen Daten auch Hinweise auf den damaligen Status der Bodenversauerung und die Ernährungssituation der Fichtenbestände, sowie deren Wachstum.

## 2 VERSUCHSMETHODIK

### 2.1 Versuchsanlage

Die Übersichten 1 und 2 enthalten Angaben über die Lage der auf der Grundlage einer Standortkartierung gutachtlich ausgewählten Versuchsflächen und die z. T. den Einrichtungswerken entnommenen und z. T. vor Ort erhobenen ertrags- und standortkundlichen Daten der Bestände. Bei einer Flächengröße von je 0,1 ha lagen Düngungs- und entsprechende Nullflächen in unmittelbarer Nachbarschaft. Beide wurden - einschließlich der umgebenden gleichbehandelten Sicherheitsstreifen - dauerhaft verpfählt und stammweise numeriert. Die Phosphatdüngung im

Herbst 1969 entsprach einer Gabe von 200 kg pro ha  $P_2O_5$  in der Form von Thomasphosphat, die Stickstoffgabe im Frühjahr 1970 einer Stickstoffzufuhr von 150 kg pro ha als Kalkammonsalpeter.

**Übersicht 1: Lage der Versuchsbestände, sowie Alter (1969) und Ertragsklasse (ET WIEDEMANN und SCHOBBER, mäßige Durchforstung)**

**B u c h e**

Flächen Nr.	Forstamt	Abt.	Lage	Alter 1969	Bonität
1	Morbach	285a	Unterhang	92	2.5
2	Morbach	284c	-	69	2.5
3	Morbach	285a	Oberhang	92	2.5
4	Morbach	97b	-	86	3.5
5	Birkenfeld	144b	-	85	3.0
6	Birkenfeld	153a <sup>1</sup>	-	84	3.0
7	Birkenfeld	114a <sup>1</sup>	-	56	3.5
8	Birkenfeld	139c <sup>1</sup>	-	59	2.5
9	Kempfeld	50b <sup>1</sup>	-	90	3.0
10	Kempfeld	179a <sup>1</sup>	-	91	3.5
11	Hermeskeil-Ost	159c	-	90	2.5

**F i c h t e**

Flächen Nr.	Forstamt	Abt.	Lage	Alter 1969	Bonität
12	Morbach	31a <sup>1</sup>	-	72	2.5
14	Morbach	277a <sup>1</sup>	Oberhang	60	2.0
15	Morbach	298a	-	56	1.0
16	Morbach	299b	-	49	1.0
17	Birkenfeld	124a	-	58	1.0
18	Birkenfeld	134b	-	50	1.5
19	Kempfeld	168a <sup>2</sup>	-	61	2.0
20	Dhronecken	108a	-	66	2.5
21	Dhronecken	136a <sup>1</sup>	-	80	1.5
22	Dhronecken	136a <sup>1</sup>	Unterhang	80	1.5

Ausgangsmaterial der Bodengenese bildeten in allen Fällen glaziale Staublehme, vermischt mit wechselnden Anteilen von tertiärem und jüngerem Verwitterungsmaterial des devonischen Grundgesteines, sowie vermutlich geringen Beimischungen von Flugasche.



**Übersicht 2: Zusammenfassung der wichtigsten standortkundlichen Daten aller  
Versuchsflächen**

Standortsfaktor		
	Schwerpunkt	Spannweite
Höhe über NN	570	500-700 m
Durchschn. Temp. i. Jahr	7°	6,5 - 7,5° C
Durchschn. Temp. i.d.Veg.Zeit (nach Oelckers)	12,5°	12 - 13° C
durchschn. Jahresniederschlag	900 mm	850 - 1200 mm
Hangrichtung	SO und NW	SO und NW
Hangneigung	5 - 10°	0 - 25°
Grundgestein	dev. Schiefer u. Quarzite unter dil. Decklehm	dev. Schiefer u. Quarzite unter dil. Decklehm
Bodenart	usL	L - lS
Bodentyp	schwach meso- trophe podsolige Braunerden	oligo- bis meso- trophe Brauner- den, im Bereich der Quarzitkämme podsolig
Gründigkeit (= durchwurzel- bare Tiefe)	60 - 75 cm	60 - 150 cm
Skelettanteil	35 %	5 - 60 %
Humusform	Grobmoder	Rohhumus bis Mull
Lagerungsdichte (geschätzt)	locker	locker
Nutzbare Wasserspeicher- kapazität	70 - 85 mm	70 - 150 mm
Standortseinheiten	S/M m/a 3 u. (2)	S m 2 bis M a 3

## 2.2 Auswertungsmethode

Alle nummerierten Stämme wurden bei der Versuchsanlage 1969 nach farblicher Markierung der Meßstellen mit einer Präzisionskluppe über Kreuz gekluppt.

Die Auswertung 1976 verlief in 2 Phasen: Zunächst diente die intensive Aufmessung einer einzigen Fichtenparzelle dem Zweck, Erfahrungen zu sammeln und folgende Fragen zu klären:

- Hat die Düngung zu einer nennenswerten Steigerung des Durchmesser-, Kreisflächen- und Höhenzuwachses geführt?
- Muß mit Auswirkungen auf die Stammform gerechnet werden?
- Variiert die Düngewirkung beim Einzelbaum mit der sozialen Stellung im Bestand?
- Ist eine intensive Auswertung aller Flächen notwendig?

Dazu wurden in der Parzelle 16 (Forstamt Morbach, Abt. 299b) nach der Kluppung 10 Stämme mit dem Durchmesser des arithmetischen Mittelstammes, sowie je 5 den Hohenadl'schen Mittelstämmen "d +" und "d -" entsprechende Bäume gefällt. Diese Probe­ stämme wurden nach dem Hohenadl'schen Verfahren (nach PRODAN 1965) sektionsweise mit dem Umfangmeßband vermessen. Soweit praktisch möglich, wurde auch der Höhenzuwachs der Periode von 1970 bis 1976 ermittelt. Außerdem wurden einzelstammweise Nadelproben des jüngsten Triebes vom 7. Quirl von diesen gefällten Stämmen entnommen und chemisch analysiert.

In einem 2. Schritt wurden alle weiteren Versuchsflächen gekluppt zur Überprüfung der in Phase 1 gewonnenen Erkenntnisse.

### 3 ERTRAGSKUNDLICHE ERGEBNISSE

#### 3.1 Periodischer Durchmesserzuwachs

##### 3.1.1 Summarische Auswertung für die ungedüngten und gedüngten Bäume aller Versuchsflächen

Wie Abb. 1 und 2 beispielhaft verdeutlichen, läßt sich der Durchmesserzuwachs beider Baumarten für die Gesamtheit aller Bäume als lineare Funktion des Ausgangsdurchmessers darstellen.

Abb. 1: Periodischer Durchmesserzuwachs der ungedüngten Buchen (1970 - 1976)

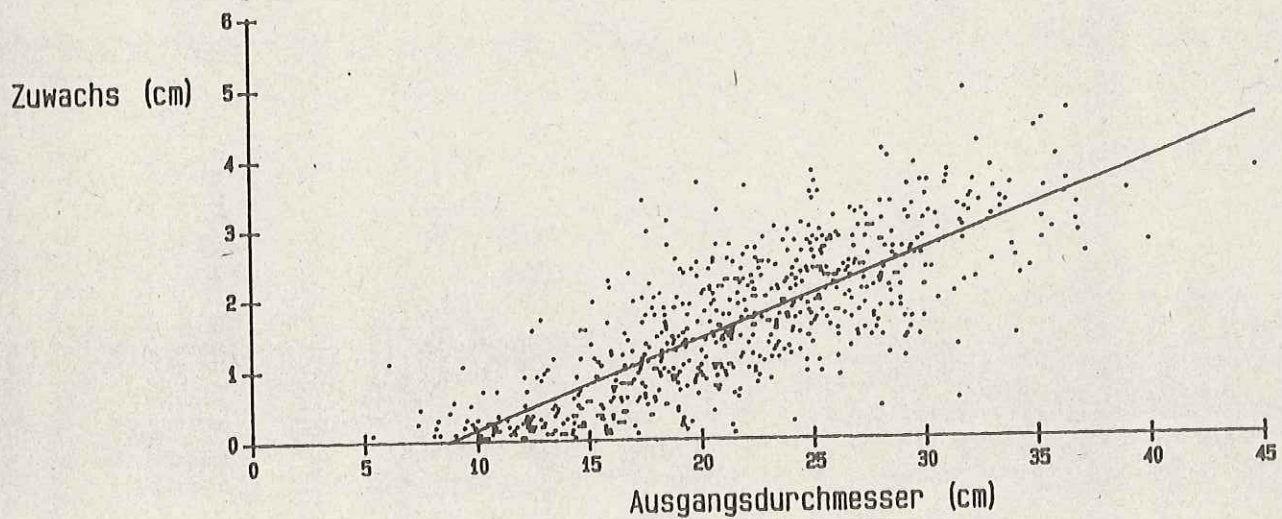
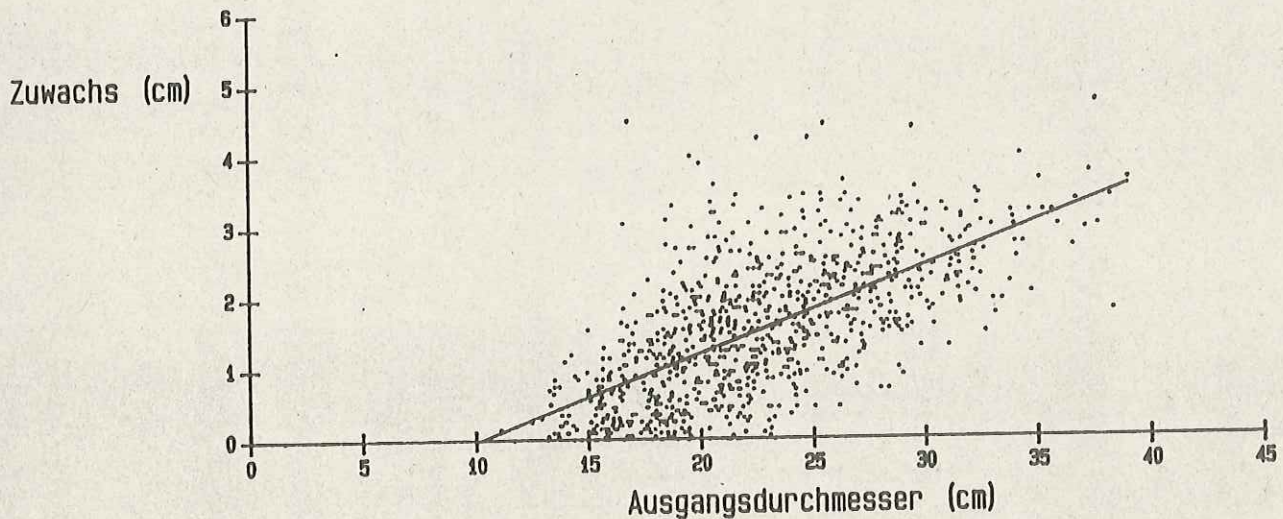


Abb. 2: Periodischer Durchmesserzuwachs der ungedüngten Fichten (1970 - 1976)



Ausgehend von der Hypothese, daß ein düngedingter Mehrzuwachs im Kollektiv aller Einzelbäume unabhängig von der jeweiligen Versuchsfläche in einer Anhebung der Steigung der Ausgleichsgeraden erkennbar sein sollte, wurde eine statistische Prüfung durchgeführt (Anhang 1). Dabei unterscheiden sich die Zuwachsgeraden der ungedüngten und gedüngten Buchen signifikant (Abb. 3). Bei der Fichte ist ein Mehrzuwachs nicht zu erkennen (Abb. 4).

