

GÖTTINGER  
BODENKUNDLICHE  
BERICHTE

15

1970

Im Selbstverlag der Anstalten für  
Bodenkunde der Universität Göttingen

Herausgeber: B. Meyer und B. Ulrich

Schriftleitung: P. Hugenroth

Bestellungen über:

Institut für Bodenkunde, Göttingen, von Siebold-Str. 4

Institut für Bodenkunde und Waldernährung,  
Hann. Münden, Mitscherlichstr. 3

oder den Buchhandel (Gewährung von Wiederverkäufer-Rabatt)

Selbstkostenpreis            DM

GÖTTINGER  
BODENKUNDLICHE  
BERICHTE

15

1970

Vukorep, Ivan:

**Beziehungen zwischen chemischen Bodeneigenschaften und dem Zuwachs von Schwarzpappeln.**

Ein Beitrag zur ökologischen Bewertung von Bodenuntersuchungsmethoden.

**Göttinger Bodenkundliche Berichte 15, 1-108  
(1970)**

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
0. Vorwort	1
1.0 Einführung	3
1.1 Charakterisierung des Untersuchungsobjektes in der Forstwissenschaft	4
1.2 Untersuchungsweise in der Forstwissenschaft	9
1.2.1 Klassisches Experiment	10
1.2.11 Experimente im Labor	11
1.2.12 Feldversuche	11
1.2.13 Gefäßversuche	11
1.3 Prüfung ohne Eingriff als eine Alternative für die Forschung in der Forstwissenschaft	13
1.4 Statistische Methode in der Forstwissenschaft	18
1.4.1 Die Varianzanalyse	18
1.4.2 Die Regressionsanalyse	20
1.4.3 Die Kovarianzanalyse	21
1.4.4 Klassische statistische Verfahren bei der "Prüfung ohne Eingriff"	21
1.4.5 Die Pfadanalyse	22
1.4.6 Die Faktorenanalyse	24
1.4.7 Abgrenzung der Faktorenanalyse gegenüber anderen multiplen statistischen Verfahren (nach UBERLA, 1968)	25
1.4.71 Die multiple Regressionsanalyse	26
1.4.72 Varianzanalyse	26
1.4.73 Die Diskriminanzanalyse	27
1.4.74 Die Hauptkomponentenanalyse	27
1.4.8 Kurze Einführung in die mathematischen Grundlagen der Faktorenanalyse	28
1.5 Fragestellung und Abgrenzung des Problems	32
1.5.1 Grundsätzliche Untersuchungsvorstellungen	32
1.5.2 Boden als Teil des Standorts	33
1.5.3 Herkömmliche Methoden für die Beurteilung des Nährstoffhaushaltes	35
1.5.4 Fragestellungen	37

	Seite	
1.5.41	Die theoretische Grundlage der Untersuchung des Bodens	37
1.6	Untersuchungsmaterial und Untersuchungsmethoden	41
1.6.1	Auswahl der untersuchten Flächen und ihre Beschreibung	42
1.6.11	Bodenkundliche Untersuchungen im Gelände und allgemeine Charakterisierung der Versuchsflächen	44
1.6.12	Chemische Untersuchungsmethoden	48
1.6.121	Gewinnung der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) nach ULRICH	48
1.6.122	Untersuchung des Austauschkomplexes	49
1.6.123	Phosphatfraktionierung	49
1.6.124	Kohlenstoff- und Stickstoffbestimmungen	49
1.6.125	Bodenphysikalische Untersuchungen	50
1.7	Aufstellung von Modellen	51
1.7.1	Gliederung des Bodenprofils	51
1.7.2	Austauschkomplex	52
1.7.211	Gehalte pro Bodenzone	52
1.7.212	Gehalte pro Gesamtprofil	53
1.7.221	Vorräte pro Bodenzone	54
1.7.222	Vorräte pro Gesamtprofil	54
1.7.231	Äquivalentprozent innerhalb der Bodenzone	54
1.7.232	Äquivalentprozent innerhalb des Gesamtprofils	54
1.7.3	Gleichgewichtsbodenlösung	54
1.7.311	Konzentration in der Bodenlösung jeder Bodenzone	55
1.7.312	Konzentration in der Bodenlösung im gesamten Bodenprofil	55
1.7.321	Äquivalentprozent in der Bodenlösung jeder Bodenzone	56
1.7.322	Äquivalentprozent im Gesamtprofil	56
1.7.331	Potentiale jeder Bodenzone	56
1.7.332	Potentiale des gesamten Profils	56
1.7.341	Schofield'sche Potentiale pH-1/zpM jeder Bodenzone	56
1.7.342	Schofield'sche Potentiale pH-1/zpM des Gesamtprofils	56

	Seite	
2.0	Darstellung und Auswertung der Ergebnisse	57
2.1	Einfache Korrelationskoeffizienten	57
2.1.1	Klimadaten	57
2.1.2	Die Korrelationsmatrizen verschiedener Datenkombinationen	58
2.1.3	Der Zusammenhang zwischen Zuwachs und verschiedenen Standortmerkmalen	66
2.2	Ergebnisse der Faktorenanalyse	68
2.2.1	Faktorenanalyse für die Datenkombination "Gehalte pro Bodenzone"	69
2.2.2	Faktorenanalyse für die Datenkombination "Gehalte des gesamten Bodenprofils"	72
2.3.1	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Vorräte pro Bodenzone"	74
2.3.2	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Vorräte im gesamten Bodenprofil"	76
2.4.1	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozentage pro Bodenzone"	77
2.4.2	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozentage für das Gesamtprofil"	79
2.5.1	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Konzentration pro Bodenzone"	81
2.5.2	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Konzentration im Gesamtprofil"	83
2.6.1	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozentage in der GBL pro Bodenzone"	84
2.6.2	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozentage in der GBL für das gesamte Bodenprofil"	86
2.7.1	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Potentiale pro Bodenzone"	88
2.7.2	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Potentiale im Gesamtprofil"	90
2.8.1	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Schofield'sche Potentiale pH-1/zpM pro Bodenzone"	92
2.8.2	Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Schofield'sche Potentiale für das Gesamtprofil"	95
3.0	Diskussion	97
4.0	Zusammenfassung	104
	Literaturverzeichnis	
	Anhang: Tabelle 4 bis 10	



## 0. Vorwort

Im Rahmen der gesamten Forstwissenschaft hat die forstliche Bodenkunde als Hilfswissenschaft die Aufgabe, den Boden als Teil des Standorts im Zusammenhang mit anderen standörtlichen Faktoren ökologisch zu charakterisieren und Entscheidungshilfen für eine optimale Bodennutzung und -bewirtschaftung zur Verfügung zu stellen.

Deshalb steht die forstliche bodenkundliche Forschung in sehr engem Kontakt zur Entwicklung der Forschung in anderen forstlichen Fächern wie auch auf anderen naturwissenschaftlichen Gebieten.

In den letzten zwei Jahrzehnten sind bei der Betrachtung unserer Untersuchungsobjekte sehr viele neue Elemente aufgetaucht. Das ist in der Forstwissenschaft wie in der Bodenkunde der Fall. Von besonderer Bedeutung ist die rasche Entwicklung der Kybernetik als einer neuen Wissenschaft "von Kommunikation und Regelung" (S. BEVER nach H.J. FLECHTNER, 1967), die fast alle Disziplinen mehr oder weniger berührt. Im Zusammenhang damit steht die Entwicklung der Rechentechnik und der Rechenautomaten, die neue Forschungsmöglichkeiten eröffnet hat.

In dieser Arbeit wird versucht, die ökologische Bodencharakterisierung im Lichte dieser neuen Arbeitsgebiete zu betrachten. Viele der hierbei erarbeiteten Tatsachen sind schon bekannt, aber sie bekommen ein anderes Gewicht bei anderer Betrachtungsweise.

Die aufgegriffenen Fragen können in dieser Arbeit nicht endgültig gelöst werden. Es soll nur ein Versuch unternommen werden, neue Wege zu gehen und damit einen Beitrag zur Methodenentwicklung in der Forstwissenschaft und in der forstlichen Bodenkunde zu leisten.

## 1.0 Einführung

Die Fragen, die heutzutage an die forstliche Bodenkunde gestellt werden, sind sehr vielseitig. Diese Vielseitigkeit entspringt der Natur der Probleme, mit denen sich die forstliche Bodenkunde als einer Hilfsdisziplin im Rahmen der gesamten Forstwissenschaft beschäftigt.

Wenn versucht wird, diese Probleme einzuordnen, lassen sich zwei Gruppen unterscheiden:

- Die erste Gruppe betrachtet die forstlich genutzten Böden als selbständige Naturobjekte. Die Problematik liegt in der Erfassung aller Vorgänge und Erscheinungsformen.
- Der zweite Problemkreis der forstlichen Bodenkunde beschäftigt sich mit der Beeinflussung der forstlich genutzten Böden durch andere Standortfaktoren, sowie mit dem Einfluß, den Böden auf andere ökologische Objekte und Prozesse haben. Diese Wechselwirkungen zwischen dem Boden und seiner Umwelt sind sehr schwer zu erfassen.

So schwierig es auch ist, diese beiden Problemkreise überhaupt zu trennen, es geht doch daraus hervor, daß bei vielen Fragen, die sich der forstlichen Bodenkunde stellen, andere Fachgebiete unbedingt berücksichtigt werden müssen. Andererseits sind alle naturwissenschaftlichen Fächer durch weitgehende Spezialisierung gekennzeichnet. Das kann als normal betrachtet werden, weil die zunehmenden Kenntnisse in einem größeren Fachgebiet von einem einzelnen Forscher nicht mehr überschaut werden können. "Diese Entwicklung, die seit etwa 1 1/2 Jahrhunderten mit zunehmender Geschwindigkeit fortschreitet, hat in unseren Tagen anscheinend einen gewissen Höhepunkt erreicht." (FLECHTNER, 1967). Derartige Verhältnisse können in eine Sackgasse führen, wenn nicht die

Vertiefung der Kenntnisse innerhalb eines Fachgebietes in engem Kontakt mit angrenzenden Fachgebieten vorstatten geht (SUKATSCHEV, 1967). Solche Tendenzen sind heute auch in der Forstwissenschaft zu erkennen. Aus diesem Grund soll zunächst ein kurzer Blick auf die in der Forstwissenschaft übliche Arbeits- und Denkweise geworfen werden, um dann schließlich in Zusammenhang mit solchen Problemen auf die eigentliche Fragestellung zu kommen.

Zunächst soll auf einige methodische Fragen in der Forstwissenschaft und besonders in der Bodenkunde eingegangen werden. Dies ist notwendig, weil die Untersuchungsmethodik auf vielen Gebieten der Forstwissenschaft einige Besonderheiten aufweist, die berücksichtigt werden müssen. Diese Besonderheiten haben ihre Ursache in dem Charakter der untersuchten Objekte und Erscheinungen.

Das Untersuchungsobjekt ist der Standort mit seinen verschiedenen Erscheinungen. Der Standort ist natürliches Objekt r ä u m - l i c h und z e i t l i c h nicht scharf abzugrenzen und verlangt für seine Bearbeitung eine gut angepasste Untersuchungsmethodik.

### 1.1 Charakterisierung des Untersuchungsobjektes in der Forstwissenschaft

Das Untersuchungsobjekt ist der Wald, der auf einem bestimmten Standort und in einem bestimmten Zeitraum wächst. Die vollständige Erfassung dieses Untersuchungsobjektes ist deshalb so schwierig, weil alle Faktoren in unterschiedlichem Ausmaß in gegenseitiger Wechselwirkung stehen. Da die Wechselwirkungen der Faktoren untereinander, ihre verschiedenen Variationen und Kombinationen die Entwicklung des Bestandes entscheidend beeinflussen, müssen wir als Forstleute diese in ihrer Gesamtheit zu erfassen suchen.

Der Boden als ein sehr wichtiger Teil des Standorts spielt eine wesentliche Rolle, wobei immer beachtet werden muß, daß der Bestand auch den Boden ständig beeinflußt, und daß dieser so veränderte Boden wiederum Rückwirkungen auf die Bestandesentwicklung hat. Diese ständige Wechselwirkung ist eine **G e s e t z - m ä ß i g k e i t** unseres Untersuchungsobjektes. Aus dieser **Gesetzmäßigkeit** leitet sich eine Kette von Fragen ab, die in der Forstwissenschaft gestellt werden: Wie hat sich ein Bestand bis zu einem bestimmten Zeitpunkt entwickelt, wie wird er sich weiter entwickeln, was haben wir demnach von ihm zu erwarten, und schließlich: welche Maßnahmen müssen wir treffen, um eine gegebene Aufgabe zu erfüllen.

Nach dem oben Gesagten ist es nicht möglich, daß die Forschung eines einzelnen forstlichen Fachgebietes für sich alleine auf diese Kette von Fragen eine gültige Antwort geben kann.

Wenn man den Boden als untrennbaren Teil des Standortes ansieht, dann muß man ihn, seine Merkmale und das Geschehen in ihm nur in diesem Zusammenhang betrachten. Deshalb ist die erste und wichtigste Charakteristik unseres Untersuchungsobjektes, daß es, in der Ausdrucksweise der Kybernetik, Systemcharakter hat.

Unter einem System ist zu verstehen (FLECHTNER, 1967):

"Eine irgendwie geordnete Zusammenstellung, Vereinigung oder Gesamtheit von "Gegenständen", ("Gegenstand" ist jedes Ding, jedes Lebewesen, aber auch jeder Begriff, jeder Lehrransatz einer Wissenschaft. Ebenso sind auch Kollektiva, Ganze und "Systeme" selbst "Gegenstände") deren Bestandteile, im Unterschied etwa zur Menge, nicht ein bloßes Beieinander bilden, sondern untereinander und zum Ganzen in bestimmten Beziehungen stehen.

Systeme sind ganze, organisierte Gesamtheiten, deren Bestandteile je nach der Art der Organisation des Ganzen sowie der Art der Beziehungen der Bestandteile untereinander und zum Ganzen als "Elemente", "Teile", "Glieder" usw. bezeichnet werden."

Wie diese "Gegenstände" zusammengestellt sind, was wir hier unter "Ordnung" zu verstehen haben, ist für Systeme wesensbestimmend und artbildend (FLECHTNER, 1967).

Anschließend an diese kybernetische Definition wollen wir versuchen, unser Untersuchungsobjekt als System zu definieren.

Es gibt eine ganze Reihe verschiedener Begriffe und Definitionen, die den Standort (Untersuchungsobjekt) mit allen seinen Faktoren zu umfassen versuchen. Wir halten die Definition von SUKATSCHEV (1964) für die anschaulichste und die umfassendste. Nach SUKATSCHEV ist unser Untersuchungsobjekt eine Biogeozönose (Abb. 1).

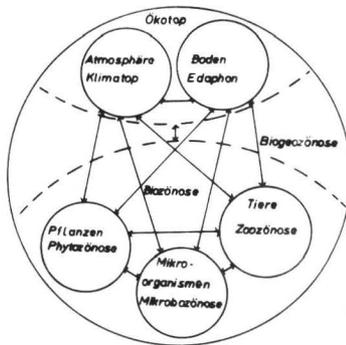


Abb. 1 Schema Wechselwirkungen verschiedener Komponenten in der Biogeozönose (Sukatschew 1966)

Diese ist eine Ganzheit, ausgedehnt auf eine bestimmte Fläche der Erde, mit ausgeprägten natürlichen Erscheinungen (wie Atmosphäre, geologischer Untergrund, Vegetation, Welt der Mikroorganismen und Tiere, Boden- und hydrologische Verhältnisse), die eine eigene Spezifität von Zusammenwirkung dieser Komponenten haben. Es besteht ein ganz bestimmter Typ des Umtausches der Materie und Energie zwischen den Komponenten und anderen natürlichen Erscheinungen, die in sich einen ausdifferenzierten inneren Widerspruch der dialektischen Einheit haben, der sich in einer ständigen Bewegung und Entwicklung befindet.

Diese Definition der Biogeozönose ist vielen Definitionen des in der westlichen Literatur verbreiteten Begriffs "Ökosystem" sehr ähnlich.

Aus der allgemeinen Definition der Biogeozönose leitet sich die Definition der Wald-Biogeozönose ab.

Die Wald-Biogeozönose (nach SUKATSCHEV, 1964) ist jener Teil des Waldes, der auf einer bestimmten Fläche einheitlich ist in Zusammensetzung, Gefüge und Eigenschaften seiner Komponenten sowie auch in der Zusammenwirkung der Komponenten untereinander, d.h. eine Fläche, die einheitlich in der Vegetationsdecke, in der tierischen und mikrobiologischen Welt, im geologischen Substrat, den hydrologischen, mikroklimatischen (atmosphärischen), bodenkundlichen Verhältnissen ist sowie im Zusammenwirken dieser Komponenten untereinander und in der Art, wie der Umtausch der Materie und Energie zwischen ihren Komponenten und anderen natürlichen Erscheinungen erfolgt.

Wenn wir von der Definition des Begriffs Wald-Biogeozönose ausgehen, stellen wir fest, daß bisher viele Merkmale und Wechselwirkungen nur qualitativ beschrieben worden sind. Die Tatsache, daß viele dieser Erscheinungen nur mit Worten definiert werden können, hat zu vielen Mißverständnissen geführt. Deshalb sind schon einige

Versuche unternommen worden, solche Erscheinungen mathematisch auszudrücken. Damit können Verständigungsschwierigkeiten abgebaut werden, eine bessere Erfassung des Objekts ist aber nicht ohne weiteres gewährleistet. In diese Richtung gehen Arbeiten von POLETAEV (1966), der versucht hat, einige mathematische Modelle für die elementaren Prozesse in der Biogeozönose aufzustellen; EMAN (1966), der ebenfalls mathematische Modelle der Biogeozönose aufzustellen versuchte; GORSYKO (1966) versucht, einige mathematische Modelle für die Regelung der Biogeozönose zu entwerfen, wobei er betont, daß die rationelle Verwaltung des natürlichen Reichtums eine der wichtigsten Anwendungen der angewandten Ökologie ist.

Wie sich diese Modelle weiter entwickeln lassen, hängt davon ab, in welchem Ausmaß die speziellen Probleme der einzelnen Fachgebiete geklärt werden können.

Mit den Untersuchungen an unserem Forschungsobjekt, das oben als Wald-Biogeozönose definiert wurde, begeben wir uns in ein außerordentlich kompliziertes System. Dieses System ist uns nur sehr wenig bekannt und sehr grob definiert. Ein System ist aber durch seine Eigenschaften definiert, d.h. es kann in dem Maße exakt beschrieben werden, in dem seine Eigenschaften exakt erfaßt werden können. Mit anderen Worten: Die Systeme sind soweit geklärt, wie die Teile oder Eigenschaften in ihrem Zusammenhang beschrieben und geklärt sind.

## 1.2 Untersuchungsweise in der Forstwissenschaft

Es ist nicht einfach und nicht die Absicht dieser Arbeit, einen historischen Überblick über die Entwicklung der Untersuchungsweise der gesamten Forstwissenschaft zu geben. Inwieweit sich Fragestellungen in der forstlichen Bodenkunde bearbeiten lassen, hängt weitgehend von dem Stand der Entwicklung in den übrigen Fachgebieten der Forstwissenschaft ab. Tatsächlich ist aber die Entwicklung in den einzelnen Gebieten unterschiedlich weit fortgeschritten. Bei kritischer Betrachtung müssen wir feststellen, daß wir aus diesem Grund mit bestimmten Fragestellungen in der forstlichen Bodenkunde nicht weiterkommen.

Viele unserer Untersuchungsmethoden sind von dem nicht zur Forstwissenschaft gehörenden Fachgebiet geprägt, in welchem sie entwickelt worden sind. Dies gilt besonders für die forstliche Bodenkunde. Die ersten bodenkundlichen Untersuchungsmethoden wurden in der Landwirtschaft entwickelt. Daher bestehen Tendenzen, die verschiedenen Untersuchungsverfahren speziell für die forstliche Bodenkunde weiterzuentwickeln.

Nicht nur die Untersuchungstechnik, sondern die ganzen Grundlagen des Experiments, als eines sehr wichtigen Schrittes zur Prüfung der Hypothesen, sind oft aus anderen naturwissenschaftlichen Fächern übernommen worden.

### 1.2.1 Klassisches Experiment

Die Methodenentwicklung für fast alle Forschungsgebiete gingen lange Zeit von der Grundlage des klassischen Experimentes aus, das seinen Ursprung in anderen Naturwissenschaften hatte. Hier hatte man früh erkannt, daß die Betrachtung nur eines Geschehens oder Merkmals von anderen Geschehen oder Merkmalen beeinträchtigt wird, weil eine Erscheinung von mehreren Faktoren abhängig sein kann. Man hat daher versucht, die Faktoren zu isolieren und zu definieren. Das klassische Experiment versucht, alle Faktoren bis auf einen einzigen konstant zu halten. Dann wird beobachtet, wie sich die Erscheinung mit der Variation des einen Faktors ändert. Auf dieselbe Art und Weise wird auch mit den übrigen Faktoren verfahren.

Mit solchen Experimenten konnte eine Vielzahl von Erscheinungen geklärt werden. Es muß aber ausdrücklich betont werden, daß nur ganz bestimmte Erscheinungen in geschlossenen Systemen auf diese Weise faßbar sind.

Die Grundlage des klassischen Experiments wird auch in der Landwirtschaft benutzt, besonders in der landwirtschaftlichen Bodenkunde. Zwar sind die so erarbeiteten Erkenntnisse für die forstliche Bodenkunde von größtem Interesse. Die Fragestellungen und Untersuchungen jedoch sollten sich grundsätzlich von denen in der landwirtschaftlichen Bodenkunde unterscheiden, weil die Untersuchungsobjekte grundsätzlich voneinander verschieden sind. Der forstliche Boden ist nämlich nicht nur für einige Jahre, sondern für Jahrzehnte und länger untrennbar mit dem Geschehen im Bestand verbunden. Diese Untrennbarkeit gibt ihm neue Qualitäten, die berücksichtigt werden müssen.

Zur Prüfung von Hypothesen sind in der forstlichen Bodenkunde heute drei Arten von Experimenten in Anwendung: Das Experiment im Labor, der Feldversuch und, zwischen diesem stehend, der Gefäßversuch (SCHLICHTING und BLUME, 1966, WITTICH, 1964).

#### 1.2.11 Experimente im Labor

Die Verfahren, die hier angewendet werden, stützen sich meist auf verschiedene physikalische und chemische Grundlagen. Die Fragestellungen sind oft sehr spezifisch, der Gültigkeitsbereich überschreitet nicht die im Versuch vorgegebenen Verhältnisse (z.B. Stickstoffmineralisierung, Durchlässigkeitsversuche an Bodenproben).

Diese Untersuchungsweise ist heute wie in der Zukunft ein sehr wichtiges Hilfsmittel bei der Sammlung von Informationen und Erkenntnissen.

#### 1.2.12 Feldversuche

Für die Prüfung aller Untersuchungen im Labor sind die Feldversuche eine sehr wichtige Stufe bei der endgültigen Verifikation der Hypothesen. Das gilt besonders in der Forstwissenschaft, die angewandten Charakter hat. Keine Hypothese kann angenommen werden, ohne daß sie unter natürlichen Bedingungen in Feldversuchen bestätigt worden ist.

#### 1.2.13 Gefäßversuche

Der Gefäßversuch nimmt eine Mittelstellung zwischen dem Versuch im Labor und dem Feldversuch ein.

Diese drei Gruppen von Experimenten sind auf der Grundlage des klassischen Experimentes entwickelt worden. Das oben Gesagte läßt bereits die Schwächen erkennen, die das klassische Experiment bei der Behandlung von Fragen in der Forstwissenschaft und besonders in der forstlichen Bodenkunde aufweist:

Alle Untersuchungen haben eine Fragestellung, die sich sehr eng an ein bestimmtes Ziel hält. Dabei handelt es sich immer um Fragestellungen, die sich nach der "Zielgröße" ausrichten. Sicherlich ist jede Forschung gezielt, aber hier ist das Ziel oft zu eng gefaßt. Vielmehr sollte bei der Erarbeitung der Erkenntnisse und Informationen die Vielseitigkeit des Problems beachtet werden. Es besteht sonst die Gefahr, daß ich mir ein Ziel setze, welches für andere oder zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr als Ziel gelten kann.

Das klassische Experiment ist anwendbar auf ein geschlossenes System, dessen Erscheinungen durch unabhängige Faktoren bestimmt sind. Dagegen ist unser Untersuchungsobjekt ein offenes System mit außerordentlich großen Wechselwirkungen. Diese Wechselwirkungen können auch durch einen Feldversuch nicht ausgeschaltet werden. Die Ergebnisse eines Feldversuches gelten nur für diesen speziellen Fall mit seinen speziellen Verhältnissen (Boden, Klima usw.). Die Erfahrungen zeigen, daß die Schwierigkeiten bei der Übertragbarkeit von Ergebnissen nicht durch eine bestimmte Anlage der Versuche beseitigt werden können (FERRARI, 1965).

Eine weitere Schwierigkeit bei der Anwendung des klassischen Experiments in der Forstwissenschaft ist die Unmöglichkeit, einige Faktoren überhaupt zu variieren. Wir können beispielsweise nicht die Korngrößenverteilung eines Bodens verändern und dabei alle anderen Faktoren konstant halten.

Weiter kommt hinzu, daß durch die Konstanthaltung der nicht zu untersuchenden Faktoren, sofern dies überhaupt möglich ist, das System unter Verhältnisse gelangt, die in der Natur gar nicht vorkommen (FERRARI, 1965, SCHLICHTING und BLUME, 1966).

Schließlich wird die ceteris-paribus-Annahme oft gerade durch die Änderung eines Faktors aufgehoben, z.B. (nach FERRARI, 1965) steigert die Kalkdüngung den Ertrag, woraus nicht geschlossen werden darf, daß die Pflanzen in der Tat Kalk benötigen. Es ist nämlich möglich, daß eine durch die Kalkung bewirkte bessere Luft- und Wasserversorgung die Ursache der Ertragssteigerung gewesen ist.

Dieses Beispiel zeigt, daß ohne eine weitere Analyse der Faktoren, die die Erscheinung verursachen, eine Interpretation von Ergebnissen gefährlich ist.

### 1.3 Prüfung ohne Eingriff als eine Alternative für die Forschung in der Forstwissenschaft

Die Methodik, deren Grundlage das klassische Experiment ist, hat sehr große Verbreitung in der forstlichen Forschung. Als Beispiele sind zu nennen: Düngungsversuche, Durchforstungsversuche usw. Stattdessen schlagen u.a. FERRARI (1965), von BOGUSLAWSKI (1966) vor, Untersuchungen an so komplizierten Systemen wie einem Standort ohne irgendeinen Eingriff durchzuführen. Für die Logik des Experimentes ist es nicht wichtig, ob die Verhältnisse, unter denen das Experiment durchgeführt wird, durch künstlichen Eingriff zustande gekommen sind, oder ob diese natürlicherweise vorhanden sind (FERRARI, 1965).

Viele Forscher sind der Meinung, daß das Experiment, welches aus dem klassischen Experiment entwickelt wurde, das sogenannte Experiment mit Eingriff (nach FERRARI, 1965) die einzig mögliche Untersuchungsmethode ist. Demgegenüber scheint es aber möglich, eine Hypothese mit Daten einer Untersuchung ohne Eingriff zu verifizieren, wobei die Variationen benutzt werden, die in der Natur vorhanden sind.

Einige Nachteile des klassischen Experiments sind schon genannt worden. Diese Nachteile entfallen bei der Untersuchung ohne Eingriff. Um die Vor- und Nachteile besser gegeneinander abwägen zu können, wird im folgenden eine Zusammenfassung (nach FERRARI, 1965) wiedergegeben:

Prüfung mit Eingriff

(klassisches Experiment)

1. Hypothesenbildung spielt vorher eine große Rolle; viel Denkwert. Starke Bindung an Hypothesen.
2. Vorherige Wahl der Faktoren nötig. Beschränkung des Problems in der Anzahl von Faktoren.
3. Nicht manipulierbare Faktoren schwierig zu untersuchen.
4. Prüfung oft unter unnatürlichen Umständen.
5. Versuchsdurchführung erfordert große Aufmerksamkeit und komplizierteste Apparaturen.

Prüfung ohne Eingriff

1. Hypothesenbildung spielt eine geringere Rolle. Hypothese folgt mehr aus den Ergebnissen. Geringere Bindung an Hypothese.
2. Geringerer Nachdruck auf Wahl der Faktoren; keine oder geringe Beschränkung der Anzahl der Faktoren.
3. Keine Schwierigkeit mit der Untersuchung von nicht manipulierbaren Faktoren.
4. Prüfung unter natürlichen Umständen.
5. Nachdruck wird auf die Auswertung der Ergebnisse gelegt, die Auslese der Versuchseinheiten im Hinblick auf die notwendige Variation der Faktoren ist wichtig.

6. Eliminierung der Einflüsse der nicht zu untersuchenden Faktoren durch Eingriff. Versuch setzt die Richtigkeit der ceteris-paribus-Annahme voraus; diese Annahme ist oft falsch (!)

7. Geringe Kenntnisse der Auswertungstechnik nötig. Akzent auf Varianzanalyse und Signifikanzberechnung. Qualitative Aussagen.

8. Unkenntnis der Bedeutung der nicht untersuchten Faktoren.

9. Analytisch eingestellt.

10. Methode besonders in Spezialuntersuchungen angewendet. Übertragung der Resultate in Praxis schwierig.

6. Eliminierung der Einflüsse der anderen Faktoren durch die Auswertung; sie ist durch die vielen Faktoren meistens sehr schwierig. Im Modell wird oft die ceteris-paribus-Annahme gemacht; diese Annahme ist oft falsch (!)

7. Forscher benötigt viele Kenntnisse der Auswertungstechnik. Akzent auf Regressions-, Aspekt- und Pfadanalyse. Qualitative und quantitative Aussagen über Größen der Einflüsse.