Abb. 3: Periodischer Durchmesserzuwachs der ungedüngten und gedüngten Buchen (1970 - 1976)

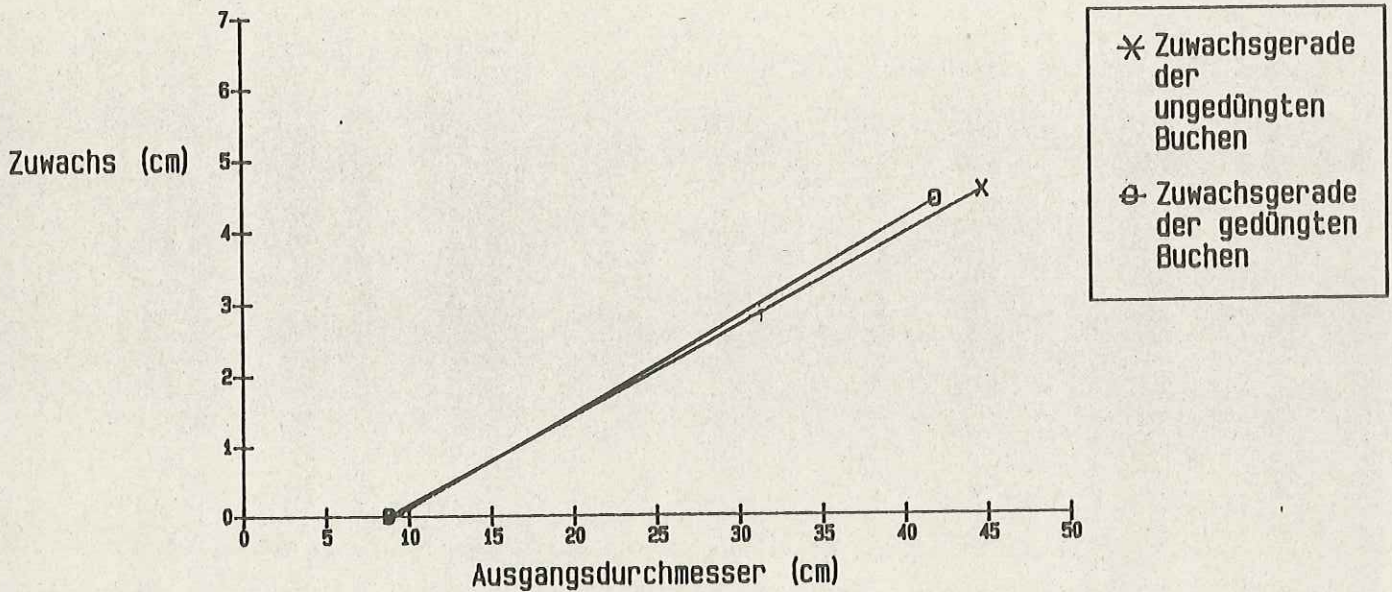
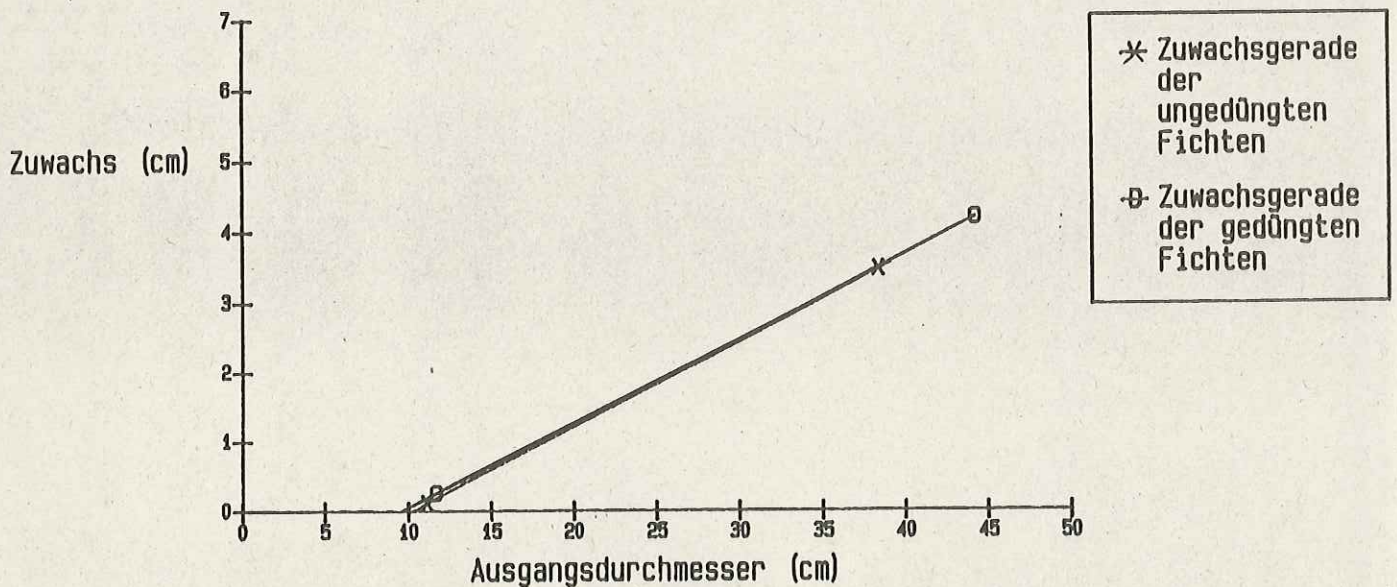


Abb. 4: Periodischer Durchmesserzuwachs der ungedüngten und gedüngten Fichten (1970 - 1976)



### 3.1.2 Vergleichende Zuwachsanalyse der jeweils zusammengehörenden Versuchsflächenpaare

Das Kollektiv aller Versuchsbäume läßt sich stratifizieren nach den Versuchsbeständen, in denen jeweils eine ungedüngte und eine gedüngte Versuchspartzele aufgenommen wurde. Bei einer weiteren statistischen Auswertung sollte überprüft werden, ob sich in den einzelnen Versuchsflächen, beispielsweise durch den Standort und die Lage der Versuchsbestände, durch ihre Struktur, ihr Alter oder ihre Ertragsklasse differenziertere Hinweise auf einen Mehrzuwachs ergeben.

Tab. 1: Regressionskoeffizienten und Bestimmtheit der Zuwachsgeradengleichungen der Buchenflächen (periodischer Durchmesserzuwachs 1970 - 1976)

$$y = a + b x \quad (1)$$

- y : Erwarteter Durchmesserzuwachs pro Stamm in cm  
 x : Ausgangsdurchmesser 1969 in cm  
 a : Achsenabschnitt der Zuwachsgeraden  
 b : Steigung der Zuwachsgeraden  
 B : Bestimmtheitsmaß  
 N : Stammzahl je Parzelle

Flächen-Nr.	Nullfläche				Düngefläche			
	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	B	N	a <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	B	N
1	- 1.19	0.14	0.480	33	- 1.52	0.15	0.515	37
2	- 1.35	0.15	0.697	66	- 1.40	0.17	0.657	67
3	- 1.25	0.12	0.426	40	- 1.78	0.14	0.532	42
4	- 1.76	0.16	0.762	78	- 1.65	0.16	0.760	68
5	- 1.18	0.13	0.621	65	- 1.61	0.15	0.517	63
6	- 1.96	0.15	0.731	70	- 2.18	0.16	0.703	62
7	- 0.82	0.13	0.526	66	- 1.59	0.17	0.711	71
8	- 1.42	0.14	0.396	97	- 1.82	0.17	0.619	75
9	- 0.95	0.11	0.638	61	- 1.53	0.12	0.661	50
10	- 0.95	0.12	0.506	69	- 1.22	0.13	0.590	60
11	- 1.42	0.14	0.777	54	- 1.63	0.16	0.822	53

Bei der Buche verlaufen in der überwiegenden Zahl der Fälle die Zuwachsgeraden der Düngeflächen steiler als diejenigen der Nullflächen. Im Regressionsmodell kommt dies im größeren Steigungskoeffizienten b und niedrigerem Achsenabschnitt a zum Ausdruck (Tab. 1). Hier deutet sich also der gleiche Effekt als Folge der Düngung wie bei der summarischen Betrachtung

aller Buchen an: Stämme mit stärkerem Durchmesser werden im Durchmesserzuwachs deutlicher gefördert als schwächere Stämme. Dies kann bei anhaltender Düngewirkung zu einer beschleunigten Bestandesdifferenzierung führen.

**Tab. 2: Regressionskoeffizienten und Bestimmtheit der Zuwachsgeradengleichungen der Fichtenflächen (periodischer Durchmesserzuwachs 1970 - 1976)**

$$y = a + b x \quad (1)$$

- y : Erwarteter Durchmesserzuwachs pro Stamm in cm
- x : Ausgangsdurchmesser 1969 in cm
- a : Achsenabschnitt der Zuwachsgeraden
- b : Steigung der Zuwachsgeraden
- B : Bestimmtheitsmaß
- N : Stammzahl je Parzelle

Flächen-Nr.	Nullfläche				Düngefläche			
	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	B	N	a <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	B	N
14	- 2.81	0.19	0.621	102	- 2.35	0.16	0.691	81
19	- 2.13	0.17	0.610	89	- 2.20	0.17	0.656	81
20	- 2.70	0.19	0.752	101	- 2.30	0.17	0.731	93
21	- 1.72	0.16	0.566	93	- 2.23	0.14	0.700	90
22	- 2.79	0.16	0.696	76	- 2.63	0.16	0.643	70
12	- 1.70	0.16	0.508	114	- 1.66	0.18	0.574	120
15	- 2.31	0.15	0.600	77	- 2.64	0.16	0.668	86
16	- 1.89	0.15	0.645	99	- 1.76	0.16	0.604	107
17	- 1.02	0.14	0.307	75	- 2.04	0.15	0.605	74
18	- 2.69	0.22	0.535	124	- 3.24	0.25	0.596	119

Im Gegensatz zur Wirkung bei den Buchenflächen weisen nur die Hälfte der gedüngten Fichtenflächen (2. Abschnitt der Tab. 2) steilere Zuwachsgeraden als die ungedüngten Parzellen auf. Eine überlegene Zuwachsförderung als Folge der Düngung kann demnach mit diesem Untersuchungsansatz bei den Fichten nicht festgestellt werden.

### 3.1.3 Periodischer Durchmesserzuwachs der Mittelstämme in Null- und Düngungsparzellen

Im Vergleich zwischen dem Durchmesserzuwachs der verschiedenen Mittelstämme (Tab. 3 und 4) zeigt sich im Bereich oberhalb des arithmetischen Mittels unabhängig von der Wahl des speziellen Mittelstammes und von seinem Ausgangsdurchmesser folgendes Bild:

**Tab. 3: Ausgangsdurchmesser verschiedener Mittelstämme in 1,3 m Höhe und deren Zuwachs von 1970 - 1976 bei B u c h e (0 = Nullparzelle, Dü = Düngungsparzelle)**

Flächen-Nr.:	1		2		3		4		5	
Behandlung:	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü
Hohenadl d- (cm)	23.61	21.96	15.89	16.22	21.30	21.89	14.28	15.34	15.33	17.59
Zuwachs (cm)	2.05	1.73	1.36	1.28	1.34	1.38	0.60	0.77	0.75	0.91
Arithm. Mittel (cm)	28.12	26.36	22.39	21.79	26.28	26.32	19.61	20.73	21.35	23.09
Zuwachs (cm)	2.73	2.43	2.01	2.25	2.00	1.99	1.50	1.66	1.54	1.76
Grundflächenmittel	28.48	26.72	23.31	22.49	26.75	26.69	20.32	21.42	22.18	23.74
Zuwachs (cm)	2.80	2.51	2.11	2.42	2.09	2.07	1.68	1.82	1.70	1.91
Hohenadl d+ (cm)	32.64	30.76	28.89	27.35	31.25	30.75	24.93	26.12	27.37	28.60
Zuwachs (cm)	3.40	3.13	2.66	3.22	2.66	2.61	2.39	2.55	2.33	2.61

Flächen-Nr.:	6		7		8		9		10		11	
Behandlung:	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü
Hohenadl d- (cm)	16.34	17.88	9.89	11.66	14.83	15.10	17.34	20.16	16.48	16.10	14.47	13.89
Zuwachs (cm)	0.46	0.70	0.48	0.37	0.58	0.73	0.88	0.87	0.88	0.85	0.57	0.53
Arithm. Mittel (cm)	22.27	23.22	14.58	15.92	19.80	19.73	24.53	26.56	21.59	22.45	22.49	22.54
Zuwachs (cm)	1.36	1.60	1.15	1.12	1.34	1.56	1.67	1.66	1.58	1.72	1.70	1.92
Grundflächenmittel	23.04	23.82	15.32	16.48	20.42	20.26	25.56	27.32	22.18	23.34	23.87	24.14
Zuwachs (cm)	1.56	1.76	1.30	1.28	1.48	1.71	1.83	1.80	1.70	1.89	1.99	2.29
Hohenadl d+ (cm)	28.19	28.55	19.27	20.18	24.78	24.35	31.72	32.96	26.69	28.81	30.51	31.19
Zuwachs (cm)	2.27	2.49	1.81	1.86	2.09	2.38	2.46	2.45	2.27	2.59	2.84	3.30

Bei den **Buchen** ist der durchschnittliche Durchmesserzuwachs sowohl beim arithmetischen, als auch beim Grundflächenmittelstamm der Düngeparzellen in 7 Fällen größer als jener der Nullparzellen. Die Parzellen von drei Flächen (Nr. 3, 7 und 9) reagieren nahezu identisch. Bei einer Fläche (Nr. 1) ergibt sich offensichtlich eine deutliche Unterlegenheit der gedüngten Parzelle, auf die im nächsten Abschnitt noch eingegangen wird.

**Tab. 4: Ausgangsdurchmesser verschiedener Mittelstämme in 1,3 m Höhe und deren Zuwachs von 1970 - 1976 bei F i c h t e (0 = Nullfläche; Dü = gedüngte Fläche)**

Flächen-Nr.:	12		14		15		16		17	
Behandlung:	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü
Hohenadl d- (cm)	15.91	15.06	18.31	19.00	20.41	20.72	17.80	16.70	19.78	21.66
Zuwachs (cm)	0.88	0.96	0.58	0.61	0.65	0.67	0.84	0.80	1.12	1.22
Arithm. Mittel (cm)	19.60	19.01	22.26	23.82	25.57	26.01	22.19	21.60	24.54	25.91
Zuwachs (cm)	1.52	1.70	1.36	1.40	1.44	1.56	1.54	1.67	1.86	1.89
Grundflächenmittel	19.95	19.42	22.61	24.31	26.08	26.54	22.62	22.14	25.00	26.25
Zuwachs (cm)	1.62	1.81	1.48	1.53	1.57	1.71	1.66	1.83	1.96	1.98
Hohenadl d+ (cm)	23.29	22.97	26.22	28.65	30.73	31.30	26.58	26.49	29.31	30.15
Zuwachs (cm)	2.17	2.43	2.13	2.18	2.23	2.45	2.25	2.55	2.59	2.56

Flächen-Nr.:	18		19		20		21		22	
Behandlung:	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü
Hohenadl d- (cm)	15.37	16.33	17.84	17.41	17.73	17.60	20.02	20.13	22.01	22.60
Zuwachs (cm)	0.81	0.78	0.82	0.77	0.63	0.73	0.58	0.60	0.75	0.99
Arithm. Mittel (cm)	18.76	19.85	22.23	22.10	22.29	22.42	24.99	25.74	27.16	28.00
Zuwachs (cm)	1.66	1.72	1.58	1.61	1.51	1.59	1.45	1.42	1.62	1.81
Grundflächenmittel	19.06	20.16	22.66	22.59	22.75	22.93	25.48	26.34	27.65	28.49
Zuwachs (cm)	1.80	1.87	1.70	1.75	1.66	1.74	1.59	1.56	1.76	1.90
Hohenadl d+ (cm)	22.15	23.38	26.62	26.79	26.84	27.23	29.96	31.34	32.32	33.40
Zuwachs (cm)	2.51	2.66	2.34	2.45	2.39	2.45	2.31	2.24	2.50	2.66

Bei den **Fichten** ist lediglich eine Düngeparzelle (Fläche 21) der dazugehörigen Nullparzelle unterlegen.



Zur Beurteilung, ob die Düngung zu einer statistisch absicherbaren Steigerung des durchschnittlichen Durchmesserwachstums geführt hat, wurde ein t-Test für abhängige Stichproben gewählt. Da das Durchmesserzuwachs-niveau auf den einzelnen Flächen unterschiedlich ist (Tab. 3 und 4), war es notwendig, den Durchmesser-mehr- bzw. -minderzuwachs der gedüngten gegenüber den ungedüngten Mittelstämmen mit einem einseitigen t-Test "gegen Null" zu prüfen (Tab. 5).

**Tab. 5: Einseitiger t-Test für abhängige Stichproben zur Untersuchung der Durchmesserzuwachs-differenzen von gedüngten und ungedüngten Mittelstämmen**

	B u c h e			F i c h t e		
Mittelstamm	Durchmesser- zuwachs- differenz (cm)	Standardabwe- ichung der Differenz (cm)	t-Wert	Durchmesser- zuwachs- differenz (cm)	Standardabwe- ichung der Differenz (cm)	t-Wert
Hohenadl "d-"	0.0155	0.1603	0.320 n.s.	0.0230	0.0556	1.308 n.s.
Arithmetisch. Mittel	0.0991	0.1699	1.934 *	0.0830	0.0709	3.703 **
Grundflächen- mittel	0.1109	0.1815	2.027 *	0.0880	0.0702	3.964 **
Hohenadl "d+"	0.1809	0.2389	2.52 *	0.1210	0.1210	3.163 **

n.s. nicht signifikant

\* signifikant ( $d \leq 0.05$ )

\*\* hoch signifikant ( $d \leq 0.01$ )

Dabei deutet sich eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine statistisch signifikante Zuwachssteigerung bei beiden Baumarten im Bereich der stärkeren Mittelstämmen an.

Aus dem insbesondere bei den Fichtenflächen aufgetretenen Widerspruch zwischen dem Verlauf der Zuwachsgeraden (Abschn. 3.1.1 und 3.1.2) und der signifikanten Zuwachssteigerung der stärkeren Mittelstämmen ergibt sich die Frage, welche statistischen Schlüsse aus dem oben gewählten Testverfahren zulässig sind. Um dieser Frage nachzugehen, wird geprüft, wie der hohe t-Wert zustande kommt. Dieser berechnet sich nach Gleichung (2).

$$t = \frac{\bar{x} - \mu(0)}{s} * n^{-2} \quad (2)$$

Da bei diesem Test  $\bar{x}$  gegen Null geprüft wird ( $\mu(0) = 0$ ), ergeben sich mit 10 (bei Fichte) bzw. 11 Wiederholungen (bei Buche) schon bei Standardabweichungen, die geringfügig größer sind als der zu prüfende Mittelwert, signifikante Unterschiede. Aufgrund der Differenzenbildung werden die Einzelwerte auf ein gemeinsames Niveau gehoben, was aber gleichzeitig zur Folge hat, daß die Standardabweichung verringert wird. Daher ist als Voraussetzung für die Anwendung dieses Tests zu fordern, daß die ursprünglichen Teilgesamtheiten, aus denen sich die Testgrößen berechnen, sehr homogen sind. Aus der Versuchsanlage ergibt sich jedoch, daß diese Bedingung nicht erfüllt ist. Die Aussagekraft der im t-Test gefundenen statistisch signifikanten Unterschiede muß also relativiert werden.

#### **3.1.4 Einfluß der Bestandesstruktur auf das Zuwachsverhalten der ungedüngten und gedüngten Parallelfelder**

Wie in den beiden vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, ergibt sich aus einer statistisch absicherbaren Durchmesserzuwachsdifferenz bei den Mittelstämmen der Parallelparzellen nicht notwendigerweise auch eine größere Steigung der Zuwachsgeraden. Es stellt sich somit die Frage, welche Gewichtung dem Zuwachs der Mittelstämmen überhaupt zukommt. Dieser Frage wurde am Beispiel des periodischen Zuwachses der Grundflächenmittelstämmen nachgegangen. In einer schrittweisen multiplen Regressionsanalyse wurde der Einfluß von Größen des Ausgangsbestandes, wie Bestandesalter, Stammzahl, Bestockungsgrad, Grundfläche und Durchmesser des Grundflächenmittelstammes, auf dessen Durchmesserzuwachs überprüft (Tab. 6). Die schrittweise multiple Regressionsanalyse ergibt, daß bei den Buchenflächen zwischen dem Durchmesserzuwachs des Grundflächenmittelstammes und Alter, Bestockungsgrad, Stammzahl, Grundflächenmittelstammdurchmesser und Grundfläche des Ausgangsbestandes hochsignifikante Zusammenhänge mit hohen Bestimmtheitsmaßen bestehen. Auch bei den Fichtenflächen wird ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Zuwachs und Bestockungsgrad, Stammzahl, Durchmesser des Grundflächenmittelstammes und Bestandesalter des Ausgangsbestandes nachgewiesen.

Tab. 6: Schrittweise multiple Regressionsanalyse für die abhängige Variable "periodischer Durchmesserzuwachs des Grundflächenmittelstammes"

Variablen	Regressions- koeffizienten	Bestimmtheits- maß	Signifikanz
<b>Buchenflächen</b>			
DGM	0,08560	0,56143	0,000
N	-0,00101	0,57452	0,000
G	-0,07009	0,35778	0,002
B°	-1.26814	0,48144	0,000
A	0,01460	0,25991	0,006
DGM B°	0,05897 -0,62604	0,62440	0,000
N G	-0,00082 -0,03164	0,62657	0,000
N DGM G	0,00020 0,08469 -0,05070	0,70197	0,000
N DGM A G	-0,00017 0,09558 -0,01286 -0,05211	0,76343	0,000
N DGM A G B°	0,00024 0,11120 -0,02209 -0,00550 -1.42818	0,76969	0,000

A = Ausgangsbestandesalter

B° = Bestockungsgrad

DGM = Ausgangsdurchmesser des Grundflächenmittelstammes

G = Ausgangsgrundfläche

N = Stammzahl

noch Tab. 6:

Variablen	Regressions- koeffizienten	Bestimmtheits- maß	Signifikanz
<b>Fichtenflächen</b>			
N	-0,00001	0,00017	0,454
DGM	0,00079	0,00024	0,451
A	-0,00233	0,03150	0,223
G	-0,00704	0,05146	0,162
B°	-0,53344	0,09377	0,087
B° DGM	-0,64393 0,00828	0,11568	0,069
B° DGM N	-1,14691 0,05871 0,00078	0,20674	0,024
B° DGM N A	-1,43738 0,08599 0,00104 -0,00548	0,33586	0,005
B° DGM N A G	-1,72957 0,07837 0,00099 -0,00644 0,00821	0,33868	0,007

- A = Ausgangsbestandesalter  
 B° = Bestockungsgrad  
 DGM = Ausgangsdurchmesser des Grundflächenmittelstammes  
 G = Ausgangsgrundfläche  
 N = Stammzahl

Bestockungsgrad, Grundfläche, Stammzahl und Durchmesser des Grundflächenmittelstammes sind Kenngrößen für die Bestandesstruktur. Wenn eine durch Düngung verursachte Mehrleistung statistisch an Zuwachsdifferenzen von Mittelstämmen abgesichert werden soll und zuwachsrelevante Einflüsse z.T. in hohem Maße durch die Ausgangsstruktur der Bestände erklärt werden können, muß die Bestandesstruktur von gegeneinander zu prüfenden Parzellenpaaren

im Ausgangsstadium vergleichbar sein. Damit schien es notwendig zu untersuchen, wie gut Düngungs- und dazugehörige Nullflächen in der Durchmesserstruktur der Ausgangsbestände übereinstimmen.

Zur Untersuchung der Frage, ob zwei unabhängige Stichproben von Häufigkeitsdaten aus derselben Grundgesamtheit stammen, wurde der Kolmogoroff-Smirnoff-Test als schärfster Homogenitätstest (SACHS, 1984) gewählt (Tab. 7). Hierbei wird die Nullhypothese "Gleichheit beider Grundgesamtheiten" gegen die Alternativhypothese "Beide Grundgesamtheiten weisen eine unterschiedliche Verteilung auf" geprüft.

**Tab. 7: Ergebnisse eines Verteilungstests der Durchmesserstrukturen der ungedüngten und gedüngten Versuchsflächenpaare (Kolmogoroff-Smirnoff-Test)**

Buchenflächen (je eine ungedüngte und gedüngte Parzelle)		
Flächen-Nr.	Signifikanz	Nullhypothese
1	n.s.	ist beizubehalten
2	n.s.	ist beizubehalten
3	n.s.	ist beizubehalten
4	n.s.	ist beizubehalten
5	(*)	(wird zurückgewiesen)
6	n.s.	ist beizubehalten
7	(*)	(wird zurückgewiesen)
8	n.s.	ist beizubehalten
9	n.s.	ist beizubehalten
10	n.s.	ist beizubehalten
11	n.s.	ist beizubehalten
Fichtenflächen (je eine ungedüngte und gedüngte Parzelle)		
12	n.s.	ist beizubehalten
14	(*)	(wird zurückgewiesen)
15	n.s.	ist beizubehalten
16	n.s.	ist beizubehalten
17	*	wird zurückgewiesen
18	(*)	(wird zurückgewiesen)
19	n.s.	ist beizubehalten
20	n.s.	ist beizubehalten
21	n.s.	ist beizubehalten
22	n.s.	ist beizubehalten

n.s. nicht signifikant (d > 0.10)  
 (\*) schwach signifikant (d ≤ 0.10)  
 \* signifikant (d ≤ 0.05)

Unterschiede in der Bestandesstruktur der Ausgangsbestände können danach nicht generell unterstellt werden. Dennoch liegen in den jeweiligen Parzellenpaaren der zusammengehörenden Null- und Düngungsflächen unterschiedliche Stammzahlen und Durchmesser der Mittelstämme (Tab. 1 bis 4), sowie z.T. erhebliche Abweichungen im Bestockungsgrad (Tab. 8) vor.