8. Reststreuung stellt die Bedeutung der nicht untersuchten Faktoren fest.

9. Synthetisch eingestellt.

10. Methode besonders in mehr angewandten Untersuchungen benutzt. Größere Möglichkeiten für Übertragung in die Praxis.

Es stellt sich noch die Frage, warum die Prüfung ohne Eingriff früher nicht größere Bedeutung in der forstwissenschaftlichen Forschung erreicht hat. Dafür gibt es zwei wesentliche Gründe:

Zunächst ist das Vorurteil zu nennen, daß man für die Erforschung und Erklärung einer Einzelheit des Naturgeschehens nicht den ganzen damit zusammenhängenden Fragenkomplex aufzurollen brauchte.

Heute setzt sich dagegen die Erkenntnis durch, daß es notwendig ist, die Zusammenhänge zu untersuchen, die über das Nächstliegende hinausführen.

Auch wurde von vielen Forschern außer acht gelassen, daß die Wald-Biogeozönose mehr ist als die Summe ihrer Glieder, nämlich ein System, welches aus den Eigenschaften jedes einzelnen Gliedes für sich nicht verständlich ist. Vielmehr bedingt der Zusammenschluß der Glieder neue Systemeigenschaften, durch die allein ein Verständnis des gesamten Systems möglich ist.

THIENEMANN (1956) schreibt: "Es gibt auch heute noch Forscher, die der Meinung sind, biozönotische Forschung sei verfrüht, solange man nicht die gesamte Gesetzmäßigkeit jedes Einzelmerkmals eines Systems kenne. Daß dies eine Verkennung des ganzheitlichen Charakters ist, den die Lebensgemeinschaft wie der Einzelorganismus besitzt, liegt auf der Hand. Wie man aus den Organen keinen Organismus zusammensetzen kann, da er mehr als die Summe seiner Organe ist, ebenso kann man aus Organismen keine Lebensgemeinschaft zusammensetzen, denn auch sie ist ein Ganzes! Bei dem Versuch einer solchen Summation kommt nie ein Ganzes heraus!

Wer uns den Vorwurf voreiligen Generalisierens oder einer verfrühten Synthese aus unzulänglich analysierten Einzelfaktoren macht, verkennt ganz auch die Eigenart naturwissenschaftlicher Arbeit: Ein Bauwerk muß man vom Fundament aus errichten, und dann baut man vom Kellergeschoß über die höheren Stockwerke bis zum Dachfirst auf. Aber bei der Naturwissenschaft kann man getrost auch in einem höheren Stockwerk schaffen, selbst wenn im tieferen noch nicht alles fertig ist, sofern man nur den Plan im Kopfe hat."

Als weiterer Grund für die geringe Beachtung, die die Forstwissenschaft der Prüfung ohne Eingriff geschenkt hat, ist anzuführen:

Durch die große Anzahl der in Betracht genommenen Faktoren sind die Auswertungsverfahren im allgemeinen sehr kompliziert. Eine richtige Beurteilung der Auswertungsergebnisse erfordert sowohl große Fachkenntnisse als auch umfangreiche Kenntnisse in den Auswertungsverfahren (insbesondere Statistik), eine Kombination, die in einer Person meist nicht vereinigt ist (FERRARI, 1965). Die meist sehr langwierige Auswertung verleitet häufig dazu, daß die Analyse zu früh abgebrochen wird.

Die Entwicklung in den letzten zwei Jahrzehnten hat bei den Auswertungsverfahren und in der Rechentechnik große Fortschritte gebracht. Mit Hilfe mathematischer Methoden, derer sich auch die Forstwissenschaft bedient, können viele der oben genannten Schwierigkeiten überwunden werden. Außerdem bietet die Mathematik in steigendem Maße viele neue Möglichkeiten, besonders bei der Aufstellung mathematischer Modelle biologischer Vorgänge (SCHMETTER, 1965). FLECHTNER (1967) ist der Meinung, daß sich aus dem heutigen Fach-Spezialisten der "Problem-Spezialist" entwickelt, der aus benachbarten Wissenschaften alles das kennen muß, was zur Bearbeitung und Lösung seines Problems wichtig ist.

Auch in der Forstwissenschaft sind viele Probleme ohne die Anwendung statistischer Auswertungsverfahren nicht mehr zu lösen. Darauf soll jetzt kurz eingegangen werden.

#### 1.4 Statistische Methoden in der Forstwissenschaft

Die statistischen Methoden, die in der Vergangenheit wie in der Gegenwart angewendet werden, spiegeln die Art der Fragestellung wie der Untersuchungsmethode wider: Eng gezielte Forschung und gezielte Fragestellung. Dies bedingt einfachere statistische Verfahren, wie die Varianzanalyse, die Regressionsanalyse und die Kovarianzanalyse.

Die Entwicklung der Rechentechnik hat es in neuerer Zeit ermöglicht, daß auch wesentlich kompliziertere Verfahren wie die Diskriminanzanalyse, die Pfadanalyse und die Faktorenanalyse zur Auswertung herangezogen werden können.

##### 1.4.1 Die Varianzanalyse

Als Grundlage für die Varianzanalyse, die im wesentlichen alle bisher bekannten Modelle erfaßt, kann der folgende mathematische Ausdruck gelten (AHRENS, 1967):

$$y_i = x_{1i} \beta_1 + x_{2i} \beta_2 + \dots + x_{pi} \beta_p + e_i \quad (1)$$

$x_{ji}$  - zufällige Variable,  $\beta_j$  - zu schätzender Parameter

$e_i$  - Meßfehler

Der Ausdruck (1) stellt das allgemeine lineare Modell nicht nur für die Varianzanalyse, sondern auch für die Regressions- und die Kovarianzanalyse dar.

Wenn die Größen  $x_{ji}$  nur die Werte 0 oder 1 annehmen können, dann wählt man als statistisches Verfahren die Varianzanalyse. Das bedeutet, daß bei varianzanalytischen Verfahren die Größen  $x_{ji}$  nur die Aufgabe haben, einen Effekt als vorhanden ( $x_{ji} = 1$ )

oder nicht vorhanden ( $x_{ji} = 0$ ) zu charakterisieren (AHRENS, 1967, ATANASIU und SCHNEIDER, 1966). Das bedeutet weiter, daß die Faktorstufen nicht quantitativ sondern nur rein qualitativ betrachtet werden. Es wird nur gefragt, ob eine Stufe vorhanden ist oder nicht, es werden aber nicht zahlenmäßige Werte dieser Stufe ermittelt (ATANASIU und SCHNEIDER, 1966). Daher kann man die Varianzanalyse als eine Generalisierung des t-Tests zur Prüfung des Unterschiedes zweier Mittelwerte auffassen (ÜBERLA, 1968). Im einfachsten Fall wird durch eine Varianzanalyse die Hypothese geprüft, ob die Mittelwerte mehrerer Gruppen sich mehr als zufällig von dem Mittelwert einer gemeinsamen Grundgesamtheit unterscheiden.

Durch die Varianzanalyse wird eine bestimmte Hypothese getestet. Diese Hypothese kann sehr verschieden aussehen und ist abhängig von der sachlichen Fragestellung und von den jeweils vorliegenden Daten.

Die Varianzanalyse ist nur dann anzuwenden, wenn die quantitativen Werte der Faktorstufen nicht interessieren. Außerdem muß bei der Varianzanalyse die Versuchsanlage gewisse Symmetriebedingungen erfüllen, die im wesentlichen darin bestehen, daß alle Faktorkombinationen gleich häufig vorkommen und jede Stufe eines Faktors mit jedem anderen Faktor kombiniert wird. Diese recht strengen Vorbedingungen sind sehr selten erfüllt, daher wird das Verfahren nur in wenigen Fällen angewandt.

Die Anwendbarkeit der Varianzanalyse ist besonders gegeben bei der Prüfung mit Eingriff, z.B. bei Düngungsversuchen, Sortenversuchen usw. Bei der Prüfung ohne Eingriff ist ihre Anwendbarkeit aus den obengenannten Gründen und wegen der Vielzahl der Faktoren, die in Betracht genommen werden, dagegen viel geringer.

#### 1.4.2 Die Regressionsanalyse

Wenn die Größen  $x_{ji}$  im Ausdruck (1) nicht nur die Werte 0 oder 1 wie bei der Varianzanalyse, sondern alle realen Werte eines Intervalls annehmen, so wählt man als statistisches Analysenverfahren die lineare Regressionsanalyse (AHRENS, 1967). Das bedeutet, daß bei der Regressionsanalyse die Faktoren als quantitative Variablen und dementsprechend die Faktorenstufe als die vorgegebenen Werte dieser Variablen aufgefaßt werden. Im Gegensatz zur Varianzanalyse stellt die Regressionsanalyse keine strengen Forderungen an die Auswahl und Kombination der Faktorenstufen. Sie verlangt nur, daß mehr Meßstellen, d.h. mehr Kombinationen der Faktorenstufen vorhanden sein müssen, als Parameter zu schätzen sind (ATANASIU und SCHNEIDER, 1966). Die Regressionsanalyse kann für zwei Variable durchgeführt werden (einfache R) oder für mehrere Variable (multiple R).

Die multiple Regressionsanalyse setzt sich zum Ziel eine abhängige Variable  $y_i$ , ausgehend von mehreren sogenannten "unabhängigen" Variablen ( $x_1, x_2, \dots, x_i$ ) optimal zu schätzen. Die Bezeichnung "unabhängige" Variable ist irreführend (ÜBERLA, 1968), da diese Variablen zusammenhängen müssen, wenn eine Schätzung möglich sein soll. Wären die Variablen wirklich unabhängig, also orthogonal zueinander und zur Zielgröße, dann würden sie nicht zur Schätzung beitragen. Sie sind "unabhängig" in dem Sinn, daß sie getrennt bestimmbar sind und experimentell variiert werden können.

Auch hier gilt die ceteris-paribus-Annahme, d.h. Änderung eines Faktors verursacht keine Änderung anderer Faktoren. Wie schon betont wurde, entspricht diese Annahme oft nicht der Wirklichkeit, besonders bei Untersuchungsobjekten wie der Wald-Biogeozönose. Dadurch wird das Modell falsch (FERRARI, 1965).

### 1.4.3 Die Kovarianzanalyse

Wenn in dem Ausdruck (1) für einige Größen  $x_{ji}$  die Werte 0 oder 1 auftreten, für andere Größen aber irgendwelche realen Werte, dann wird die Kovarianzanalyse angewandt. Diese nimmt also eine Zwischenstellung zwischen den beiden obengenannten Verfahren ein, bei der ein Teil der Faktoren quantitativ, ein anderer Teil qualitativ aufgefaßt wird (ATANASIU und SCHNEIDER, (1966)).

Diese drei "klassischen" statistischen Verfahren werden meist bei den klassischen Experimenten (Prüfung mit Eingriff) angewandt.

### 1.4.4 Klassische statistische Verfahren bei der "Prüfung ohne Eingriff"

Wie oben ausgeführt wurde, wird bei der Prüfung ohne Eingriff kein Experiment im klassischen Sinne durchgeführt, d.h. die natürlichen Variationen werden erfaßt und ausgewertet. Es können verschiedene Hypothesen aufgestellt und getestet werden. Die Frage nach der Zielgröße tritt zurück hinter die Bemühungen, das System so vollständig als möglich zu erfassen.

Wenn wir in unseren Untersuchungen die Frage nach der Abhängigkeit des Wachstums von verschiedenen Standortsfaktoren stellen und finden, daß es vom Wasser-, Luft-, Phosphorhaushalt abhängt, so müssen wir weiter fragen, wovon der Wasser-, Luft- und Phosphorhaushalt abhängt und wie diese untereinander zusammenhängen.

Hier stellt sich die Frage nach dem, was abhängig und was unabhängig ist. Dieses Problem berührt KENNEDY (1968, Seite 6), der die statistischen Verfahren einteilt in solche, die Variable mit "Dependence" und solche, die Variable mit "Interdependence" zu behandeln in der Lage sind.

Von der ersten Gruppe ("Dependence") werden Probleme gelöst, bei denen eine Abhängigkeit einer oder mehrerer Variablen von einer oder mehreren anderen Variablen vorliegt. Einfachste Beispiele sind Regressionsanalyse, Varianz- und Kovarianzanalyse.

Die andere Gruppe von Verfahren ("Interdependence") findet ihre Anwendung dann, wenn die Beziehungen einer Reihe von Variablen untereinander untersucht werden soll, ohne daß eine Variable besonders als abhängig herausgestellt wird. Hierher gehören (ÜBERLA, 1968): Korrelations- und Assoziationsanalyse, Analyse funktioneller Zusammenhänge, Komponentanalyse und Faktorenanalyse. Die Diskriminanzanalyse und die Berechnung der kanonischen Korrelation lassen sich nicht ganz in eine der beiden Gruppen einreihen.

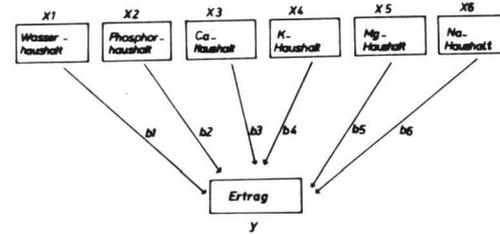
Die Anwendungsmöglichkeiten der klassischen statistischen Verfahren (Dependence) bei der Prüfung ohne Eingriff sind sehr beschränkt. Die im folgenden zu behandelnden statistischen Methoden sind umfassender und nicht mehr beschränkt auf die Bearbeitung von Daten, die im klassischen Experiment (Prüfung mit Eingriff) gewonnen wurden.

#### 1.4.5 Die Pfadanalyse

Als ein wenig gebrauchtes statistisches Verfahren, das aber gut für die Klärung bestimmter Fragen geeignet ist, kann die Pfadanalyse genannt werden.

Die Koeffizienten der gewöhnlichen multivariablen Regressionsanalyse können nicht für eine Erklärung kausaler Zusammenhänge herangezogen werden (WEBER, 1968).

Vorausgesetzt, daß unter den Variablen Kausalzusammenhänge bestimmter Art mehr oder weniger offenkundig sind, können Pfadmodelle in Form von graphischen Darstellungen diese Beziehungen wiedergeben. Um den Unterschied zwischen der Regressionsanalyse und der Pfadanalyse zu verdeutlichen, wird in Abb. 2 und 3 ein einfaches Beispiel gegeben. Für die Anwendung der Pfadanalyse muß die Art der Zusammenhänge bekannt sein (FERRARI, 1965b).



$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \dots)$$

Abb. 2 Regressionsanalyse

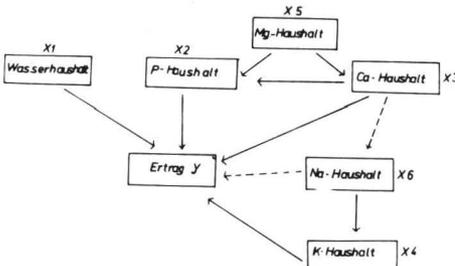


Abb. 3 Pfaddiagramm

#### 1.4.6 Die Faktorenanalyse

Mehr Möglichkeiten als die obengenannten Auswertungsmethoden bietet die Faktorenanalyse<sup>+</sup> (Aspektenanalyse nach FERRARI, 1965). Sie geht von einem mehrdimensionalen Modell aus. Eine Annahme über die gegenseitige Beeinflussung der Variablen braucht nicht gemacht zu werden. Die Analyse ist besonders geeignet, eine Hypothese zu prüfen. Auch lassen sich aus den Auswertungsergebnissen weitere Hypothesen entwickeln (FERRARI, 1965).