**Tab. 8: Bestockungsgrade der Versuchsflächen (WIEDEMANN, bzw. SCHÖBER, mäßige Durchforstung)**

B u c h e

Parzelle	1		2		3		4		5		6	
Düngung	0	D	0	D	0	D	0	D	0	D	0	D
Bestockungsgrad	0.73	0.72	1.12	1.06	0.78	0.81	0.86	0.90	0.91	1.01	1.06	1.01

Parzelle	7		8		9		10		11	
Düngung	0	D	0	D	0	D	0	D	0	D
Bestockungsgrad	1.22	1.52	1.44	1.07	1.11	1.04	0.94	0.92	0.84	0.84

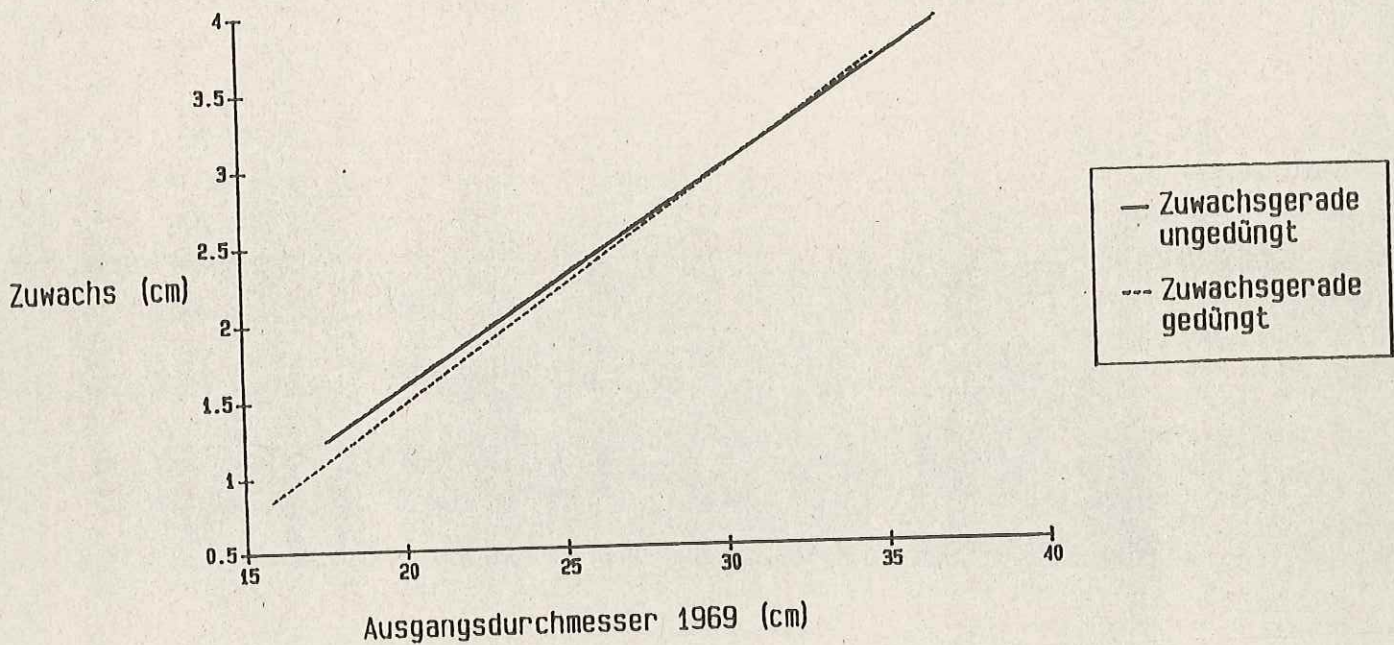
F i c h t e

Parzelle	12		14		15		16		17	
Düngung	0	D	0	D	0	D	0	D	0	D
Bestockungsgrad	0.90	0.90	1.05	0.97	1.00	1.17	1.04	1.06	0.89	0.97

Parzelle	18		19		20		21		22	
Düngung	0	D	0	D	0	D	0	D	0	D
Bestockungsgrad	0.94	1.02	0.92	0.83	1.07	1.00	1.05	1.10	1.02	1.00

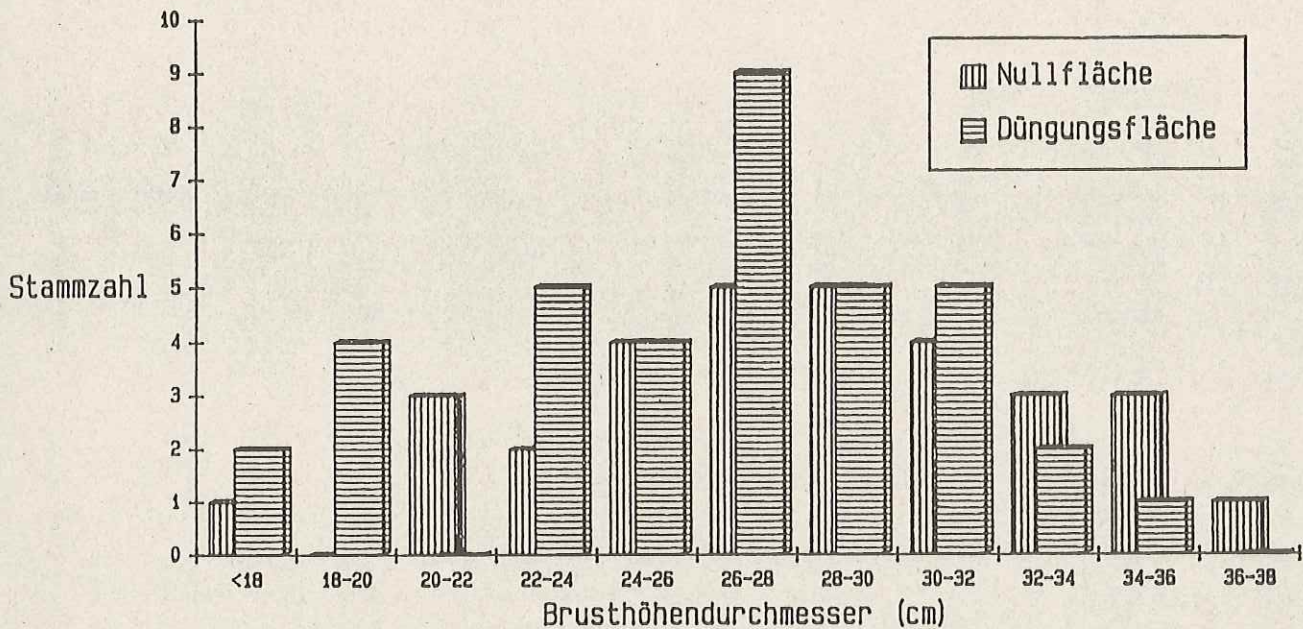
Am Beispiel der Versuchsfläche 1 wird erläutert, wie sich kleinste - auch statistisch nicht mehr nachweisbare - Unterschiede der Bestandesstruktur auf das Zuwachsverhalten der Parallelparzellen auswirken: Für den Durchmesserzuwachs ergibt sich in dieser Buchenparzelle eine offensichtliche Unterlegenheit der gedüngten Fläche, wobei die Durchmesservertelung der Ausgangsbestände ohne weiteres als vergleichbar gelten könnte (Tab. 7). Um den Minderzuwachs der Düngfläche zu erklären, wurden zunächst die Zuwachsgeraden verglichen (Abb. 5).

Abb. 5: Periodischer Durchmesserzuwachs (1970 - 1976) der ungedüngten und gedüngten Buchen auf Parzelle 1



Die Zuwachsgerade der gedüngten Fläche verläuft steiler als die der ungedüngten Fläche. Da der Achsenabschnitt  $a$  der Regressionsgeraden der Düngefläche jedoch kleiner ist (vgl. Tab. 1), erreicht die Düngefläche erst im Bereich der oberen Durchmesser das Durchmesserzuwachs-niveau der ungedüngten Fläche. Die ungedüngte Fläche besitzt weniger geringe, zu-wachsschwache Durchmesser und mehr starke Stämme (Abb. 6), womit der höhere Zuwachs insbesondere der stärkeren Mittelstämme (Tab. 3) zu erklären wäre. Dies bestätigt aber auch die Hypothese, daß der unterschiedliche Durchmesserzuwachs von Mittelstämmen zum Teil auf einer jeweils anderen Bestandesstruktur beruht.

Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der Durchmesser in der Null- und der Düngungsfläche der Parzelle 1



In einer "Struktursimulation" wurde nun der Zuwachs der Null- und Düngeparzellen hergeleitet, wie er sich ergeben hätte, wenn diesen bei gleichbleibender Zuwachsreaktion die Häufigkeitsverteilung der Durchmesser von der jeweils anderen Parzelle unterstellt wird (Tab. 9). Der jeweils korrigierte Zuwachs (aus der Berechnung (3), Tab. 9) weicht vom tatsächlichen Zuwachs ab. Es erfolgt eine Annäherung im Zuwachsverhalten beider Flächen. Unter Umständen wird also durch bei der Versuchsflächenauswahl nicht erkennbare Strukturunterschiede in der Folgezeit ein Minder- oder aber auch ein Mehrzuwachs vorgetäuscht.



**Tab. 9: "Struktursimulation" für die Dünge- und Nullparzellen**

Durchmesser- klasse (cm)	period. Zuwachs der Nullfläche mit der Durchmesserverteilung der Düngefläche		period. Zuwachs der Düngefläche mit der Durchmesserverteilung der Nullfläche	
	Häufigkeit	mit der Häufigkeit gewichteter Zuwachs nach der Regression $y = -1.19 + 0.14 x$ (Tab. 1)	Häufigkeit	mit der Häufigkeit gewichteter Zuwachs nach der Regression $y = -1.52 + 0.15 x$ (Tab. 2)
15.1 - 16	1	1.02	0	0
16.1 - 17	0	0	0	0
17.1 - 18	1	1.32	1	1.11
18.1 - 19	1	1.46	0	0
19.1 - 20	0	0	0	0
20.1 - 21	3	5.11	3	4.68
21.1 - 22	0	0	0	0
22.1 - 23	3	5.98	1	1.89
23.1 - 24	2	4.29	1	2.00
24.1 - 25	2	4.52	2	4.45
25.1 - 26	2	4.71	2	4.63
26.1 - 27	4	10.06	1	2.44
27.1 - 28	5	13.42	4	10.47
28.1 - 29	3	8.40	4	11.17
29.1 - 30	3	8.95	3	8.77
30.1 - 31	2	6.18	2	6.05
31.1 - 32	2	6.38	2	6.38
32.1 - 33	0	0	3	9.97
33.1 - 34	2	7.02	0	0
34.1 - 35	1	3.68	2	7.31
35.1 - 36		0	1	3.78
36.1 - 37		0	1	3.99
	N = 37	Summe = 92.50	N = 33	Summe = 89.09

Durchschnittlicher periodischer Einzelbaumdurchmesserzuwachs der Düngefläche : 2,44 cm  
 Korrigierter Zuwachs der Düngefläche unter Annahme der Häufigkeitsverteilung  
 der Durchmesser der Nullfläche : 2,69 cm

nach  $89,09 : 33 = 2,69$  (3)

Durchschnittlicher periodischer Einzelbaumdurchmesserzuwachs der Nullfläche : 2.75 cm  
 Korrigierter Zuwachs der Nullfläche unter Annahme der Häufigkeitsverteilung  
 der Durchmesser der Düngungsfläche : 2,50 cm

nach  $92.50 : 37 = 2,50$  (3)

Strukturbedingter Zuwachsunterschied : 0,25 cm pro Baum

### 3.2 Periodischer Grundflächenzuwachs

Wird der Düngeneffekt direkt nach dem Verhältnis des Grundflächenzuwachses von gedüngter und ungedüngter Fläche beurteilt (Tab. 10), so ergibt sich ein vom Vergleich des Durchmesserzuwachses der Mittelstämme (Tab. 3 und 4) abweichendes Bild.

Tab. 10: Grundfläche 1969 und periodischer Grundflächenzuwachs in  $m^2/ha$

#### B u c h e

Parzellen Nr.:	1		2		3		4		5	
Behandlungsart	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü
Grundfläche 1969 ( $m^2$ )	21.03	20.75	28.17	26.60	22.47	23.50	23-35	24.50	25.12	27.89
Grundfläche 1977 ( $m^2$ )	25.37	24.83	33.51	32.60	26.12	27.28	27.37	28.88	29.12	32.56
Zuwachs ( $m^2$ )	4.34	4.08	5.30	6.00	3.64	3.78	4.03	4.38	4.00	4.67
Zuwachs in %	20.61	19.67	18.94	22.71	16.21	16.09	17.24	17.86	15.91	16.73

Parzellen Nr.:	6		7		8		9		10		11	
Behandlungsart	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü
Grundfläche 1969 ( $m^2$ )	29.19	27.63	25.33	31.56	31.77	24.18	31.30	29.30	26.27	25.66	24.17	24.26
Grundfläche 1977 ( $m^2$ )	33.26	31.88	29.82	36.63	36.56	28.43	35.9	33.3	30.45	29.99	28.37	29.09
Zuwachs ( $m^2$ )	4.07	4.24	4.48	5.07	4.79	4.25	4.64	3.99	4.17	4.33	4.20	4.82
Zuwachs %	13.96	15.36	17.69	16.08	15.07	17.59	14.82	13.62	15.88	16.88	12.36	18.89

durchschnittlicher Grundflächenmehrzuwachs der Düngeparzellen:  $0.18 m^2/ha$

noch Tab. 10:

F i c h t e

Parzellen Nr.:	12		14		15		16		17	
Behandlungsart	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü
Grundfläche 1969 (m <sup>2</sup> )	35.63	35.54	40.96	37.56	41.15	47.59	39.77	40.82	36.82	40.06
Grundfläche 1977 (m <sup>2</sup> )	41.64	42.49	46.47	42.47	46.25	53.93	45.82	47.85	42.83	46.32
Zuwachs (m <sup>2</sup> )	6.01	6.95	5.52	4.88	5.10	6.33	6.05	7.03	6.01	6.26
Zuwachs in %	16.88	19.54	13.48	12.99	12.41	13.31	15.21	17.23	16.34	15.62