Die Bedeutung, aber auch die Schwierigkeit der Faktorenanalyse liegt darin, daß von einem meßbaren Sekundärsystem (den Variablen) auf ein nicht meßbares Primärsystem (die Faktoren) geschlossen werden kann. Die Faktorenanalyse liefert keine Interpretation, vielmehr erfordert sie Interpretation (VOAK, 1965).

In der Landwirtschaft wie auch in der Forstwissenschaft ist die Faktorenanalyse bisher sehr wenig angewendet worden. Hier einige Beispiele:

REIHER, W. et al. (1962) prüft die Möglichkeiten der Anwendung der Faktorenanalyse in der Pflanzenzüchtung.

FERRARI et al. (1967) untersucht 22 Standortmerkmale (überwiegend bodenkundliche Daten) in Zusammenhang mit dem landwirtschaftlichen Ertrag mit Hilfe der Faktorenanalyse.

---

<sup>+</sup>) Hier muß man klar zwei Begriffe trennen: Im ersten Teil der Arbeit verstehen wir unter dem Begriff "Faktor" eine Einflußgröße oder Variable. In der Faktorenanalyse dagegen wird unter "Faktor" etwas gänzlich anderes verstanden. Er hat nichts mit einer Einflußgröße zu tun. Der Faktor in der Faktorenanalyse ist eine nicht meßbare rechnerische Größe, die verschiedene meßbare Variable enthält.

KENNEL, R. (1966) benutzt die Faktorenanalyse bei der Klärung von Zusammenhängen zwischen Zuwachs und sozialer Stellung sowie Nachbarschaft der Bäume bei Buche und Fichte.

KEHFUESS, K.E. (1967) versucht bei der Klärung der Beziehungen zwischen Standort, Ernährungszustand und Wuchsleistung von Tannenbeständen in Süddeutschland unter anderen statistischen Verfahren auch die Faktorenanalyse anzuwenden.

SCHILLER et al. (1967) wendet faktorenanalytische Verfahren an bei der Klärung der Frage nach Fruchtbarkeitsstörungen bei Rindern in Zusammenhang mit Düngung, Flora und Mineralstoffgehalt des Wiesenfutters.

Zum besseren Verständnis der Faktorenanalyse halten wir es für notwendig, besonders hinsichtlich ihrer Abgrenzung gegenüber anderen multivariablen statistischen Verfahren etwas näher darauf einzugehen.

#### 1.4.7 Abgrenzung der Faktorenanalyse gegenüber anderen multiplen statistischen Verfahren (nach ÜBERLA, 1968)

Die multiplen statistischen Verfahren nehmen mehr und mehr an Bedeutung zu, weil sie an bestimmten Objekten mehrere gemessene Variablen in Betracht ziehen, d.h. mehrere Variable werden gleichzeitig (gemeinsam) analysiert und ausgewertet. Dies führt im allgemeinen zu schärferen und spezielleren Aussagen als die Behandlung nur einer Variablen.

#### 1.4.71 Die multiple Regressionsanalyse

Bei der multiplen Regressionsanalyse wird eine Zielgröße  $y$  aus einer Reihe anderer Variablen für jedes Objekt geschätzt, und zwar so, daß die Schätzfehler  $e_{ij}$  möglichst klein sind.

Demgegenüber wird in der Faktorenanalyse versucht, neue Variable zu bestimmen, die sogenannten Faktoren, deren Größen für die einzelnen Objekte dann geschätzt werden können. Während die multiple Regressionsanalyse auf der Ebene der Daten bleibt, versucht die Faktorenanalyse gewissermaßen hinter die Daten zu schauen und die Größen zu bestimmen, die ihnen gemeinsam sind und diese Größe für das Einzelobjekt zu schätzen.

Das faktorenanalytische Modell ist komplizierter und anspruchsvoller. Alle Variablen werden gleichrangig behandelt und es werden möglichst wenig unabhängige Größen ermittelt, die dann mit Hilfe der multiplen Regressionsrechnung für alle Objekte geschätzt werden können (Schätzung der Faktorenwerte). Bei der multiplen Regressionsanalyse ist dagegen eine wertende Untergliederung unvermeidlich.

Diese beiden Methoden unterscheiden sich von der Zielsetzung her, stehen aber nicht beziehungslos nebeneinander. Der entscheidende Unterschied liegt darin, daß die Faktorenanalyse nach wenigen Größen sucht, die die beobachteten Variablen in einem System repräsentieren und erklären.

#### 1.4.72 Varianzanalyse

Die Zielsetzung der Faktorenanalyse unterscheidet sich von der Varianzanalyse in wesentlichen Punkten. Bei der Varianzanalyse kommt es darauf an, den Einfluß einer oder mehrerer beobachteter Variablen (oder Interaktionen) auf bestimmte Meßwerte nachzuweisen

oder die Größe dieses Einflusses zu schätzen. Dabei interessiert man sich im allgemeinen nicht für die Einzelwerte als solche, sondern nur für die Abweichungen der Einzelwerte vom Modell. Die Zahl der Variablen darf bei der Varianzanalyse nicht zu groß sein. Die Faktorenanalyse versucht, die wesentlichen Größen ausfindig zu machen, die die Variation einer Anzahl von Variablen bestimmen. Während die Varianzanalyse die Einflüsse einer oder weniger gegebener Variablen zu testen erlaubt, versucht die Faktorenanalyse mehrere oder viele beobachtete Variablen auf sinnvolle Größen zu reduzieren.

#### 1.4.73 Die Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse untersucht, ob sich mehrere Gesamtheiten voneinander unterscheiden. Dabei ist vorher festgelegt, welches Element zu welcher Gesamtheit gehört. Die Faktorenanalyse ist in der Lage, aus einer großen Anzahl von Elementen unbekannter Zuordnung solche Gesamtheiten zu bilden. Dies geschieht in der sogenannten Q-Technik.

#### 1.4.74 Die Hauptkomponentenanalyse

Während die Varianzanalyse und die Diskriminanzanalyse mit der Faktorenanalyse nur wenig zu tun haben, steht die Hauptkomponentenanalyse in sehr enger Verbindung mit ihr, ist aber streng von ihr zu unterscheiden.

Die Hauptkomponentenanalyse ist die wichtigste Methode zur Faktorextraktion. Sie geht so vor, daß in eine Gesamtheit von Elementen ein orthogonales Koordinatensystem gelegt wird, wobei auf jeder Achse ein Anteil an der Gesamtvarianz lokalisiert ist.

Dabei erreichen die einzelnen Anteile in abnehmender Reihenfolge auf den zugehörigen Achsen jeweils ein Maximum. Man kann den Prozeß an einer beliebigen Stelle abbrechen und z.B. nur die ersten zwei Hauptkomponenten wählen, die vielleicht 80 % der Gesamtvarianz ausmachen.

Die Abgrenzung der Faktorenanalyse gegen die Hauptkomponentenanalyse ist teilweise eine Nomenklaturfrage. Einige Statistiker haben die Hauptkomponentenmethode seit ihrem Bestehen als einen möglichen und sehr nützlichen Schritt innerhalb der Faktorenanalyse betrachtet. Andere dagegen fassen die Faktorenanalyse als einen Spezialfall der Hauptkomponentenmethode auf.

#### 1.4.8 Kurze Einführung in die mathematischen Grundlagen der Faktorenanalyse

Eine Durchführung der Faktorenanalyse ist nur mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung möglich. Aus diesem Grunde ist es angezeigt, alle Rechnungen in Form von Matrizen zu schreiben (Einführung in die Matrizenschreibweise siehe AHRENS, 1967, HARMAN, 1960).

Wenn wir mit  $X = (x_{ij})$  die Ausgangsdatenmatrix bezeichnen, wobei

$i = 1, 2, \dots, m$  die Variablen,  
 $j = 1, 2, \dots, n$  die Standorte sind,

so hat die Matrix die Form:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Die Faktorenanalyse geht von den Korrelationskoeffizienten aus.

Der Korrelationskoeffizient zwischen zwei Variablen i und k kann nach der Formel berechnet werden:

$$r_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}} \quad (1)$$

Hierbei ist der Mittelwert:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (2)$$

Die Standardabweichung ist:

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (3)$$

Die Kovarianz zweier Variablen ist:

$$s_{ik} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_k) \quad (4)$$

Zur Standardisierung der Daten wird folgende Transformation durchgeführt:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{s_i} \quad (5)$$

Die so standardisierten Daten erfüllen die Bedingungen:

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{i,j} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n z_{i,j}^2 = 1 \quad (7)$$

Die Ausdrücke (6) und (7) besagen also: Alle Mittelwerte der Variablen  $z$  sind 0, alle Varianzen sind 1.

Von so standardisierten (oder normierten) Daten kann man den Korrelationskoeffizienten berechnen.

$$r_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n (z_{ij} z_{kj})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n z_{ij}^2 \sum_{j=1}^n z_{kj}^2}} = s_{ik} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n z_{ij} z_{kj} \quad (8)$$

Aus der Formel (8) geht hervor, daß für die standardisierte Variable der Korrelationskoeffizient gleich der Kovarianz ist. Dann kann man schreiben:

$$R = S = \frac{1}{n-1} Z Z' \quad (9)$$

$Z$  ist die Matrix der standardisierten Ausgangsdaten,  $R$  die Korrelationsmatrix. (Die Korrelationsmatrix hat in der Diagonalen den Wert 1 und ist symmetrisch, d.h.  $r_{ik} = r_{ki}$ ).

Wie schon gesagt wurde, kann als Ausgangspunkt die Korrelationskoeffizientenmatrix oder auch die Kovarianzmatrix (Ausdruck 9) dienen.

Es ist das Ziel jeder Faktorenanalyse, den Wert  $z_{ij}$ , also ein Element von  $Z$ , als eine lineare Kombination mehrerer hypothetischer Variablen oder Faktoren zu beschreiben (ÜBERLA, 1968). Nehmen wir an, der Wert  $z_{ij}$  solle als Linearkombination von  $q$  Faktoren ausgedrückt werden, so ist zu schreiben:

$$z_{ij} = a_{i1} P_{1j} + a_{i2} P_{2j} + \dots + a_{iq} P_{2j}$$

Oder in der Matrixschreibweise:  $Z = AP$  (10)

A und P sind Unbekannte.

$a_i$  sind die festen Koeffizienten, die zu ermitteln sind.

$P_j$  ist ein bestimmter Standort, mit den Meßwerten der Faktoren  $P_{ij}$ ,  $P_{qj}$ , die auch als Faktorenwerte bezeichnet werden.

Setzt man den Ausdruck (8) in (10) ein, so ergibt sich:

$$R = \frac{1}{n-1} ZZ' = \frac{1}{n-1} AP (AP)' = \frac{1}{n-1} APP'A' = A \frac{1}{n-1} PP'A$$

Der Ausdruck  $\frac{1}{n-1} PP'A = C = (q_{ep})$  ist eine Korrelationsmatrix, und zwar die zwischen den Faktoren. (Wenn die Faktoren nicht korreliert sind, d.h. orthogonal sind, wird  $C = I$ ). Dann ergibt sich:  $R = ACA' \longrightarrow R = AA'$

Dieser Ausdruck gilt als fundamentales Theorem der Faktorenanalyse nach THURSTONE (ÜBERLA, 1968). Es kann auch geschrieben werden:

$$r_{ik} = a_{i1}a_{k1} + a_{i2}a_{k2} + \dots + a_{iq}a_{kq}$$

Aus der bekannten linken Seite R kann man die rechte berechnen.

Als spezielleres Modell der multiplen Faktorenanalyse kann geschrieben werden:

$$z_{ij} = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{iq}F_q + b_iS_i + c_iE_i;$$

$i = 1, 2 \dots m$ , wobei  $a_i$  Ladungen, F gemeinsame Faktoren,  $S_i$  spezifische Faktoren,  $E_i$  die Fehlerfaktoren sind.

Die Berechnung von  $S_i$  wird im allgemeinen wegen des großen damit verbundenen Zeitaufwandes nicht durchgeführt.

Deshalb werden die Glieder  $b_iS_i$  und  $c_iE_i$  in  $a_iU_i$  zusammengefaßt. Damit vereinfacht sich das Modell der Multifaktorenanalyse zu:

$$z_{ij} = \sum_{m=1}^q a_{im}F_m + a_iU_i$$

## 1.5 Fragestellung und Abgrenzung des Problems

### 1.5.1 Grundsätzliche Untersuchungsvorstellungen

Aus der kurzen Einführung über die Wald-Biogeozönose als Untersuchungsobjekt und die Zusammenhänge zwischen ihren Teilsystemen geht hervor, daß für die Bearbeitung eine Methodik angewendet werden muß, die diesem komplizierten System angepaßt ist. Nicht jedes beliebige Untersuchungsverfahren trägt tatsächlich zur Klärung der Zusammenhänge bei.

Eine sehr wichtige Aufgabe jedes Fachgebietes ist die Suche nach Informationsträgern des Systems. In diesem Rahmen stehen auch die Aufgaben der forstlichen Bodenkunde, die Informationsträger eines Teiles des biogeozönologischen Systems zu suchen und zu definieren hat. Dabei muß es sich um solche Informationsträger handeln, die ihre Grundlage in der biogeozönologischen Einheit haben. Entspricht ein Informationsträger dieser Forderung nicht oder nur teilweise, so kann er die gestellte Aufgabe nicht oder nur unvollkommen erfüllen.

Die Arbeit geht von der grundsätzlichen Vorstellung aus, daß das Untersuchungsobjekt biogeozönologischen Charakter hat. Daraus wird die spezielle Untersuchungsmethodik abgeleitet:

1. Prüfung ohne Eingriff (nach FERRARI).
2. Auswertung nach dem faktorenanalytischen Verfahren.

### 1.5.2 Boden als Teil des Standorts

Bis heute herrscht die Vorstellung vor, daß der Boden das Medium ist, in welchem die Pflanzen wurzeln und daß er als solcher der Lieferant von Nährstoffen, Luft und Wasser ist. In diesem Zusammenhang wird an den forstlichen Bodenkundler z.B. die Frage gestellt, wie durch Anwendung von Düngemitteln die Nährstoffzufuhr erhöht und dadurch die Holzproduktion gesteigert werden kann.

Um in der Forstwirtschaft die Düngemittel richtig anwenden zu können, werden gute theoretische Grundlagen benötigt, die bis heute nach unserer Meinung noch nicht ausgearbeitet worden sind. Die Holzerzeugung ist nicht die erste und wichtigste Aufgabe der Forstwissenschaft. Nach LEIBUNDGUT (1966) muß man heute das Ziel unserer Waldwirtschaft in der nachhaltig höchstmöglichen Werterzeugung bei gleichzeitiger Erfüllung der Schutz- und Wohlfahrtswirkung des Waldes mit einem angemessenen Aufwand sehen. Es ist außerordentlich wichtig, das zu erkennen, weil die Forstwissenschaft mit langen Produktionszeiträumen arbeitet.