Parzellen Nr.:	18		19		20		21		22	
Behandlungsart	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü	0	Dü
Grundfläche 1969 (m <sup>2</sup> )	35.38	38.00	35.89	32.47	41.05	38.39	46.91	49.04	45.60	44.70
Grundfläche 1977 (m <sup>2</sup> )	42.37	45.36	41.47	37.71	47.26	44.45	52.96	55.03	51.64	50.91
Zuwachs (m <sup>2</sup> )	6.98	7.36	5.58	5.24	6.21	6.06	6.05	5.99	6.00	6.21
Zuwachs in %	19.73	19.37	15.56	16.13	15.12	15.78	12.90	12.22	13.17	13.9

durchschnittlicher Grundflächenmehrzuwachs der Düngeparzellen: 0.28 m<sup>2</sup>/ha

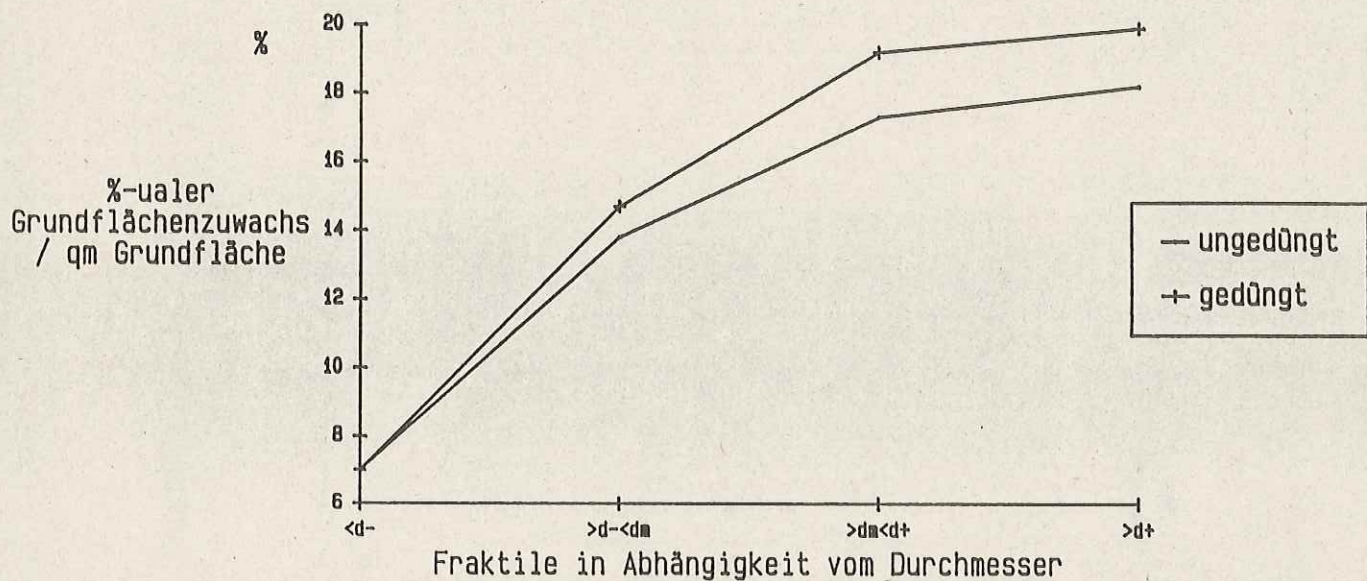
Manche Parzellen haben offensichtlich dem Durchmesserzuwachs nach reagiert, nicht aber, wenn man den Grundflächenzuwachs als Weiser betrachtet. Auch der umgekehrte Fall tritt auf. Zu diesem Ergebnis trägt die bekannte Tatsache bei, daß der Grundflächenzuwachs nicht nur vom Durchmesserzuwachs, sondern unmittelbar rechnerisch auch von dem Ausgangsdurchmesser des Grundflächenmittelstammes nach folgender Gleichung (4) abhängt:

$$ZG = \pi * 1/4 * N * ZDGM * (2 * DGM + ZDGM) \quad (4)$$

- ZG = Grundflächenzuwachs pro ha  
 N = Stammzahl pro ha  
 ZDGM = Durchmesserzuwachs des Grundflächenmittelstammes 1969  
 DGM = Durchmesser des Grundflächenmittelstammes 1969

Hier tritt also durch die oftmals nicht identischen Ausgangsgrundflächen eine zusätzliche, in der Praxis kaum vermeidbare Streuungsursache auf, die sich auf den Grundflächenzuwachs überträgt.

**Abb. 7: Durchschnittlicher prozentualer Grundflächenzuwachs in Abhängigkeit der Durchmesserfraktile (Hohenadl'sche Mittelstämme d- und d+, sowie arithmetischer Mittelstamm) bei Buche**



Stellt man für alle Buchenflächen den gemittelten, prozentualen Grundflächenzuwachs jener 4 Fraktile dar, die sich aus dem arithmetischen und den beiden Hohenadl'schen Mittelstämmen ergeben, so zeigt sich ein mit dem Durchmesser zunehmender Trend für eine Überlegenheit der Düngungspartellen, in der sich wiederum eine Düngewirkung auf die Bestandesstruktur andeutet (Abb. 7).

Bei der Fichte besteht kein nennenswerter Unterschied.

### 3.2.1 Bereinigung des Grundflächenzuwachses aufgrund unterschiedlicher Bestandesstrukturen

Um den Einfluß der unterschiedlichen Durchmesserstrukturen auszuschalten, wurde für die Düngeparzellen jener Grundflächenzuwachs hergeleitet (Tab. 11 und 12), der sich mit der Ausgangsgrundfläche und Struktur der Nullparzelle (nach Gleichung (4)), aber dem aus der Zuwachsregression der Düngeparzelle abgeleiteten Durchmesserzuwachs (nach Gleichung (1) in Tab. 1 und 2) ergeben hätte.

**Tab. 11: Herleitung des bereinigten Grundflächenmehrzuwachses bei Buche**

Parzelle Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Bereinigter Grundflächenzuwachs, Düngefläche *	4.26	6.53	3.42	3.29	4.04	3.94	3.46	5.35	3.88	4.09	4.64
Tatsächlicher Grundfläch. zuwachs, Nullfläche	4.34	5.30	3.64	4.03	4.00	4.07	4.48	4.79	4.64	4.17	4.20
Bereinigter Mehrzuwachs	-0.08	1.23	-0.22	-0.74	0.04	-0.13	-1.02	0.56	-0.76	-0.08	0.44

\* Berechnet nach Gleichung (1) und (4)

Bereinigter Mittelwert des Mehr-/Minderzuwachses:  $-0.07 \text{ m}^2/\text{ha}$

Durch die Unterstellung gleicher Ausgangsstrukturen in den Versuchsflächenpaaren kommt es bei den gedüngten **Buchenparzellen** nicht mehr zu einem höheren Grundflächenzuwachs gegenüber den ungedüngten Parzellen.

**Tab. 12: Herleitung des bereinigten Grundflächenmehrzuwachses bei Fichte**

Parzelle Nr.	21	17	19	14	18	20	15	22	16	12
Bereinigter Grundflächenzuwachs, Düngefläche *	7.23	4.72	4.98	6.81	5.21	5.89	5.40	5.85	5.05	6.11
Tatsächlicher Grundfläch. zuwachs, Nullfläche	6.05	6.01	5.58	5.52	6.98	6.21	5.10	6.00	6.05	6.01
Bereinigter Mehrzuwachs an Grundfläche	1.18	-1.29	-0.60	1.29	-1.77	-0.32	0.30	-0.15	-1.00	-0.10

\* Berechnet nach Gleichung (1) und (4)

Bereinigter Mittelwert des Mehr-/Minderzuwachses:  $-0.25 \text{ m}^2/\text{ha}$

Durch die Unterstellung der Struktur der Nullparzelle zeigt sich bei den gedüngten Fichtenparzellen ein geringerer Grundflächenzuwachs als bei den ungedüngten Fichtenparzellen.

### 3.3 Stammform und periodischer Höhenzuwachs

Durch die sektionsweise Vermessung der Probestämme in der Fichtenparzelle Nr. 16 wurde die echte Formzahl zumindest näherungsweise bestimmt. Ein signifikanter Unterschied zwischen gedüngter und ungedüngter Fläche wurde nicht gefunden. Dies gilt auch für den Höhenzuwachs. Die durchschnittliche echte Formzahl betrug 0,5482, der mittlere periodische Höhenzuwachs 2,06 m.

### 3.4 Periodischer Volumenzuwachs

Tab. 13 enthält die als gewogenes Mittel aus verbleibendem und ausscheidendem Bestand der Ertragstafel hergeleiteten Formhöhen, den Grundflächenmehr-/minderzuwachs und den hieraus näherungsweise ermittelten Volumenmehr-/minderzuwachs. Hingewiesen sei auf den bei beiden Baumarten vorkommenden Minderzuwachs gedüngter Parzellen.

**Tab. 13: Näherungsweise Volumenmehr-/minderzuwachs von 1970 - 1976 durch Düngung (Efm. o.R/ha) der Versuchsflächen**

B u c h e

Parzelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittelwert
Formhöhe	9.36	6.91	9.36	7.28	7.98	7.87	3.41	4.97	7.99	7.74	9.18	
Grundflächen- mehr-/minder- zuwachs	-0.26	0.70	0.14	0.35	0.67	0.17	0.59	-0.54	-0.65	0.16	0.62	
Volumen- mehr-/minder- zuwachs	-2.43	4.84	1.31	2.55	5.35	1.33	2.01	-2.68	-5.19	1.24	5.69	1.275

noch Tab. 13:

Fichte

Parzelle	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Mittelwert
Formhöhe	8.53	8.41	9.60	8.51	9.86	7.77	8.52	8.26	10.96	10.96	
Grundflächen- mehr-/minder- zuwachs	0.94	-0.64	1.23	0.98	0.25	0.38	-0.34	-0.15	-0.60	0.21	
Volumen- mehr-/minder- zuwachs	7.83	-5.38	11.81	8.33	2.47	2.95	-2.90	-1.24	-0.66	2.30	2.66

#### 4 VERSAUERUNGSGRAD DER BÖDEN UND NADELANALYSENERGEBNISSE

Im Untersuchungsgebiet dominieren oberflächlich schon 1968 stark versauerte Böden (Tab. 14). Die Bestände gehören heute zu den in Rheinland-Pfalz am stärksten von den neuartigen Waldschäden betroffenen Wuchsbezirken.

Tab. 14: Bodenazidität in den Fichtenparzellen 1968

Parzelle Nr.	Boden-pH 1968 im Ah	
	H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub>
14	3.5	3.1
15	3.7	3.1
16	3.4	2.9
17	3.5	2.9
18	3.5	2.9
19	4.0	3.4
20	2.5	2.8
21	3.4	2.8
22	3.6	3.0
	3.6	3.0

Erstaunlich erscheinen daher die damals noch mittleren bis hohen Nadelspiegelwerte (Tab. 15) von Phosphor und Magnesium, bei auffallend niederen Calciumgehalten und mäßiger Versorgung mit Kali. Der im gesamten Untersuchungsgebiet damals herrschende Stickstoffmangel

wird, wie das Ergebnis der Wiederbeprobung in Parzelle 16 (Tab. 16) ergibt, durch die Düngung behoben. Gleichzeitig verbessert sich die Calciumversorgung. Wie zu erwarten sinken durch Antagonismen und Verdünnungseffekte die Gehalte an Kalium.

Tab. 15: Nadelspiegelwerte 1969\*

Parzelle Nr.	N %	P mg/g	K mg/g	Mg mg/g	Ca mg/g	Al ppm	Fe ppm	Mn ppm
14	1.28	1.6	7.29	0.84	2.33	96	236	907
15	1.41	1.7	6.01	0.96	1.95	126	175	1283
16	1.34	2.45	6.07	1.52	2.84	145	160	1957
17	1.28	1.62	4.49	1.04	2.48	127	122	2563
18	1.25	1.62	7.14	0.69	1.11	110	103	1159
19	1.12	1.46	6.11	0.94	2.12	124	111	1276
20	1.31	1.60	6.94	0.86	3.18	78	158	738
21	1.11	1.55	4.91	0.72	2.20	91	207	1873
22	1.29	1.29	4.74	1.15	2.92	75	148	1890
x	1.27	1.65	5.97	0.97	2.35	108	158	1516
s	± 0.09	± 0.32	± 1.06	± 0.25	± 0.62	±24.33	±43.89	±588.8

N      N-HH    N-H      M-HH    NN-N    N-M      H-HH    M-H  
 ————  
 H      M      H      N      M      H      H

\* Einstufung der Nährstoffgehalte nach KNABE (1984)

NN = sehr niedrig, N = niedrig, M = mittel, H = hoch, HH = sehr hoch

Tab. 16: Mittelwerte der Nadelanalysen von jeweils 18 Proben aus der Null- und Düngeparzelle der Versuchsfläche 16 aus dem Winter 1976

	0-Fläche		Düngungsfläche		t-Wert
	Gehalt mg/g	Standardabw.	Gehalt mg/g	Standardabw.	
N	11.226 (N)	1.82	14.10 (M)	1.20	5.59 **
P	1.52 (H)	0.28	1.58 (H)	0.207	0.73 n.s.
K	6.54 (H)	1.61	5.61 (M)	0.86	2.16 *
Mg	1.17 (HH)	0.317	1.204 (HH)	0.283	0.34 n.s.
Ca	3.13 (N)	0.75	3.74 (M)	0.95	2.13 *
Fe	0.154 (H)	0.033	0.157 (H)	0.059	-
Na	0.067	0.014	0.043	0.022	3.90 **

\*\* Signifikanz  $\alpha \leq 0.01$

\* Signifikanz  $\alpha \leq 0.05$

n.s. nicht signifikant



## 5 DISKUSSION

Wie gezeigt wurde, ergeben sich durch das diesem Versuch zugrunde liegende Konzept eines Streuversuches erhebliche Schwierigkeiten bei der Auswertung und Interpretation von ertragskundlichen Meßdaten. Bei dem Vergleich unterschiedlicher Teilpopulationen treten zuwachsrelevante Einflüsse auf, die durch unterschiedliche Ausgangsbestandesstrukturen bedingt sind und welche nachträglich nicht einwandfrei herausgerechnet werden können. Viele der hier aufgetretenen Schwierigkeiten hätten wohl durch eine vorherige eingehende Projektplanung mit Formulierung der statistischen Problemlage und entsprechenden Voruntersuchungen (vgl. SACHS, 1990) eingegrenzt werden können.