ASSMANN (1968, Seite 161) schreibt:

"Es ist klar, daß die Zielsetzungen, je nach dem Gewicht der Einzelfunktionen (Produktion, Schutz Aufgabe, Wohlfahrtswirkung), heute örtlich sehr verschieden ausfallen werden und sich bei der beängstigenden Dynamik der industriellen und gesellschaftlichen Entwicklung zeitlich rasch ändern können."

Diesen Gegebenheiten (langfristige Produktionszeiträume, kurzfristig sich ändernde Zielsetzungen) und Forderungen (angemessener Aufwand) kann nur Rechnung getragen werden, wenn sich der Wald in einem Gleichgewicht befindet. Unter Gleichgewicht soll hier verstanden werden, daß sich der Wald nicht nur selbst

erhält, (Selbstregulierung), sondern daß er sich auch selbst reproduziert, wie das bei natürlichen Wäldern der Fall ist. Alle Bemühungen müssen also darauf zielen, den Wald im Gleichgewicht zu erhalten oder, wenn er sich aus diesem Zustand entfernt hat, Maßnahmen zu treffen, um diesen wieder zu erreichen. Leider sind in dieser Hinsicht unsere Kenntnisse noch weit davon entfernt, solche Zielvorstellungen in die Praxis umzusetzen. Da der Begriff "Gleichgewicht" nicht ausreichend wissenschaftlich faßbar ist, benutzt man in der forstwissenschaftlichen Praxis heute noch weitgehend solche Begriffe wie "Wachstum", "Ertrag", "Zuwachs", "Produktivität" eines Standortes als Zielvorstellung.

Immer lauten unsere Fragestellungen etwa so:

- Welcher Standortsfaktor, welche Bodeneigenschaft beeinflußt das Wachstum?
- Mit welcher Kombination von Faktoren kann man am schnellsten oder am wirtschaftlichsten den gewünschten Ertrag oder Zuwachs erreichen?

Stattdessen sollten wir die Frage stellen:

- Wodurch wird das System der Wald-Biogeozönose bestimmt?
- Befindet sich das System in einem selbstregulierenden Zustand?
- Wenn nein, was für Maßnahmen sind zu treffen, um das System dahin zu bringen?

Entsprechend ist die Situation in der Bodenkunde: Es wird die Frage gestellt nach der Charakterisierung des Bodens als Medium für die Ernährung der Bäume und nach dem Zusammenhang zwischen dem Wachstum als Zielgröße und dem Nährstoffhaushalt als abhängige Größe.

### 1.5.3 Herkömmliche Methoden für die Beurteilung des Nährstoffhaushaltes

Für die Charakterisierung des Nährstoffhaushaltes des Bodens werden üblicherweise Extraktionsverfahren angewandt. Bei diesen Verfahren wird ein Teil der im Boden enthaltenen Nährstoffe mit Hilfe irgend eines Extraktionsmittels abgetrennt. Als Extraktionsmittel können Wasser wie auch saure oder alkalische Lösungen verwendet werden. Die Menge der Nährstoffe, die extrahiert werden, wird als pflanzenverfügbare Nährstoffvorrat angesehen. Die extrahierten Mengen sind jedoch von folgenden rein methodischen Faktoren abhängig (SCHEFFER und ULKICH, 1962):

Verhältnis Boden : Extraktionslösung, pH-Wert,  
Ionenkonzentration, Reaktionsdauer, Behandlungsart  
während der Extraktion, Temperatur und Reaktionspartner.

Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß die so gewonnenen Werte sowohl gegenüber dem Boden als auch gegenüber der Pflanze recht willkürliche Größen darstellen.

Die Beurteilung des Nährstoffhaushaltes eines Standorts ist aus diesen Gründen sehr schwierig. REHFUESS (1967) lehnt daher und wegen einer Vielzahl anderer technischer Gründe die Bodenuntersuchungsmethoden für die Beurteilung des Ernährungszustandes der Bestände ab und befürwortet einen Ausbau der blatt- und nadelanalytischen Verfahren für die Ernährungsdiagnose in der Forstpraxis.

LAATSCHE (1967) meint, daß die Blattanalyse weit bessere Aufschlüsse als die Bodenanalyse zu geben vermag, da es keine allgemein gültigen Maßstäbe für die Intensität gibt, mit der der Boden die mineralischen Nährelemente den Baumwurzeln anbietet.

Diese beiden Zitate zeigen, daß die bodenkundlichen Untersuchungsmethoden bis jetzt keine befriedigende Antwort auf die Frage nach dem Nährstoffzustand geben konnten und daß die Forscher sich auf andere Weise über den Boden zu orientieren versuchten. Hier wird jedoch die Meinung vertreten, daß die Lösung bodenkundlicher Probleme nicht in mittelbaren Erscheinungen gesucht werden sollte (Blattanalyse), sondern unmittelbar da, wo die Probleme begründet sind, nämlich im Boden.

Das Merkmal, das heute wie in der Vergangenheit immer wieder interessiert hat, ist die Produktivität eines Standortes. Dagegen wäre nichts einzuwenden, wenn sie als ein Merkmal der Wald-Biogeozönose angesehen würde, das mit dem Gesamtgeschehen am Standort eng verbunden ist. Die Regel ist jedoch, daß die Produktivität nur im Zusammenhang mit einigen wenigen standörtlichen Faktoren gesehen wird, was zur Folge hat, daß bei Eingriffen häufig unerwartete Fehlschläge eintreten.

WALSTON (1964) hat eine Tabelle zusammengestellt, die zeigt, wie unterschiedlich verschiedene Autoren die Produktivität eines Standortes mit den Bodeneigenschaften in Zusammenhang bringen (Tab. 1).

Aus der Tabelle geht hervor, daß nur selten mehrere Nährstoffe gleichzeitig in Betracht gezogen werden, wie z.B. bei SMITH (1960), der die Produktivität der Kiefer in Abhängigkeit vom N, P, K, Ca-Gehalt nachprüft oder THOMSON und MCCOMB (1962), die N, K, Ca, lösliches Al und Fe untersuchen, ebenso YAMAMOTO (1962), der N, Ca, die Basensättigung, organische Substanz und C/N berücksichtigt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Bodeneigenschaften im Zusammenhang mit der Standortproduktivität (RALSTON 1964)

Autor und Jahr	Baumart	Bodentiefe	Wasserhaushalt	Nährstoffhaushalt	Lufthaushalt
Botvay (1953)					Tiefe bis Wasserspiegel
Gaiser und Mers (1953)	rot und weiß Kiefer	Tiefe bis Unterboden	Moisture equivalent		
Mc Clurkin (1953)	langnadelige Kiefer	Tiefe bis undurchlässigen Horizont			
Orlov (1953)	Schwarzfichte				Tiefe bis Dauerfrost
Carman (1954)	Douglasie	Tiefe bis Untergestein	Steins Moisture equivalent		
Dingle und Burns (1954)	kurzadelige Kiefer	Tiefe des Oberbodens	% Tongehalt im "A" Horizont		
Karschon und Van Praag (1954)	Gummibaum	Tiefe bis verdichtete Schicht			
Levy und Sutherland (1954)		Tiefe bis verdichtete Schicht			Tiefe bis Gley
Zahner (1954)	Loblolly Kiefer	Tiefe bis Unterboden	Wert des imbibitional water		Drainage-Klasse
Aird und Stone (1955)	europäische und Jsp. Lärchen	effektive Tiefen			Drainage-Klasse
Forristall und Gessel (1955)	Douglasie, Rot-seder und Erie	Tiefe bis Verdichtungsschicht			Drainage-Klasse
Lüg (1955)		Tiefe bis Untergestein			
Lesmon (1955)	Douglasie	effektive Tiefe			
Ralston und Barnes (1955)	Kiefer	Tiefe bis feinkörnigen Unterboden			Tiefe bis Gley
Beaufait (1956)	Eiche		Tongehalt	verfügbares K (neg.)	
Copeland (1956)	Kiefer	effektive Tiefe			
Husch und Lyford (1956)	Kiefer		verfügbares Wasser (Klasseneinteilung)		
Schlots et al. (1956)	Douglasie	Tiefe bis Ton- oder Verdichtungsschicht			
Trible und Weisman (1956)	Eiche	effektive Tiefe			
Borowiec (1957)	Kiefer		Textur	K-Gehalt	Tiefe bis Grundwasser
Doolittle (1957)	Eiche	Tiefe bis Unterboden	Textur		
Voigt et al. (1957)	Espen			austauschbare Basen und N %	
Copeland (1958)	Kiefer	effektive Tiefe	verfügbare Wasserkapazität		
Hansen und McComb (1958)		Tiefe bis Tonschicht		Erosion, organische Stoffe	
Zahner (1958)	Kiefer	Tiefe bis Unterboden	Textur des Unterbodens		% Schluff im Oberboden
Zinke (1958)	Douglasie, Ponderosa Kiefer	Tiefe bis Unterboden			
Broadfoot und Ernard (1959)	Gummibaum	Tiefe bis Verdichtungsschicht	Textur	K-Gehalt	Internal Drainage
Hills (1959)	verschiedene		Moisture Regime	Nährstoff-Regime	Moisture Regime
Wehrmann (1959)	Kiefer			C/N Humusauflage	
Barrett und Garbosky (1960)	Kiefer	Tiefe bis Ton- oder Verdichtungsschicht	Textur im Oberboden		
Boonkird et al. (1960)	Teak Cottonwood	Durchwurzelungstiefe		organische Stoffe	Internal Drainage
Broadfoot (1960)	Cottonwood		Moisture Regime, Textur		Internal Drainage
Cox et al. (1960)	Ponderosa Kiefer	effektive Tiefe	Grundwasser		
Mashimo (1960)	Sugi, hinoki	Permeability-depth index			Permeability-depth index
Myers und van Duesen (1960)	Ponderosa Kiefer	Tiefe bis "C" Horizont			
Row (1960)	Kiefer	Tiefe bis feine Textur		Stärke des "A <sub>1</sub> " Horizonts	
Smith (1960)	Kiefer			N, P, K, Ca, Mg-Gehalt	Internal Drainage
Stoekler (1960)	Espen		Textur	Ca und Mg-Gehalt	Tiefe bis Wasserspiegel
Strothmann (1960)	Espen		Si+O-Gehalt, % Skelett	pH im Unterboden	Tiefe bis Wasserspiegel
Tryon et al. (1960)	gelbe Pappel	Tiefe bis Tonschicht		Stärke des "A <sub>1</sub> " Horizont	Tiefe bis Gley
Yamamoto (1960)	Aka-esomatsu	Tiefe bis Tonschicht			
Broadfoot (1961)	Eiche	Tiefe bis Unterboden	Moisture Regime, Textur		Tiefe bis Gley
Carman (1961)	Eiche	Tiefe bis Unterboden	Textur im Unterboden, Skelettgehalt		
Lüg (1961)	verschiedene	Tiefe bis Untergestein		Stärke der Humusauflage	
Mader und Owen (1961)	Kiefer			O.M. in "A" Horizont, N tot. im Profil	Drainage Klasse
McGee (1961)	Kiefer	Tiefe bis feine Textur		Stärke des "A <sub>1</sub> " Horizont	
Zinke (1960)	Ponderosa Kiefer			N-Gehalt pro m <sup>2</sup>	
Castanos (1962)	Kiefer	effektive Tiefe			
Hebb (1962)	Gummibaum und gelbe Pappel				Drainage Klasse, Tiefe bis Gley
Jackson (1962)	Kiefer	Tiefe bis undurchlässigen Horizont	% Si + C		Tiefe bis Gley
Macaulay Inst. Soil Res. (1962)	Sitka-Fichte			N- u. K-Gehalt d. Torfs	
Richards et al. (1962)	Kiefer		Textur		Internal Drainage
Thomson und McComb (1962)	schwarze Walnuß	Tiefe bis undurchlässige Schicht		N, K, Ca lösliche Al und Fe	
Yamamoto (1962)	Todo-fir	Tiefe-permeability index		N, Ca, Basensättigung O.M., C/N	Tiefe-permeability index
Gilmore (1963)	Kiefer		Sandgehalt, Textur im Oberboden		Tiefe bis Gley
Graham et al. (1963)	Espen	Tiefe bis undurchlässige Schicht	Textur		Tiefe bis Wasserspiegel
McClurkin (1963)	Eiche	Tiefe bis undurchlässige Schicht	% Ton im Oberboden, 15 atm. %		
Phillips und Markley (1963)	Gummibaum		Textur		Tiefe bis Wasserspiegel und Fluktuation

O.M. = organic matter (organische Stoffe)

#### 1.5.4 Fragestellungen

Aus der Einführung gehen zwei Fragenkomplexe hervor, die dieser Arbeit zugrundeliegen:

1. Die Erfassung des Bodens als Teil des Systems und die Definition der Informationsträger, die die Verhältnisse im System am besten widerspiegeln. Die Informationsträger sollten theoretisch gut fundiert werden. Bei ihrer Auswahl sollte immer berücksichtigt werden, daß wir Information über das System einer Wald-Biogeozönose suchen.
2. Die Untersuchung, wie die theoretisch fundierten Größen unter sich und mit dem Wachstum bzw. Zuwachs verschiedener Pflanzenarten zusammenhängen, d.h. also, die theoretischen Größen sollten auch Informationsträger für den Nährstoffhaushalt sein.

##### 1.5.41 Die theoretische Grundlage der Untersuchung des Bodens

Alle Überlegungen gehen davon aus, daß der Boden als Medium für das Wachstum der Pflanzen und als ein Teil der Biogeozönose ein dreiphasiges System darstellt, das sich im dynamischen Gleichgewicht befindet. Dieses dynamische Gleichgewicht besteht zwischen den drei Bodenphasen: Feste Phase, Bodenlösung und Bodenluft (Abb. 4).

Aus diesem System nimmt die Pflanze ihre notwendigen Nährstoffe sowie auch Wasser und Luft (Abb. 5). Aus dem System können verschiedene Größen abgeleitet werden (nach ULRICH, 1960).

Der Nährstoffvorrat, dessen Bindungszustand das Nährstoffpotential des Bodens bestimmt.

Das Nährstoffpotential als Maß des Energieniveaus der Nährstoffe im Boden. Es läßt sich durch die Konzentration der Nährstoffionen in der Bodenlösung beschreiben.

Die Nährstoffkinetik; darunter versteht man die Geschwindigkeit, mit der die Ionen aus der festen Phase des Bodens in die Bodenlösung und von dort in die Pflanzen übertreten.

Die drei genannten Größen stehen untereinander in Zusammenhang (ULRICH, 1966) und beeinflussen sich gegenseitig.