Zu diesen methodisch bedingten Schwierigkeiten traten Beeinträchtigungen hinzu, welche in langfristig angelegten forstlichen Düngeversuchen vermutlich eher die Regel als die Ausnahme sind. Sie seien deshalb ausdrücklich erwähnt: Von ursprünglich 29 Doppelflächen verblieben für die Auswertung nur 21. Auf 3 Flächen war die Beschriftung unkenntlich geworden. 2 Flächen waren unbeabsichtigt durchforstet worden. 3 weitere Flächen fielen durch Schneebruch, sowie durch ursprünglich nicht erkannte Standortsunterschiede aus. In Fällen, in denen bereits der optische Eindruck der Jahrringbreiten vor und nach der Düngung die Düngewirkung klar belegt, handelt es sich beim Verlust oder bei der nachträglichen Zerstörung von Versuchspartzellen um bedauerliche Mißgeschicke, die aber aufgrund der eindeutig erkennbaren Zuwachssteigerungen die Versuchsaussage wenig beeinträchtigen. Bei unterschiedlichen Ausgangsstrukturen und wenig deutlicher Reaktion der Bestände ergeben sich durch die verringerte Zahl von Wiederholungen erhebliche Schwierigkeiten, die Düngewirkung statistisch abzuschern.

Hat die Düngung im vorliegenden Versuch überhaupt zu einem Mehrzuwachs geführt? Traditionelle, objektive statistische Testmodelle und herkömmliche Signifikanzschwellen erscheinen bei dieser Frage nur vordergründig hilfreich, geht ihrer Anwendung doch unweigerlich die subjektive Entscheidung voraus, ob die Voraussetzungen des statistischen Entscheidungsmodells in hinreichendem Maße vorliegen.

Wählt man beispielsweise im vorliegenden Versuch den periodischen Durchmesserzuwachs der Mittelstämme (Tab. 5) als Weiser für die Düngewirkung, und akzeptiert man zufallsbedingte Unterschiede in der Ausgangssituation, so kann die Null-Hypothese mit der traditionell üblichen Wahrscheinlichkeitsschwelle verworfen werden; die Düngung hat dann zu einem Mehrzuwachs geführt.

Auch nur geringfügige Unterschiede im durchschnittlichen Durchmesserzuwachs sollten nicht unterbewertet werden: Schon geringe Differenzen können bereits einen unterschiedlichen Volumenzuwachs von mehreren Festmeter pro Hektar bedeuten.

Die statistische Absicherung von geringen Mittelstammdurchmesserzuwachsdifferenzen bei Null- und Düngungspartellenpaaren (Tab. 5) mit einem t-Test für abhängige Stichproben ist jedoch schon bei kleinen Strukturunterschieden im Ausgangsbestand wenig aussagekräftig, da dieser Zuwachs von der Ausgangsstruktur der Bestände entscheidend beeinflusst wird (Tab. 6), was einen möglichen Düngungseffekt überlagern kann.

Insbesondere wenn nur ein bestimmtes Baumkollektiv durch die Düngung einen Mehrzuwachs erfährt, wie es auf den gedüngten Buchenparzellen mit der Begünstigung stärkerer Bäume geschehen ist, sind die Zuwachsgeraden geeigneterer Weiser für einen Mehrzuwachs als die Zuwächse der Mittelstämme.

Bezieht man also unterschiedliche Ausgangssituationen in die Analyse ein oder wählt man den betriebswirtschaftlich bedeutungsvolleren Grundflächen- oder Volumenzuwachs, so werden traditionelle Signifikanztests für die Untersuchung der Null-Hypothese nicht ausreichen. Unterstellt man der gedüngten Parzelle die Bestandesstruktur der ungedüngten Parzelle und berechnet man den flächenbezogenen Zuwachs mit der Zuwachsregression der gedüngten Fläche, so kann weder bei Buche noch bei Fichte eine überlegene Zuwachsreaktion festgestellt werden (vgl. Kap. 3.2.1).

Im mittleren Hunsrück bildet das Wasser den wichtigsten, für Fichte den ausschlaggebenden ertragsbegrenzenden Faktor. So beruht z.B. das Standortkartierungsverfahren im Untersuchungsgebiet im Wesentlichen auf einer für die dort vorherrschenden Substratreihen typischen, straffen Beziehung zwischen Ertragsklasse und Wasserhaushalt. Im Untersuchungsgebiet herrschen mittlere Ertragsklassen und Frischestufen vor. Mit chronischem Wasserdefizit ist also zu rechnen. Die Untersuchungen von SPIECKER (1987) über Auswirkungen von Düngungsmaßnahmen mit Kalkammonsalpeter zeigten um so schwächere Düngungseffekte, je geringer das Niederschlagsangebot am Standort war. Auch KENNEL (1967) konnte in entsprechenden Düngungsversuchen mit Fichte keinen statistisch nachweisbaren Mehrzuwachs finden.

Die Wasserversorgung der Fichten war aber nicht allein wuchsbegrenzend. Von einer Düngung konnten auch aus wachstumsphysiologischer Sicht keine Erfolge erwartet werden. In dem Kastellauner Düngungsversuch (SCHÜLER, 1990) zeigte sich, daß Düngungseffekte bei hohem Dichtstand der Bestände ausgeblieben sind. Zuwachsreaktionen nach Düngung beruhen entweder auf einer Verbesserung der photosynthetischen Leistung der Blattorgane, z.B. durch Erhöhung des Chlorophyllgehaltes, auf Änderungen der internen Verteilung der Photosynthate, oder aber auf einer Kronenexpansion (STRAND und DeBELL 1979). Die photosynthetische Effektivität variiert im allgemeinen lediglich um 10-30 %, während das Gros des Mehrzuwachses vermehrter Blattmasse zuzuschreiben ist (BINKLEY 1986). Der Kronenvergrößerung sind aber bei hohen und bisweilen überhöhten Bestockungsgraden der Fichten (Tab. 8) trotz Verbesserung der Stickstoffversorgung (Tab. 16) enge Grenzen gesetzt. Die Versuchsauswertungen von HAUSSER et al (1969) zeigten z.B. nach Kalkammonsalpeterdüngung solange an-

haltende Mehrzuwachsleistungen, solange eine Vergrößerung der Kronenbiomasse erfolgen konnte. Nach dem in Folge der Düngung raschen Zusammenwachsen der Bestände ließ der Mehrzuwachs schließlich nach. Eine Düngung kann also über kronenexpansive Effekte zu einer Beschleunigung der natürlichen Bestandesdifferenzierung durch Begünstigung stärkerer Bäume führen. Für die Stickstoffdüngung gilt dies in besonderem Maße, sofern der Gesamtnährstoffhaushalt nicht aus dem Gleichgewicht gebracht wird (SCHÜLER, 1990). Die Buchenflächen erreichten wie die Fichtenflächen einen durchschnittlichen Bestockungsgrad von fast 1,0 (Tab. 8). Jedoch sind Buchenbestände bezüglich ihrer Kronenexpansion heterogener als Fichtenbestände. Damit war bei den im Kronenraum dominierenden Buchen ein höherer Zuwachs zu erwarten. Dieser begünstigende Effekt wird hier bei den gedüngten Buchen gezeigt, während ähnliche Reaktionen bei den Fichtenflächen ausgeblieben sind.

Tab. 8 belegt für die Fichtenflächen einen durchschnittlichen Bestockungsgrad von 1,0. Die Bestandesbehandlung der Fichte bewegte sich demnach bezüglich der Grundflächenhaltung an der oberen von PETRI (1960) vorgegebenen Grenze. Er forderte für die Standorte in Rheinland-Pfalz bei mittlerem Wasserhaushalt eine Grundflächenhaltung von 85 - 105 %, auf schlecht wasserversorgten Standorten von 70 - 90 % der Ertragstafelwerte "Wiedemann, mäßige Durchforstung". Allgemein nimmt ein durch Düngung erzielbarer Mehrzuwachs in Abhängigkeit von der Ausgangsgrundfläche zu, um danach rasch wieder zurückzugehen (STRAND und DeBELL 1979). Begrenzen Ernährung, Wassermangel oder intensive Konkurrenz das Wachstum, so führt eine Düngung nicht zu einer generellen Zuwachssteigerung (GUSSONE, 1975). Demnach hätten also starke Durchforstungen vor der Düngung die Wahrscheinlichkeit, einen Mehrzuwachs zu erzielen, erhöht.

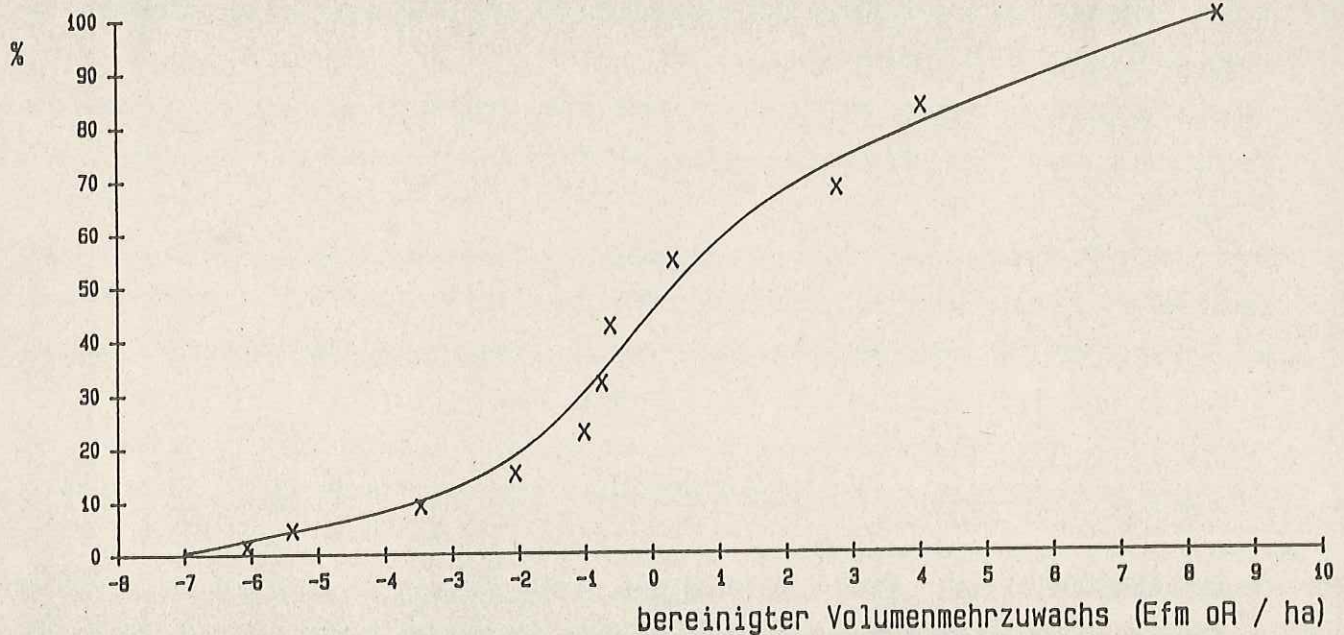
Ist dies die alleinige Ursache für die beobachtete, gelegentliche flächen- und volumenbezogene Minderleistung gedüngter Parzellen gegenüber ihren Kontrollparzellen? Vermutlich ist die Erklärung einfacher: Tab. 10 zeigt, daß ein geringerer Grundflächenzuwachs der gedüngten Parzelle i.d.R. dann auftritt, wenn die Ausgangsgrundfläche der Düngungsfläche um 2 und mehr  $m^2$  pro ha unter jener der Vergleichsfläche liegt. Der Minderzuwachs erscheint demnach als Scheinprodukt der Versuchsanlage und erklärt sich rein deterministisch dadurch, daß der Grundflächenzuwachs eben nicht nur vom Durchmesserzuwachs, sondern, wie bereits in Abschnitt 3.2 gezeigt, rein rechnerisch von der Ausgangsgrundfläche abhängt. Umgekehrt kann dies auch zu überhöhtem, nur scheinbaren Mehrzuwachs an Grundfläche und Volumen führen.