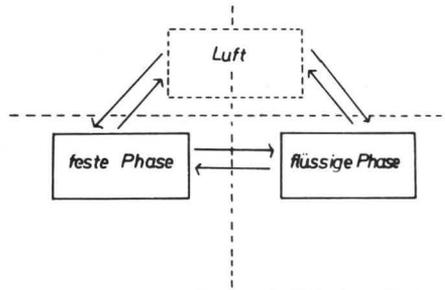


Abb. 4 Wechselwirkung im Boden, als 3phasiges System

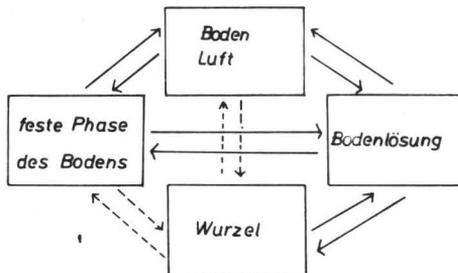


Abb. 5

Nach der Untersuchungsmethode des dynamischen Gleichgewichtes (KOMAROVA, 1953, ULRICH, 1960) lassen sich mehrere Größen in der festen Phase wie in der Gleichgewichtsbodenlösung bestimmen. In der festen Phase ist dies der Vorrat. Darunter versteht man z.B. die Ionenmengen, die auf den Oberflächen der Kolloide austauschbar sind. Sie lassen sich ausdrücken als:

Gehalt ( $\mu\text{val/g}$  Boden),

Vorrat/Fläche ( $\text{kval/ha}$ ),

Äquivalentprozent -  $X_M^S \cdot 100$  (dimensionslos; z.B. Anteil eines austauschbaren Kations an der Äquivalentsumme aller austauschbaren Kationen).

In der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) läßt sich bestimmen:

Die Konzentration in  $\mu\text{mol/l}$ ,

die Aktivität in  $\mu\text{mol/l}$ ,

das Potential ( $\text{pM}$ ),

das Schofield'sche Potential ( $\text{pH} - 1/z\text{pM}$ ;  $z = \text{Wertigkeit des Ions } M$ ),

das Äquivalentprozent ( $X_M^L \cdot 100$ ).

Jede einzelne dieser Größen hat ihre Aussagekraft. Unsere Aufgabe ist es, nachzuprüfen, welche dieser Größen die besten Informationsträger im obengenannten Sinne sind, d.h. die besten Aussagen über das Gesamtsystem und über die Nährstoffversorgung liefern.

Vor einer Darstellung der Ergebnisse muß noch kurz auf ein Problem eingegangen werden, welches mit den Grundlagen, von denen diese Arbeit ausgeht, in Zusammenhang steht: Das sind die Vorstellungen über die Stoffaufnahme durch die Pflanzen. Eine Vielzahl von Forschern hat sich mit diesem Problem beschäftigt, und es existiert eine ganze Reihe verschiedener Hypothesen (ULRICH, 1963, MARSCHER, 1968). Besonders interessant ist die Arbeit von GENNY und GROSENBACHER (1963),

die mit Hilfe der Elektronenmikroskopie nachgewiesen haben, daß eine direkte Ionenaufnahme von der Oberfläche der Kolloide möglich ist, weil ein sehr enger Kontakt zwischen dem Kolloid und den Wurzelhaaren besteht. Ungeklärt ist die Frage, ob diese Art der Ionenaufnahme eine größere Rolle spielt.

Bei unseren Untersuchungen wurde stillschweigend davon ausgegangen, daß die Pflanze die notwendigen Nährstoffe aus der Bodenlösung aufnimmt. Diese Grundvorstellung entstammt der bekannten Tatsache, daß Pflanzen solange organische Stoffe produzieren können, als sie mit Wasser versorgt sind. Andererseits ermöglicht eine bloße Nährstoffaufnahme unter natürlichen Bedingungen noch keine Produktion von organischer Substanz, solange kein Wasser aufgenommen wird.

Gute Gründe sprechen also dafür, daß diese Grundannahme der Arbeit richtig ist. Die Frage nach dem Mechanismus der Ionenaufnahme soll aber hier nicht nachgeprüft werden. Vielmehr stellt die Arbeit einen Versuch dar, diejenige Größe zu definieren, die uns die beste Information über das System Boden und Biogeozönose liefert.

## 1.6 Untersuchungsmaterial und Untersuchungsmethoden

Wegen der Komplexheit einer Biogeozönose sollte zunächst ein einfacheres Modell untersucht werden. Daher wurde nicht in natürlichen Wäldern gearbeitet, sondern es wurde zunächst versucht, ein möglichst homogenes Material zu verwenden. Ein sogenannter 16-Sorten-Pappelversuch, der auf 31 Standorten eingerichtet worden ist, schien geeignet.<sup>+)</sup> Günstig an diesem Versuch war, daß Klone von 16 Sorten von Schwarzpappelhybriden angepflanzt wurden und daß die Anbaupläne mehr oder weniger ähnlich waren. Dieser Vergleichsversuch wurde von der Bundesforschungsanstalt für Forstgenetik und Holzwirtschaft in Schmalenbek-Hamburg in der Zeit von 1959 bis 1960 angelegt. Ziel dieses Feldversuches ist es, an 31 Versuchsorten in der Bundesrepublik Deutschland und in Holland die Leistung von 16 weitverbreiteten Wirtschafts-Pappelklonen zu ermitteln (HATTEMER, 1967).<sup>++)</sup>

Die Klone sind:

- |               |                 |                   |                  |
|---------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 1. Brabantica | 5. Flachslanden | 9. Leipzig        | 13. Neupotz      |
| 2. Drömling   | 6. Forndorf     | 10. Löns          | 14. Regenerata D |
| 3. Eckhof     | 7. Gelrica      | 11. Marilandica   | 15. Robusta      |
| 4. Eukalyptus | 8. Grandis      | 12. Missouriensis | 16. Serotina     |

---

<sup>+) An dieser Stelle danke ich Herrn Dr. HATTEMER für die zahlreichen Diskussionen sowie Anregungen bei der statistischen Bearbeitung der Daten, wie auch Herrn Professor Dr. LANGNER, Direktor der Bundesforschungsanstalt für Forstgenetik und Holzwirtschaft in Schmalenbek, für die ertragskundlichen Daten des 16-Sortenversuchs.</sup>

<sup>++) "Die Planung der Versuchsreihe besorgte Dr. E. SAUER, vormals Schmalenbek, die Anlage der Versuche erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Ausschuß für Biologie der Pappeln der Deutschen Pappelkommission, vormals unter dem Vorsitz von Landforstmeister Dr. R. MÜLLER-DRÜHL. Die Betreuung lag seit 1961 bei diesem Gremium unter Vorsitz von Professor Dr. E. ROHMEDEK, München. Seit 1.9.1966 obliegen dem genannten Ausschuß auch alle Fragen der Auswertung" (HATTEMER, 1967).</sup>

### 1.6.1 Auswahl der untersuchten Flächen und ihre Beschreibung

Die 31 Versuchsflächen sind weit voneinander getrennt, sie liegen zwischen der Nordseeküste und dem Kaiserstuhl. Da nicht alle Flächen gut erhalten geblieben sind, wurden nur solche ausgewählt, die bis Herbst 1967 noch für eine Auswertung geeignet waren. Von den 31 Versuchsflächen sind 22 bodenkundlich untersucht worden, von diesen haben wir 18 zur weiteren Bearbeitung verwendet. Die Abb. 6 zeigt den Lageplan der Versuchsorte (nach HATFEMER, 1967, geändert). In Tab. 2 sind allgemeine Standortsangaben angeführt.



Abb. 6 Lageplan der Versuchsorte

Tab. 2: Allgemeine Charakterisierung der Standorte

Nr.	Versuchsort Fläche Nr.	See- höhe m	Temp. Jahres- mittel °C	Temp. Mittel V-VIII °C	Niederschläge Jahres- m/n	V-VIII m/m	Vegetations zeit Tage
1.	Barenaue/Ösnabrück Pa 6	68	8.8	15.4	771	286	161
2.	Meppen Pa 7	26	8.6	15.1	706	275	157
3.	Danndorf Pa 8	83	8.8	15.9	676	275	163
4.	Bensheim Pa 9	100	9.6	17.1	646	271	173
5.	Frankfurt Pa 10	103	9.6	17.0	585	222	174
6.	Frankfurt Pa 11	103	9.6	17.0	585	222	174
7.	Ober-Uhmen Pa 12	375	6.5	13.4	1045	367	134
8.	Bielefeld Pa 13	81	9.0	15.7	839	312	165
9.	Niederelfhausen Pa 16	200	9.2	15.6	1026	354	167
10.	Kaiserstuhl Pa 19	220	9.7	17.0	672	304	175
11.	Würzburg Pa 26	179	9.0	16.5	573	247	166
12.	Glückstadt Pa 27	17	8.0	14.7	693	275	150
13.	Harsefeld Pa 28, 29	20	8.0	14.7	752	300	150
14.	Dortmund Pa 30	120	9.1	15.4	740	295	165
15.	Speyer Pa 33	105	9.8	17.3	562	236	177
16.	Eltmann Pa 35	289	8.2	15.7	622	263	158
17.	Rhedebrügge Pa 39	40	8.7	15.1	769	276	161
18.	Oberndorf Pa 20	650	8.4	15.9	891	326	162

1.6.11 Bodenkundliche Untersuchungen im Gelände und  
allgemeine Charakterisierung der Versuchsflächen

Jede ausgewählte Versuchsfläche wurde abgebohrt und kartiert. Je nach Wechsel der Bodeneigenschaften wurden die Bohrungen im gitterförmigen Abstand von 10, 5 oder auch 2 m durchgeführt. Solche Flächenteile, die zur nicht überwiegenden Bodeneinheit gehörten, wurden ausgeschieden. Nach der Bohrung wurde ein Bodenprofil angelegt, an welchem die Beschreibung des Bodens nach morphologischen Merkmalen (BENECKE, 1966) und die Entnahme von Bodenproben zur physikalischen und chemischen Untersuchung im Labor vorgenommen wurde.

Für die physikalischen Untersuchungen (pF-Messungen, Durchlässigkeitsmessungen im gesättigten und im ungesättigten Bereich) wurden aus jedem genetischen Horizont in meist drei Wiederholungen Stechzylinderproben genommen (Inhalt 250 cm<sup>3</sup>).

Für die chemischen Untersuchungen und die Gewinnung der Gleichgewichtsbodenlösung wurde eine Bodenprobe pro genetischem Horizont entnommen.

Ein Überblick über die morphologischen Bodeneigenschaften wird in Tab. 3 gegeben. Die gesamten Geländeuntersuchungen wurden im Herbst 1967 (Oktober bis November) durchgeführt.<sup>+) )</sup>

---

<sup>+) )</sup> Die Untersuchungen im Gelände hat Herr Dr. BENECKE angeleitet und in jeder Weise unterstützt, hierfür wie auch für die zahlreichen Diskussionen danke ich. Außerdem wurden wir im Gelände von Beamten der Forstämter unterstützt, wofür ich an dieser Stelle danken möchte.

Tab. 3

Nr.	Fläche Ausgangsmaterial Bodentyp Humusform	Horizont	Tiefe	Bodenart	Durch- wurzelung	Bodenfarbe
1.	Barenaue Pa 6 Schwemmsand Anmoor Gley Anmoor	Ah1 Ah2 Ah3 Go1 Go2 Go r/r Gr	0-15 15-37 37-45 45-75 75-80 80-90 ab 90	   m S u T m S	       	10 YR 2/1 10 YR 3-2/1 5 YR 2-3/2 5 Y 6/3 5 Y 5/1 5 Y 5-6/1
2.	Meppen Pa 7 Schwemmsand Rigosol-Gley Mull	GoAhp11 GoA(h)p12 BGo Go	0-12 12-40 40-48 48->180	m SfS m SfS m SfS m SfS	$\bar{f} \bar{m}$ $f'm' >$   	10 YR 4-3/3 10YR4/2; 10YR5/6 10 YR 5-6/6 2.5Y7/2-4; 5 YR 5-4/8
3.	Danndorf Pa 8 Sande Gley Moder	Ah Ah2Gor IIah3Gor1 II Gor II Gr	0-20 20-30 30-38 38-50 50-90<	$\bar{t}S - \bar{s}T$ $tS$ $tS$ 1'S 1'	$\bar{f}$ $f$ $w'$ $w''$ $w''$	5 YR 2/2 5 Y 4/1  5 Y 6-7/1
4.	Bensheim Pa 9 Rhein-Schwemmsand Gley-Braunerde Mull	Ahp B(h)v Bv II Go Gor	0-17 17-25 25-57 57-95 95-<	gsmS, fg" gsmS, fg" gsmS, fg" tgs mS gS, g	$\bar{f} > mg''$ $f'm', g''$ $(f-m) >$ $f < m > g$	5 YR 6/3 10 YR 7/4 5 YR 3-4/2 10 YR 5-6/4 10 YR 7-6/3
5.	Frankfurt 64 Pa 10 Sand, tert. Kalkst. Terrafusca-Braunerde Mull	Aph1 Aph2 Bv II Bv Cv	0-10 10-20 20-40 40-60 60-<	m-g.S m-g.S t'msgS u'T	$\bar{f} > mg >$ $f'mg$ mg $(f, m)'$	10 YR 3/1 10 YR 3/1-2 10 YR 4-5/3-4 10 YR 5/3 5 Y 7/3-4
6.	Frankfurt 254 Pa 11 Gley Mull	Ah AhGo Go Gor II Gr	0-11 11-25 25-45 45-65 65-<	u T u T u T u T u T	$\bar{f} > m'$ $(fm)'$ $(fm)'$ $(fm)'$ $(fm)'$	5 Y 2-4/1 5 Y 4-5/1 5 Y 5/1; 5 GY5/1 5 GY 6/1 2.5 Y 6-7/2
7.	Lauterberg Pa 12 Löß Stagno-Gley	Ah1 Ah2 Sw1 Sw2 IISd	0-8 8-18 18-40 40-60 60-<	t U $\bar{t}$ U $\bar{t}$ U- t U t U	$\bar{f} m$ f m m' w''	10 YR 3/2 10 YR 4/2 2.5Y6/2m.5YR4/6 2.5Y6/2m.5YR4/6 7.5 YR 4/4

Nr.	Fläche Ausgangsmaterial Bodentyp Humusform	Horizont	Tiefe	Bodenart	Durch- wurzelung	Bodenfarbe
8.	Bielefeld Pa 13 Sander Anmoor-Gley (Pseudogley-Gley) Mull	GoAhp1	0-5	ms/S	f'	5 Y 5-4/2
		GoAhp2	5-25	ms/S	> f''m'	5 Y 5-6/2
		Go1	25-28	ms/S	m'	
		IIfAh1	28-44	Torf	fm	10 YR 2/2
		IIah2	44-47	u(u')T	fm	10 YR 3/2-3
		GoSd	47-55	u(u')T	f''fossil w	5 Y 5/1
		Go/ro	55-75	fst U	f''	5 GY 5-6/1
	Gr	75-175<	fstU/mS			
9.	Gevelsberg Pa 16 Kolluvium Auenboden Mull	Ah1	0-3			10 YR 3/1
		Go'Ah2	3-15	t U	(fm)'	10 YR 3/2
		BvGo	15-30	t U	(fm)'	10YR4-3/3; 5Y5-4/1
		Bv''Go	30-48	< uT	(fm)'	5 Y 5-4/1
		Gr'o	48-90	u T	m''	5 Y 5/1
		Gor	90-120	>t U (>)	<(fm)	5 GY 4/1
		II Gr	120-<	S/L x		5 G 4/1'
10.	Kaiserstuhl Pa 19 kalkhaltiger Löss Pararendzina Mull	Aph1	0-10	t'U	fm-g	10 YR 5/3
		Aph2	10-25	t'U	f<m>g	10 YR 5/3
		C (v)	25-50	t'U	(m+g)'	10 YR 6-7/3-4
		C	50-100-<	t'U	± m''	10 YR 7/4
11.	Würzburg Pa 26 Schuttmaterial  Schuttboden Mull	Y Ah	0-8	t'U	fm	10 YR 3/2-3
		Y1	8-50	t'U-U	(fm)''-g'	10 YR - 6/3 - 4/2-3 - 7-8/2
		Y2	50-70	l U	f'	10 YR 4/2
		II Y	70- <			
12.	Glückstadt Pa 27 Auensediment Flußmarsch Mull	Ap1	0-10	t U	f'	10 YR 4-3/1
		Ap2	10-30	t U	f'm	10 YR 3/2
		Bv Go1	30-50	-t U	f''m	10 YR 4/2
		Go2	50-87	uT<(f <sub>s</sub> )=	fm	10 YR 4-5/2
		Go3	87-102	uT//f <sub>s</sub> U=fU	fm	5 Y 5/2
		Go4	102-115	uT//f <sub>s</sub> U=tU	fm	5 Y 5/1
		Go5	115-120	-uT	fm	
Gr	120-150-<-uT		fm	5 GY 4-1		
13.	Harsefeld Pa 28,29 Flugsand Rigosol (Podsol) Mull	AP1		F S	f'm'	
		Ap2/1		fS	f'm'(g)'	5 YR 2/1
		Ap2/3	0-80	fS	f'm'(g)'	5 YR 4/1
		Ap2/3		fS	f'm'(g)'	5 YR 2/1
		Sc	80-135	f <sub>s</sub> (l'S)''	f'm'(g)'	5 Y 7/2
		Steinshle	135-150			
		II Sd1	150-160			
II Sd2	160-240-<					

Nr.	Fläche Ausgangsmaterial Bodentyp Humusform	Horizont	Tiefe	Bodenart	Durch- wurzelung	Bodenfarbe
14.	Dortmund Pa 30 Löß Stagno-Gley Moder	Ahp1	0-10	-tU	$\bar{f}m$	5 Y 3/2
		Ahp2	10-16	-tU	fm	5 Y 4-3/1
		Sw1	16-30	tU	m > g	2.5 Y 6-5/2
		Sw2	30-50	-tU	w''	2.5 Y 6-5/2
		Sw3	50-90	-t > U	w'''	10 YR 6/3
	C/Sw.o	90-260-<	t'U		10 YR 6-5/3	
15.	Speyer Pa 33 Tone, Schluffe/ Sande Auenboden Mull	Ah1	0-5	$\bar{u}^t$	$\bar{f} \gg m$	5 Y 3-4/1
		Ah/Go1	5-12	$\bar{u} T$	m	5 Y 4/1
		Go2	12-44	-u T	>(fmg)>	5 Y 5/1
		II Go3	44-47	S		
		Go4	47-73	tU//fs=st'U	f'm'g'	5 Y 5/2
	III Go5	73-120<	gS		5 Y 6-7/3	
16.	Eltmann Pa 35 Lettenkeuper Gley-Pseudogley Mull	M Ah1	0-15	uT	ffm	2.5 Y 3/2
		M Ah2	15-22	uT	(fm)'	2.5 Y 4/2
		Go1	22-42	uT	w''	5 Y 5/2
		GroSd	42-85	uT	w''	5 G6/1m.10YR4/3
		II Cv	85-130			
	II C	130-150<				
17.	Rhedebrügge Pa 39 Sande Naßgley Feuchtmull	Ah1	0-6	mS(x'')'	$\bar{f} > m'$	10 YR 2/2
		Ah2	6-25	mS(x'')'	f' >	10 YR 3/2-3
		Go1	25-35	mS		10 YR 5-4/2
		Go2	35-100<	mS		7.5 YR 5/4; 10 YR 6/3
18.	Oberndorf Pa 20 Lettenkohle/m <sub>o</sub> Pelosol Mull	Aph1	0-4	s' $\bar{t}U$	f > m'g	10 YR 3-4
		Aph2	4-13	s' $\bar{t}U$	-f > m'g	10 YR 4/2-3
		Bv1	13-45	$\bar{t}U$	(f'm'g')>	10 YR 4/3-4
		(C)Bv2	45-120	tUx'	(f'm')	10 YR 5-6/3-4
		II Cv	120-130	u,u' $\bar{t}x$		
	II C	130-<				

Erklärung: = sehr stark (viel)  
 - stark (viel)  
 ohne normal  
 ' schwach (wenig)  
 " sehr schwach (wenig)

### 1.6.12 Chemische Untersuchungsmethoden

Die feldfrischen Bodenproben wurden bis zur Untersuchung kühl gelagert und dann so schnell als möglich verarbeitet, wobei als erstes die Gleichgewichtsbodenlösung gewonnen wurde.

#### 1.6.121 Gewinnung der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) nach ULRICH

Ca. 500 g frischer Boden wird mit 75 bis 200 ml destilliertem Wasser (bis zu breiartiger Konsistenz) versetzt. Danach wird gut gemischt und 24 Stunden stehengelassen, um den Gleichgewichtszustand zu erreichen. Nach 24 Stunden wird die Gleichgewichtsbodenlösung durch Vakuum abgesaugt und bis zur weiteren Untersuchung eingefroren.

In der GBL wird die Konzentration der folgenden Ionen gemessen:  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Al^{+++}$ ,  $Fe^{++}$ , sowie die Anionen P, Cl und  $SO_4$ , ausgedrückt in mol/l.

Der pH-Wert wird mittels Glaselektrode gemessen, dann wird unter Berücksichtigung des Einflusses von Al-Ionen (ULRICH, 1966) die  $H^+$ -Ionenkonzentration berechnet. Die  $Na^+$ ,  $K^+$  und  $Ca^{++}$ -Konzentrationen werden flammenphotometrisch am Zeiss (PF 5) bestimmt.  $Mg^{++}$  wird durch Atomabsorption flammenphotometrisch am Zeiss-Spektral-Photometer PMQ II bestimmt. Aluminium wird als dreiwertiges Ion mit Aluminon, Eisen als zweiwertiges Ion mit  $\alpha, \alpha'$ -Dipyridyl, Mangan als zweiwertiges Ion, und Phosphor nach der Molybdän-blau-Methode von ZINZADSE kolorimetrisch bestimmt.

#### 1.6.122 Untersuchung des Austauschkomplexes

Nach der Gewinnung der GBL wurde an dem frischen Boden sofort die Bestimmung der austauschbaren Kationen ( $AK_e$ ) vorgenommen. Dazu werden 25 g Boden mit 100 ml 1 n  $NH_4Cl$  durchgewaschen. Im Perkolat werden die austauschbaren Kationen wie in der GBL bestimmt.

Die erhaltenen Werte werden in  $\mu\text{val/g}$  Boden umgerechnet und als Summe aller Kationen im Austauschkomplex effektive Austauschkapazität ( $AK_e$ ) genannt (ULRICH).

Außerdem wird der Gehalt eines Kations in  $\mu\text{val/g}$  Boden ausgedrückt und das Äquivalentprozent für jedes Kation berechnet. Unter Berücksichtigung der Bodentiefe und des Volumengewichts werden die Vorräte in  $\text{kval/ha}$  angegeben.

#### 1.6.23 Phosphatfraktionierung

Die Phosphatfraktionierung nach CHANG und JACKSON (1957) ermöglicht die stufenweise Zerlegung der Phosphatverbindungen in Al-Phosphate, Fe-Phosphate, Ca-Phosphate und okkludierte Phosphate. Die organisch gebundenen Phosphate wurden als Differenz zwischen Gesamtphosphat und der Summe der übrigen berechnet.

Die Gesamtphosphate wie auch jede Fraktion wird in  $\text{mg}/100 \text{ g}$  Boden angegeben. Auch werden die Vorräte in  $\text{k/ha}$  berechnet.

#### 1.6.124 Kohlenstoff- und Stickstoffbestimmungen

Kohlenstoff wird an dem Wösthoff'schen Gerät bestimmt und Stickstoff als Gesamt-N nach KJELDAHL. Beide Elemente werden in  $\%$  der Trockensubstanz angegeben, die Vorräte pro ha berechnet.

### 1.6.125 Bodenphysikalische Untersuchungen

Neben der Bestimmung der Bodenfarbe nach MUNSSELL wurden an den Stechzylinderproben die scheinbare Dichte sowie die Porenverteilung mit Hilfe einer pF-Apparatur nach RICHARDS durchgeführt. Die Wassergehalte wurden bestimmt bei pF-Werten von 0.7, 1.7, 2, 2.47, 3, 3.47, 4.2.

An einigen Bodenproben wurde die Durchlässigkeit im gesättigten und im ungesättigten Zustand gemessen (nach HARTGE).

Aus den bodenphysikalischen Untersuchungen wurde das verfügbare Wasser und die Luftkapazität, ausgedrückt in mm, bestimmt.

Der Wasserhaushalt ist definiert durch "verfügbares" Wasser. Das "verfügbare" Wasser ist die Wassermenge, die man in Bodenproben bei pF 2.5 bis pF 4.2 ausrechnet. Diese Werte nennen SCHLICHTING und BLUME (1966, S. 168) verfügbare Wasserkapazität, man kann sie in mm für die Bodenzone angeben.

#### Der Lufthaushalt:

Für die Luftversorgung auf längere Sicht wird der Lufthaushalt durch das "ökologisch entscheidende minimale Luftvolumen", die Luftkapazität (LK) (nach SCHLICHTING und BLUME, 1966) bestimmt, die sich aus der Gleichung

$$LK = GPV - WV = GPV - pF 2.0$$

errechnen läßt, d.h. Luftkapazität (LK) ist gleich Gesamtporenvolumen (GPV) minus Wassergehalt bei pF 2.0.

Die Definition dieser zwei Größen war außerordentlich schwierig wegen der Angehörigkeit der Standorte zu zwei Bodengruppen: grundwasserbeeinflusste und grundwasserfreie Standorte. Die Ausarbeitung dieser Kenngröße bedarf besonderer Beachtung.

## 1.7 Aufstellung von Modellen

Ein Bodenprofil ist kein homogenes Gebilde, zur Aufstellung von Modellen muß es also untergliedert werden.

### 1.7.1 Gliederung des Bodenprofils

Die Tiefe des Bodenprofils und sein Aufbau aus genetischen Horizonten spielen eine außergewöhnlich große Rolle im Austausch der Energie und Materie (SCNN, 1965) wie auch zwischen den Elementen des Systems "Boden" und anderen Systemen.

Soll das System das ganze Bodenprofil umfassen, so muß es in Zonen oder Schichten untergliedert werden, die verschiedene Funktionen im System haben können. In unserem Fall haben wir das Bodenprofil in drei Zonen aufgeteilt, die bei den einzelnen Böden ganz verschiedene Mächtigkeit haben können. Die Aufstellung erfolgte nach folgenden Kriterien:

Die I. Zone ist der obere Teil des Bodenprofils, in dem Akkumulation der organischen Substanz und Humusanreicherung stattfinden, oder in welchem eine Bodenbearbeitung erfolgt, die eine Veränderung der Bodeneigenschaften verursacht.

Die II. Zone schließt an die I. an. Sie ist vollständig durchwurzelt und bildet zusammen mit der Zone I den Hauptspeicher und Lieferant für Nährstoffe und Wasser.

Darunter schließt sich die III. Zone an, die bei der Versorgung der Bäume kaum eine Rolle spielt.

Um aus der Fülle der Faktoren, die in dem Gesamtsystem wirksam sind, nach den oben beschriebenen Methoden die relevanten Faktoren herauszuarbeiten, werden folgende Kombinationen von

Variablen (Boden- und Standortseigenschaften) für den jeweiligen Standort bzw. für die einzelne Bodenzone zusammengestellt und untersucht:

Daten, die das Klima und die geographische Lage erfassen:

- $x_1$  - m Höhe über N.N.
- $x_2$  - °C Jahresmitteltemperatur
- $x_3$  - °C Temperaturmittel der Vegetationszeit (V.-VIII. Monat)
- $x_4$  - mm Jahresniederschlagssumme
- $x_5$  - mm Niederschlagssumme der Vegetationszeit (V.-VIII. Monat)
- $x_6$  - Dauer der Vegetationszeit in Tagen

Diese Daten werden zusammen mit folgenden den Boden charakterisierenden Daten verarbeitet, wobei jede Kombination einen gesonderten Rechengang erfordert:

### 1.7.2 Austauschkomplex

Hier betrachten wir Datenkombinationen, die den Austauschkomplex charakterisieren. Dabei werden die Kationen auf verschiedene Weise ausgedrückt: Als Gehalte, als Vorräte und als Äquivalentprozent. Jeder dieser Datenkomplexe wird sowohl für das Gesamtprofil als auch für die einzelnen Bodenzone verarbeitet.

#### 1.7.2.11 Gehalte pro Bodenzone

Jede einzelne Variable wird durch ein indiziertes  $x$  vertreten.

- $x_7, x_8$  und  $x_9$  - C-Gehalt in % pro Zone I, II und III
- $x_{10}, x_{11}$  und  $x_{12}$  - N-Gehalt in % pro Zone
- $x_{13}, x_{14}$  und  $x_{15}$  -  $P_{total}$ -Gehalt in mg/100 g Boden pro Zone
- $x_{16}, x_{17}$  und  $x_{18}$  -  $P_{Al}$ -Gehalt in mg/100 g Boden pro Zone

$x_{19}$ , $x_{20}$ und $x_{21}$	- $P_{Fe}$ -Gehalt in mg/100 g Boden pro Zone
$x_{22}$ , $x_{23}$ und $x_{24}$	- $P_{Ca}$ -Gehalt in mg/100 g Boden pro Zone
$x_{25}$ , $x_{26}$ und $x_{27}$	- $P_{okkl}$ -Gehalt in mg/100 g Boden pro Zone
$x_{28}$ , $x_{29}$ und $x_{30}$	- $P_{org}$ -Gehalt in mg/100 g Boden pro Zone
$x_{31}$ , $x_{32}$ und $x_{33}$	- $H^+$ -Gehalt in $\mu\text{val/g}$ Boden pro Zone
$x_{34}$ , $x_{35}$ und $x_{36}$	- $Na^+$ -Gehalt in $\mu\text{val/g}$ Boden pro Zone
$x_{37}$ , $x_{38}$ und $x_{39}$	- $K^+$ -Gehalt in $\mu\text{val/g}$ Boden pro Zone
$x_{40}$ , $x_{41}$ und $x_{42}$	- $Ca^{++}$ -Gehalt in $\mu\text{val/g}$ Boden pro Zone
$x_{43}$ , $x_{44}$ und $x_{45}$	- $Mg^{++}$ -Gehalt in $\mu\text{val/g}$ Boden pro Zone
$x_{46}$ , $x_{47}$ und $x_{48}$	- $Al^{+++}$ -Gehalt in $\mu\text{val/g}$ Boden pro Zone
$x_{49}$ , $x_{50}$ und $x_{51}$	- $Fe^{++}$ -Gehalt in $\mu\text{val/g}$ Boden pro Zone
$x_{52}$ , $x_{53}$ und $x_{54}$	- $Mn^{++}$ -Gehalt in $\mu\text{val/g}$ Boden pro Zone
$x_{55}$ , $x_{56}$ und $x_{57}$	- verfügbares Wasser in mm pro Zone
$x_{58}$ , $x_{59}$ und $x_{60}$	- Luftkapazität in mm pro Zone
$x_{61}$	- Zuwachs der Sorte 3 oder 5

#### 1.7.2.12 Gehalte pro Gesamtprofil

Diese Datenkombination enthält dieselben Größen wie im vorigen Kapitel, jedoch für das ganze Profil zusammengefaßt. Die Werte wurden als gewogenes Mittel genommen, d.h. die Bodentiefe ist berücksichtigt worden.