Nach ANDERSON et al. (1977, nach SCHÖNE, 1983) kann die Zuwachsreaktionsverteilung in einem bestimmten Kollektiv nach der Verteilungstichprobe geschätzt werden. Dabei stellt unabhängig von der Form der Häufigkeitsverteilung die "k"-te Beobachtung einer nach zunehmender Größe geordneten Stichprobe aus "n" Werten einen Schätzwert für das Fraktile "k/n+1" des Kollektives dar (Tab. 17 und 18, Abb. 8 und 9).

Tab. 17: Herleitung der Verteilung des bereinigten Volumenmehrzuwachses bei Buche

Parzelle Nr.	9	4	7	3	6	1	10	5	8	11	2
Bereinigter Volumenmehrzuwachs (Efm oR/ha)	-6.07	-5.39	-3.48	-2.06	-1.02	-0.75	-0.62	0.32	2.78	4.04	8.50
Rangfolge der Beobachtung (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Geschätztes Fraktil $k/(n+1)$	0.08	0.17	0.25	0.33	0.42	0.50	0.58	0.67	0.75	0.83	0.92
Geschätztes Fraktil (%)	1.45	3.09	4.55	6.00	7.64	9.09	10.55	12.18	13.64	15.09	16.73
Geschätzte Fraktilsomme (%)	1.45	4.54	9.09	15.09	22.73	31.82	42.37	54.55	68.19	83.28	100

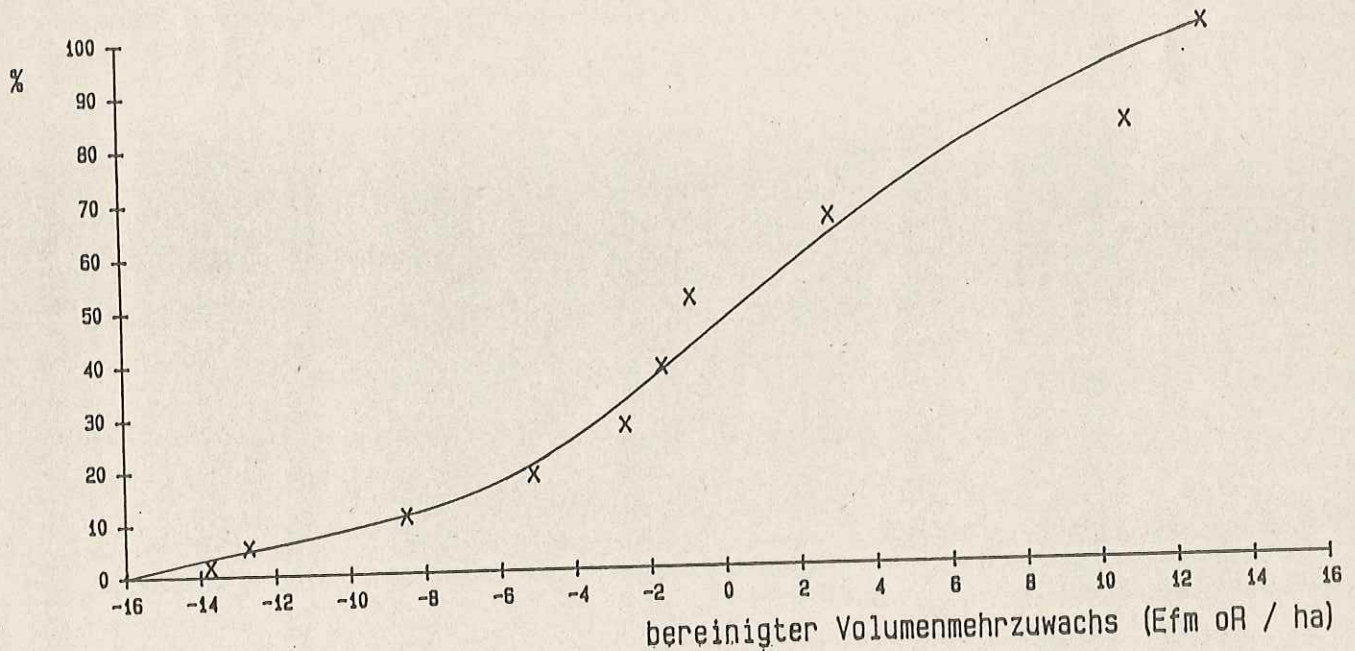
Abb. 8: Geschätzte Häufigkeit des Mehrzuwachses gedüngter Buchenflächen (ausgeglichene Summenkurve, nach ANDERSON et al., 1977)



Tab. 18: Herleitung der Verteilung des bereinigten Volumenmehrzuwachses bei Fichte

Parzelle Nr.	18	17	16	19	20	22	12	15	14	21
Bereinigter Volumenmehrzuwachs (Efm oR/ha)	-13.75	-12.72	- 8.51	- 5.11	- 2.64	- 1.64	- 0.85	2.88	10.84	12.93
Rangfolge der Beobachtung (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Geschätztes Fraktile $k/(n+1)$	0.091	0.180	0.273	0.364	0.455	0.545	0.636	0.730	0.818	0.910
Geschätztes Fraktile (%)	1.82	3.60	5.46	7.28	9.10	10.90	12.71	14.59	16.35	18.19
Geschätzte Fraktilesumme (%)	1.82	5.42	10.88	18.16	27.26	38.10	50.87	65.46	81.81	100.00

Abb. 9: Geschätzte Häufigkeit des Mehrzuwachses gedüngter Fichtenflächen (ausgeglichene Summenkurve, nach ANDERSON et al., 1977)



Die Abb. 8 und 9 zeigen in Form von ausgeglichenen Summenkurven die geschätzte Verteilung des Mehr- oder Minderzuwachses nach der Düngung für beide Baumarten. Gleichzeitig ergibt sich aus diesen Verteilungsfunktionen die geschätzte Wahrscheinlichkeit, mit der die untersuchte Düngungsvariante einen Mehrzuwachs innerhalb bestimmter Grenzen herbeiführt. So beträgt beispielsweise die Wahrscheinlichkeit, bei Buche und Fichte nach einer Düngung keinen Mehrzuwachs zu erzielen, fast 50 %.

Bedeutsam für die forstliche Praxis ist jedoch letztlich nicht eine statistisch nachgewiesene Zuwachssteigerung, sondern deren wirtschaftliche Effektivität. Ein formelles, wirtschaftlich definiertes Entscheidungsmodell in Form der BAYES'schen Entscheidungsanalyse kann zur Beurteilung hilfreich sein.

Unter der Berücksichtigung bekannter Reaktionsmechanismen nach der Düngung von Waldbeständen und den in diesem Versuch gewonnenen Erkenntnissen wird von einer standortkundlich nicht notwendigen und waldbaulich nicht vorbereiteten Düngung mit der Zielsetzung einer Ertragssteigerung abgeraten. Unter meliorativen Gesichtspunkten, z.B. zum Ausgleich von nachgewiesenen Nährelementmängeln, ist eine **gezielte** Düngung dagegen sinnvoll. Diese kann beim Zusammentreffen mit weiteren zuwachsfördernden Umständen, wie ausreichender Niederschlag und rechtzeitige kräftige Durchforstungen, dann auch zu einem Mehrzuwachs führen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Der 1969 auf repräsentativen Standorten des Hunsrückes in nicht eigens vorher durchforsteten, mittelalten Buchen- und Fichtenbeständen angelegte Stickstoff-, Phosphor- und Calciumdüngerversuch wurde auf der Grundlage einer intensiven Aufmessung einer Fichtenparzelle, sowie der nachfolgenden Klappung aller übrigen Bestände ertragskundlich ausgewertet. Neben Wasserdefiziten und hoher Bestockungsdichte war seinerzeit im Untersuchungsgebiet die Stickstoffversorgung zuwachsbeschränkend. Nur der letztgenannte Minimumfaktor wurde durch die Düngung behoben. Eine statistisch absicherbare Mehrleistung der gedüngten Bestände zeigt sich lediglich am steileren Verlauf der Zuwachsgeraden gedüngter Buchenflächen. Dies belegt eine Düngungswirkung hinsichtlich der Bestandesstruktur an Buchen. Stammform und Höhenzuwachs wurden in einem Fichtenflächenpaar untersucht; Unterschiede zwischen der gedüngten und ungedüngten Fläche sind jedoch nicht nachzuweisen.

Mehr- bzw. Minderzuwächse bei den Grundflächen der jeweiligen Parallellflächen können u.a. auf Unterschiede in der Ausgangsbestandesstruktur, welche mit den üblichen Signifikanzschwellen statistisch nicht nachweisbar sind, zurückgeführt werden. Diese Streuungsursachen wurden daher kalkulatorisch ausgeglichen, indem jeweils einer Parallellfläche die Struktur der anderen unterstellt, gleichzeitig jedoch mit der ursprünglichen Zuwachsregression weitergerechnet wurde. Dennoch kann eine eindeutige Mehrleistung nicht ermittelt werden.

Damit erscheint, von der mittlerweile durch Immissionen geänderten Stickstoffversorgung ganz abgesehen, in nicht eigens vorher durchforsteten vergleichbaren Fichten- und Buchenbeständen die untersuchte Düngung wirtschaftlich nicht lohnend.

## SUMMARY

Results of a fertilization experiment involving N, P and Ca, initiated in 1969 in dense stands of European beech (*Fagus silvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*) on extremely acid soils, were evaluated after seven growing periods.

No effects of fertilization on height growth and stem form were apparent. Fertilization did influence stand structure and -differentiation, as evident from increased slope coefficients of the regression line of initial diameter versus radial increment. This response was most evident and statistically significant in beech stands. It did not necessarily translate into increases of average diameter, basal area or volume increment, partly because of natural variations in initial basal area or stand structure. Apparent yield depressions were due to varying initial diameter distributions within paired plot installations.

Fertilizing succeeded in correcting nitrogen deficiency, significantly raised Ca levels, and reduced potassium contents. Overall volume response was limited by high stand density and water stress. Volume increase indicates no economic gain from large-scale, operational fertilization of similar stands in Germany's Hunsrück mountains.



## 7 LITERATURVERZEICHNIS

- ANDERSON, J.R., DILLON, J.H. und HARDAKER, J.B., 1977: Agricultural Decision Analysis. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA;  
nach SCHÖNE, D., 1983: Eine Alternative zur Vollklappung. AFZ, 32, 571-572
- BINKLEY, D., 1986: Forest Nutrition Management. Wiley, N.Y.
- GUSSONE, H.A., 1975: Durchforstung - Waldernährung - Düngung. FoHo, 30, 321-324
- HAUSSER, K., WITTICH, W., BILGER, W., HAUFF, R., KENNEL, R.,  
TRAITTEUR-RONDE, G., WERNER, H., 1969: Ergebnisse eines Düngungsversuches  
zu 66-jährigen Fichten auf einem typischen Standort des Oberen Buntsandsteins im Würt-  
tembergischen Schwarzwald. AFJZ, 140, 25-34, 49-62, 85-99
- KENNEL, R., 1967: Ertragskundliche Ergebnisse neuer Düngungsversuche in Kiefern-,  
Fichten- und Buchenbeständen Bayerns. Fowi Cbl., 86, 1-68
- KNABE, W., 1984: Merkblatt zur Entnahme von Blatt- und Nadelproben für chemische  
Analysen. AFZ, 39, 847-848
- NETER J. and WASSERMANN, W., 1974: Applied Linear Statistical Models. Irwin,  
Homewood, Illinois
- PETRI, H., 1960: Ein weiterer Beitrag zum Fichtenwachstum im nördlichen Rheinland-  
Pfalz. Fowi Cbl., 79, 237-253
- PRODAN, M., 1965: Holzmeßlehre. Sauerländer's Verlag Frankfurt
- SACHS, L., 1984: Angewandte Statistik, Planung und Auswertung, Methoden und Modelle.  
Springer Vlg Berlin, 6. Auflage
- SACHS, L., 1990: Statistische Methoden 2, Planung und Auswertung. Springer Vlg Berlin
- SCHÜLER, G., 1990: Der kombinierte Durchforstungs- und Düngungsversuch Kastellaun -  
angelegt 1959 - heute noch aktuell? Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt  
Rheinland-Pfalz, Nr. 13
- SPIECKER, H., 1987: Düngung, Niederschläge und der jährliche Volumenzuwachs einiger  
Fichtenbestände Südwestdeutschlands. AFJZ, 158, 70-76
- STRAND and DE BELL, 1979: Growth Response to Fertilization in Relation to Growing  
Stock Levels of Douglas-fir. In: Forest Fertilization Conference. University of Washing-  
ton. College of Forest Resources. S. 102-106

## 8 ANHANG 1: STATISTISCHE ANALYSE ZUR UNTERSCHIEDUNG DER DÜNGEWIRKUNG ÜBER DEN VERGLEICH DER REGRESSIONS- KOEFFIZIENTEN (nach SACHS, 1984)

Dieses Verfahren setzt bei den Steigungskoeffizienten einen Vergleich der jeweiligen Fehler-  
varianzen voraus. Bei nicht verschiedenen Fehlervarianzen, wie in den beiden dargestellten  
Varianten, lassen sich die Unterschiede der Steigungskoeffizienten  $b_1$  und  $b_2$  wie folgt über-  
prüfen:

$$\hat{t} = \frac{|b_1 - b_2|}{\sqrt{\frac{s_{y1x1}^2 (n_1 - 2) + s_{y2x2}^2 \cdot (n_2 - 2)}{n_1 + n_2 - 4} \cdot \left( \frac{1}{Q_{x1}} + \frac{1}{Q_{x2}} \right)}} \quad (5)$$

$$FG = n_1 + n_2 - 4$$

Hierfür ergibt sich bei den Buchenflächen:

$b$	=	0,1223 (Steigungsschätzung für die Nullflächen)
$b^1$	=	0,1348 (Steigungsschätzung für die Düngungsflächen)
$s^2$	=	0,4783 (Varianz der Schätzung für die Nullflächen)
$s^{y1x1}$	=	0,4903 (Varianz der Schätzung für die Düngungsflächen)
$u^{y2x2}$	=	703 (Stichprobenumfang der Nullflächen)
$u^1$	=	648 (Stichprobenumfang der Düngungsflächen)
$Q^2$	=	31 857,063 (Fehlerquadratsumme der 0-Flächen)
$Q_{x1}^2$	=	26 427,465 (Fehlerquadratsumme der Düngungsflächen)

Es ergibt sich somit

$$\hat{t} = \frac{0,0125}{\sqrt{\frac{0,4783 \cdot 701 + 0,4903 \cdot 646}{1347} \cdot \left( \frac{1}{31\,857,063} + \frac{1}{26\,427,465} \right)}} \quad (6)$$

$$\hat{t} = 2,16$$

$$t_{1347, 0,05} = 1,96$$

Daraus folgt

$$\hat{t} > t_{1347, 0,05}$$

Die Hypothese  $b_1 = b_2$  wird verworfen.

Die Steigungen der Zuwachsgeraden von Null- und Düngungsflächen bei Buche unterscheiden  
sich somit signifikant auf dem 5%-Niveau. (Abb. 3).

Bei den Fichtenflächen ergibt sich:

$b$	$= 0,1228$	(Steigungsschätzung für die Nullflächen)
$b^1$	$= 0,1217$	(Steigungsschätzung für die Düngungsflächen)
$s^2$	$= 0,5330$	(Varianz der Schätzung für die Nullflächen)
$s^{y^1 \times x^1}$	$= 0,5729$	(Varianz der Schätzung für die Düngungsflächen)
$n^{y^2 \times x^2}$	$= 950$	(Stichprobenumfang der Nullflächen)
$n^1$	$= 921$	(Stichprobenumfang der Düngungsflächen)
$Q^2$	$= 24\ 565,538$	(Fehlerquadratsumme der Nullflächen)
$Q^{x^1}_{x^2}$	$= 28\ 189,401$	(Fehlerquadratsumme der Düngungsflächen)

Hieraus errechnet sich

$$\hat{t} = \frac{0,0011}{\sqrt{\frac{0,5330 \cdot 948 + 0,5729 \cdot 919}{1867} \cdot \left( \frac{1}{24\ 565,538} + \frac{1}{28\ 189,401} \right)}} \quad (7)$$

$$\hat{t} = 0,17$$

$$t_{1867; 0,05} = 1,96$$

Da  $\hat{t} < t_{1867; 0,05}$  gibt es keinen Grund die Hypothese  $b_1 = b_2$  abzulehnen.

Die Steigungen der Zuwachsgeraden der Null- und Düngungsflächen verlaufen somit offensichtlich parallel (Abb. 4).

Bei den Achsenabschnitten dürfen sich die Intervalle in einem bestimmten Vertrauensbereich nicht überschneiden, um statistische Signifikanz zu erreichen. Hierbei gilt

$$a_{y^1 \times x^1} \pm t \cdot s_{ay^1 \times x^1} = a_{y^2 \times x^2} \pm t \cdot s_{ay^2 \times x^2} \quad (8)$$

Bei den Buchenflächen ergibt sich (vgl. Übersicht 3):

$a_1$	$= -1,0081$	(Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden der Nullflächen)
$s_1$	$= 0,0865$	(Varianz der Achsenabschnitte der Nullflächen)
$a_2^1$	$= -1,2347$	(Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden der Düngungsflächen)
$s_2$	$= 0,0991$	(Varianz der Achsenabschnitte der Nullflächen)

Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ( $t = 1,965$ ) ergaben sich folgende Vertrauensintervalle:

$$a_1 \in [-1,1811 ; -0,8351]$$

$$a_2 \in [-1,4329 ; -1,1356]$$

Diese Intervalle überschneiden sich.

Bei den Fichtenflächen ergibt die gleiche Überprüfung:

$$\begin{aligned} a_1 &= -1,2399 \text{ (Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden der Null-} \\ &\quad \text{flächen)} \\ s_1 &= 0,1077 \text{ (Varianz der Achsenabschnitte der Nullflächen)} \\ a_2 &= -1,1631 \text{ (Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden der} \\ &\quad \text{Düngungsflächen)} \\ s_2 &= 0,1066 \text{ (Varianz der Achsenabschnitte der Nullflächen)} \end{aligned}$$

Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ergeben sich folgende Vertrauensbereiche:

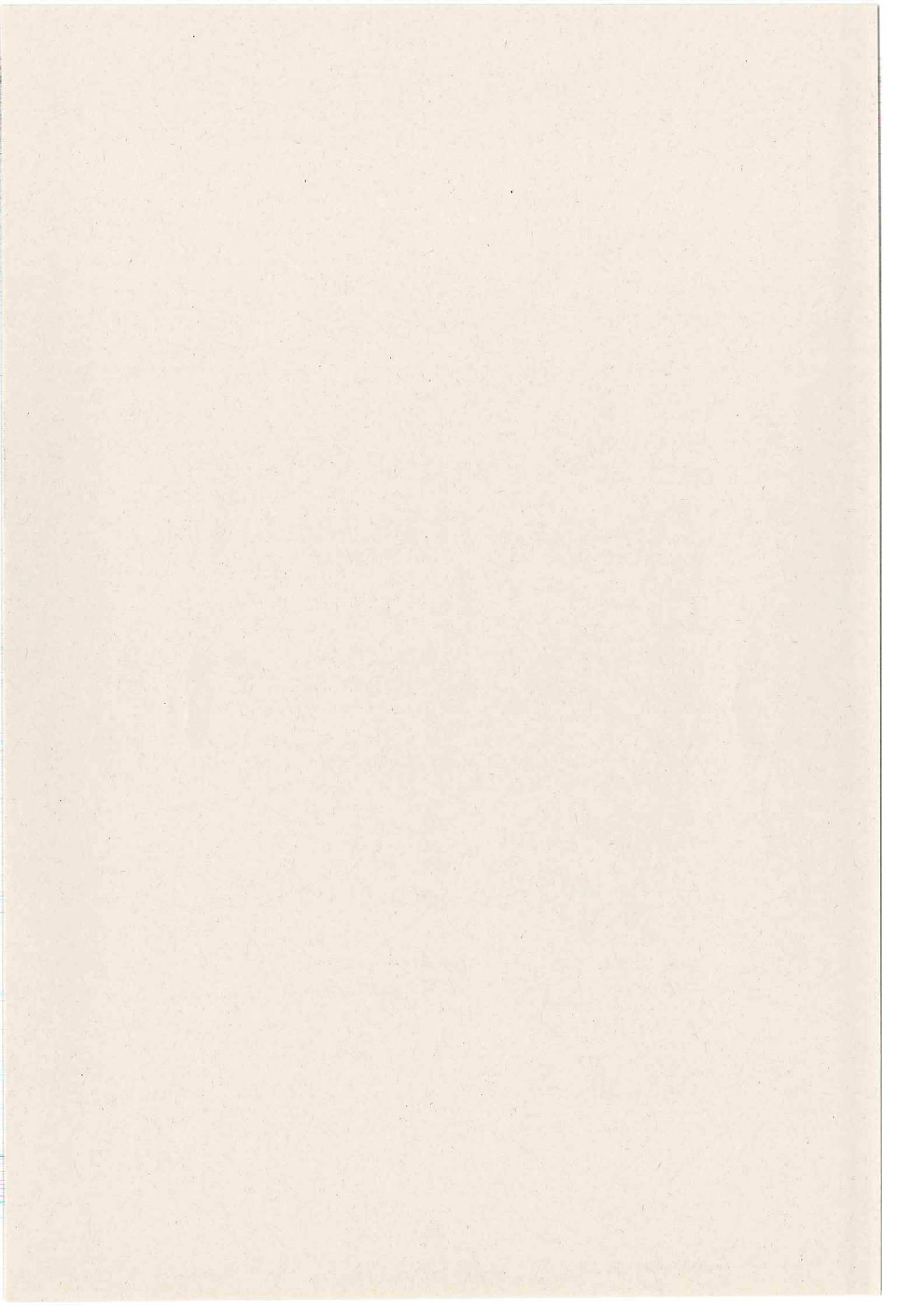
$$\begin{aligned} a_1 &\in [ -1,4553 ; -1,0245 ] \\ a_2 &\in [ -1,3763 ; -0,9499 ] \end{aligned}$$

Auch bei der Fichte überschneiden sich die Intervalle.

Die Hypothese, daß sich die Achsenabschnitte unterscheiden, kann daher weder bei der Fichte noch bei Buche gestützt werden.

In den Buchenflächen kann damit zwar eine statistisch signifikant positive Wirkung der Düngung auf die Bestandesstruktur aufgezeigt werden. Das Ausmaß der Düngewirkung ist jedoch nur gering. Eine statistische Absicherung der kleinen Unterschiede gelang nur aufgrund der hohen Stichprobenzahl. Die Unterschiede der Steigungskoeffizienten bedeuten, daß Bäume mit stärkerem Durchmesser, also herrschende Bäume, gegenüber schwächeren Bäumen im Durchmesserzuwachs gefördert wurden. Eine Bestandesdifferenzierung kann sich somit beschleunigen.

Bei der Fichte ergibt sich dagegen nur eine weniger deutliche, nach den üblichen Signifikanzschwellen statistisch nicht absicherbare Entwicklung.



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

- |         |  |         |
|---------|--|---------|
| 1/1987  | Jahresbericht 1984 - 1986<br>ISSN 0931 - 9662  |         |
| 2/1987  | BLOCK, STELZER:<br>Radioökologische Untersuchungen in Waldbeständen<br>ISSN 0931 - 9662  | DM 12.- |
| 3/1987  | BLOCK, FRAUDE, HEIDINGSFELD:<br>Sondermeßprogramm Wald (SMW)<br>ISSN 0931 - 9662   | DM 12.- |
| 4/1987  | BEUTEL, BLOCK:<br>Terrestrische Feldgehölzschadenserhebung (TFGE 1986)<br>ISSN 0931 - 9662   | DM 12.- |
| 5/1988  | Die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz im Dienste von<br>Wald und Forstwirtschaft - Reden anlässlich der Übergabe des<br>Schlosses Trippstadt als Dienstsitz am 10.04.1987<br>ISSN 0931 - 9662 | DM 12.- |
| 6/1988  | Jahresbericht 1987<br>ISSN 0931 - 9662   |         |
| 7/1988  | BEUTEL, BLOCK:<br>Terrestrische Parkgehölzschadenserhebung (TPGE 1987)<br>ISSN 0931 - 9662   | DM 12.- |
| 8/1988  | GERECKE:<br>Zum Wachstumsgang von Buchen in der Nordpfalz<br>ISSN 0931 - 9662  | DM 30.- |
| 9/1989  | Jahresbericht 1988<br>ISSN 0936 - 6067   |         |
| 10/1989 | HEIDINGSFELD:<br>Verfahren zur luftbildgestützten Intensiv-Waldschadenserhebung<br>in Rheinland-Pfalz<br>ISSN 0931 - 9662  | DM 25.- |
| 11/1989 | BLOCK, DEINET, HEUPEL, ROEDER, WUNN:<br>Empirische, betriebswirtschaftliche und mathematische<br>Untersuchungen zur Wipfelköpfung der Fichte<br>ISSN 0931 - 9662                                       | DM 12.- |
| 12/1990 | Jahresbericht 1989<br>ISSN 0931 - 9662<br>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  
 ISSN 0931 - 9662
- 15/1991 Jahresbericht 1990  
 ISSN 0931 - 9662  
 ISSN 0936 - 6067
- 16/1991 BLOCK, HEIDINGSFELD, SCHRÖCK, BOCKHOLT, BORCHERT, DM 12.-  
 FINGERHUT:  
 Immissions-, Wirkungs- und Zustandsuntersuchungen 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