$x_7$	- % C	$x_{17}$	- $K^+$ Gehalt $\mu\text{val/g}$ Boden
$x_8$	- % N	$x_{18}$	- $Ca^{++}$ Gehalt $\mu\text{val/g}$ Boden
$x_9$	- $P_t$ mg/100 g Boden	$x_{19}$	- $Mg^{++}$ Gehalt $\mu\text{val/g}$ Boden
$x_{10}$	- $P_{Al}$ mg/100 g Boden	$x_{20}$	- $Al^{+++}$ Gehalt $\mu\text{val/g}$ Boden
$x_{11}$	- $P_{Fe}$ mg/100 g Boden	$x_{21}$	- $Fe^{++}$ Gehalt $\mu\text{val/g}$ Boden
$x_{12}$	- $P_{Ca}$ mg/100 g Boden	$x_{22}$	- $Mn^{++}$ Gehalt $\mu\text{val/g}$ Boden
$x_{13}$	- $P_{okkl}$ mg/100 g Boden	$x_{23}$	- verfügbares Wasser in mm
$x_{14}$	- $P_{org}$ mg/100 g Boden	$x_{24}$	- Luftkapazität in mm
$x_{15}$	- $H^+$ Gehalt $\mu\text{val/g}$ Boden	$x_{25}$	- Zuwachs der Sorte 3 oder 5
$x_{16}$	- $Na^+$ Gehalt $\mu\text{val/g}$ Boden		

#### 1.7.2.21 Vorräte pro Bodenzone

Hier sind die Ionen am Austauscher als Vorräte angegeben. Die Art und Reihenfolge der Variablen entspricht der des Kapitels 1.7.2.11, nur werden N, C,  $P_t$ ,  $P_{Al}$ ,  $P_{Ca}$ ,  $P_{okkl}$  und  $P_{org}$  in kg/ha pro Bodenzone angegeben, die Kationen H, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe und Mn in kval/ha. Der Wasser- und Lufthaushalt wird durch dieselben Größen charakterisiert.

#### 1.7.2.22 Vorräte pro Gesamtprofil

Auch hier sind die Kombinationen dieselben wie in Kapitel 1.7.2.12, nur werden die Daten wie im vorigen Kapitel in kg/ha oder in kval/ha angegeben.

#### 1.7.2.31 Äquivalentprozent innerhalb der Bodenzone

Diese Kombination enthält die Äquivalentprozent  $X_M^S \cdot 100$  der Kationen und der P-Fraktionierung. C und N werden als Vorräte angegeben, verfügbares Wasser und Luftkapazität behalten dieselben Werte wie bei den vorigen Kombinationen.

#### 1.7.2.32 Äquivalentprozent innerhalb des Gesamtprofils

Hier sind die Werte des vorigen Kapitels für das Gesamtprofil zusammengefaßt.

### 1.7.3 Gleichgewichtsbodenlösung

Hier werden die aus der GBL gewonnenen Meßwerte ausgedrückt als Konzentrationen, Potentiale (negative Logarithmen der Aktivitäten), Äquivalentprozent und Schofield'sche Potentiale. Die Klimadaten bleiben dieselben wie in den vorigen Kapiteln.

### 1.7.3.11 Konzentrationen in der Bodenlösung jeder Bodenzone

$x_7, x_8, x_9$	- $H^+$ pro Zone I, II und III in mmol/l
$x_{10}, x_{11}, x_{12}$	- $Na^+$ pro Zone I, II und III in mmol/l
$x_{13}, x_{14}, x_{15}$	- $K^+$ pro Zone I, II und III in mmol/l
$x_{16}, x_{17}, x_{18}$	- $Ca^{++}$ pro Zone I, II und III in mmol/l
$x_{19}, x_{20}, x_{21}$	- $Mg^{++}$ pro Zone I, II und III in mmol/l
$x_{22}, x_{23}, x_{24}$	- $Al^{+++}$ pro Zone I, II und III in mmol/l
$x_{25}, x_{26}, x_{27}$	- $Fe^{++}$ pro Zone I, II und III in mmol/l

Die folgenden Werte stammen nicht aus der GBL sondern aus der Festphase:

$x_{28}, x_{29}, x_{30}$	- $P_{Al}$ in mg/100 g Boden pro Zone I, II, III
$x_{31}, x_{32}, x_{33}$	- $P_{Fe}$ in mg/100 g Boden pro Zone I, II, III
$x_{34}, x_{35}, x_{36}$	- $P_{Ca}$ in mg/100 g Boden pro Zone I, II, III
$x_{37}, x_{38}, x_{39}$	- $P_{okkl}$ in mg/100 g Boden pro Zone I, II, III
$x_{40}, x_{41}, x_{42}$	- $P_{org}$ in mg/100 g Boden pro Zone I, II, III
$x_{43}, x_{44}, x_{45}$	- $C_t$ - kg/ha pro Zone I, II, III
$x_{46}, x_{47}, x_{48}$	- $N_t$ - kg/ha pro Zone I, II, III
$x_{49}, x_{50}, x_{51}$	- verfügbares Wasser in mm pro Zone I, II, III
$x_{52}, x_{53}, x_{54}$	- Luftkapazität in m/m pro Zone I, II, III
$x_{55}$	- durchschnittlicher jährlicher Zuwachs für Sorte 3 oder 5

### 1.7.3.12 Konzentrationen in der Bodenlösung im gesamten Bodenprofil

Hier sind die Daten des vorigen Kapitels für das gesamte Profil zusammengefaßt.

1.7.3.21 Äquivalentprozent in der Bodenlösung  
jeder Bodenzone

Dieser Datenkomplex entspricht dem in Kapitel 1.7.2.31, hier jedoch für die Konzentrationen in der GBL. Vom vorigen Kapitel unterscheiden sie sich nur in den Variablen, die die Kationen repräsentieren.

1.7.3.22 Äquivalentprozent im Gesamtprofil

Die Daten des vorigen Kapitels sind für das gesamte Profil zusammengefaßt.

1.7.3.31 Potentiale jeder Bodenzone

Statt der Konzentrationen oder der Äquivalentprozent der Kationen sind hier die Potentiale angegeben. Alle anderen Variablen bleiben gleich.

1.7.3.32 Potentiale des gesamten Profils

Die Werte des vorigen Kapitels sind für das gesamte Profil zusammengefaßt.

1.7.3.41 Schofield'sche Potentiale  $pH - 1/zpM$   
jeder Bodenzone

Hier werden anstatt der Potentiale die Schofield'schen Potentiale zur Auswertung verwendet.

1.7.3.42 Schofield'sche Potentiale  $pH - 1/zpM$  des Gesamtprofils

Hier sind die Daten wieder für das gesamte Profil zusammengefaßt.

## 2.0 Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

Je nach statistischem Verfahren können verschiedene Parameter zur Auswertung herangezogen werden. Bei uns sind dies die Mittelwerte, die Standardabweichungen und die Korrelationskoeffizienten. Mit Hilfe der Faktorenanalyse errechnen wir neue Parameter: Eigenwerte, Eigenfaktoren, Communalitäten, Faktorenwerte. Jeder der genannten Parameter hat eine gewisse Aussagekraft und kann interpretiert werden. In dieser Arbeit wird das Gewicht ganz auf die Darstellung und Diskussion der einfachen Korrelationskoeffizienten und der faktorenanalytischen Parameter gelegt.

### 2.1 Einfache Korrelationskoeffizienten

Die einfachen Korrelationskoeffizienten sind in Tabellen als Korrelationsmatrizen dargestellt. Die Signifikanz wird gekennzeichnet mit  $+++$  = sehr hoch signifikant,  $++$  = hoch signifikant,  $+$  = signifikant. (Kleinste signifikante Korrelationskoeffizienten für 17 Freiheitsgrade:  $0,45^+$ ;  $0,57^{++}$ ;  $0,69^{+++}$ )

#### 2.1.1 Klimadaten

Das Klima kann als ein System für sich betrachtet werden, wobei die einzelnen Daten untereinander stark korreliert sind: Die Niederschläge sind von der Höhenlage der Fläche abhängig. Sie sind eng korreliert mit dem Jahrestemperaturmittel sowie mit der Mitteltemperatur in den Monaten V bis VIII, d.h. mit der Temperatur während der Vegetationszeit. Temperatur und Niederschläge beeinflussen sich auch gegenseitig. Die Dauer der Vegetationszeit ist weniger stark abhängig von der Menge der Niederschläge als von den Temperaturen.

Die Klimadaten sind in allen Korrelationsmatrizen enthalten.

Die Korrelation der klimatischen Komponenten mit den verschiedenen Bodeneigenschaften ist sehr unterschiedlich eng. In einigen Fällen gibt es signifikante Korrelationen. Beispielsweise ist die Höhe der Fläche über N.N. signifikant oder hoch signifikant korreliert mit dem Gesamt-Phosphor (angegeben in mg/100 g Boden) in der zweiten und dritten Bodenzone, ebenso mit den okkludierten Phosphaten, den an Eisen gebundenen und den organisch gebundenen Phosphaten. Diese Korrelationen spiegeln keine allgemeinen Gesetzmäßigkeiten wider. Sie sind zwar bedingt durch die Zusammensetzung des Bodenkollektivs, aber das Bodenkollektiv repräsentiert nicht die höhenzonale Verteilung von Bodenformen im Untersuchungsgebiet.

#### 2.1.2 Die Korrelationsmatrizen verschiedener Datenkombinationen

Während die Korrelationen zwischen Bodenmerkmalen und Klimamerkmalen nicht als repräsentativ und aussagekräftig betrachtet werden können, entsprechen die Korrelationen zwischen Bodenmerkmalen vielfach bekannten Zusammenhängen. Diese seien im Folgenden schematisch zusammengefaßt.

1. Tiefenfunktionen (t): Viele Bodenmerkmale zeigen ausgeprägte Tiefenfunktionen, die im wesentlichen durch den im Oberboden vorherrschenden Einfluß von Biosphäre und Atmosphäre und dem im Unterboden vorherrschenden Gesteins-einfluß bedingt sind. So kann der Oberboden durch biogene Akkumulation angereichert oder durch hydrogene Verlagerung verarmt sein. Andererseits gibt es materialspezifische Bodenmerkmale, die bei substrateinheitlichem Profilaufbau zu Korrelationen zwischen den verschiedenen Bodenzonen Veranlassung geben ("systematische Zusammenhänge").

2. Korngrößenzusammensetzung (k): Die Korngrößenzusammensetzung des Bodens ist eine wesentliche, wenn auch nicht die einzige Determinante sowohl für Nährstoffgehalte bzw. -vorräte wie auch für den Wasser- und Lufthaushalt. Abhängigkeiten von der Korngrößenzusammensetzung können daher zu indirekten Korrelationen verschiedener Bodenmerkmale innerhalb einer Bodenzone führen.
3. Biologische Regulationsmechanismen (b) sind insbesondere für Elemente, die zu erheblichen Anteilen in organischer Bindung vorliegen (C, N, P) von Bedeutung. Die Korrelationen innerhalb derselben Bodenzone sind hier häufig so eng, daß sich der Gebrauch von Verhältniszahlen zur Charakterisierung der Relation (z.B. C/N-, C/P-Verhältnis) in der Bodenkunde seit langem eingebürgert hat.
4. Der Aziditätszustand des Bodens (c), für den der pH-Wert der bekannteste Indikator ist, wirkt sich insbesondere auf die austauschbaren Kationen, die Phosphatformen und alle Merkmale der Gleichgewichts-Bodenlösung aus. In carbonathaltigen oder annähernd neutralen Böden wird die Bodendynamik durch Ca bestimmt (Ca- oder Bicarbonatdynamik), in stärker sauren Böden durch Al (Al-Dynamik). Die in Abhängigkeit von der Versauerung unterschiedliche Bodendynamik wirkt sich auf die meisten chemischen Bodenmerkmale aus und führt damit zu direkten wie indirekten Zusammenhängen verschiedener Kenndaten.
5. Neben den genannten sind zahlreiche weitere Kausalketten von Ursache und Wirkung (u) möglich, auf die im einzelnen nicht eingegangen sei. Als Beispiel für solche Kausalketten sei der Zusammenhang zwischen C-Gehalt und Wasserhaushalt erwähnt: Humusstoffe besitzen eine hohe spezifische Wasserbindung, so daß mit Zunahme des Humusgehalts leichter Böden die Wasserkapazität steigt, während auf schwereren Böden über die Beeinflussung des Gefüges der Anteil pflanzenverfügbaren Wassers erhöht wird.

6. Indirekte Kopplung (i): Am vorgenannten Beispiel können weitere indirekte Kopplungen demonstriert werden. Wenn eine direkte Kopplung zwischen C und N aufgrund biologischer Regulationsmechanismen besteht, so ist damit auch die Möglichkeit einer indirekten Kopplung von N und Wasserhaushaltsgrößen über die Beziehung C - Wasserhaushalt gegeben.
  
7. Rechnerische Abhängigkeiten (r): Korrelationen innerhalb der Bodenzonen sind schließlich auch möglich aufgrund rechnerischer Beziehungen. So bestehen in der Regel Beziehungen zwischen dem P-Gehalt und dem Gehalt der abhängig vom Aziditätszustand vorherrschenden Phosphatform. Rechnerische Abhängigkeiten sind ferner zu erwarten bei Datenkombinationen, die als Anteile einen gemeinsamen Nenner haben, also z.B. bei den Äquivalentprozenten in der festen Phase bzw. in der GBL.

Diese Untergliederung der möglichen Beziehungen zwischen den Bodenmerkmalen zeigt naturgemäß Überschneidungen und ist nicht als vollständig zu betrachten. Da die Beziehungen nicht im einzelnen diskutiert werden können, wird die Art der Beziehung in den Korrelationsmatrizen durch die oben aufgeführten Kleinbuchstaben angegeben. Soweit eine Zuordnung der Korrelationen zu einer der oben angegebenen Gruppen nicht möglich war (fehlender Kleinbuchstabe), handelt es sich wahrscheinlich größtenteils um Beziehungen, die auf der nicht repräsentativen Zusammensetzung des Bodenkollektivs beruhen.

In Tab. 4 sind die Korrelationsmatrizen für die Datenkombinationen entsprechend der Kapitel 1.7.2.11 und 1.7.2.12 wiedergegeben. Einige Besonderheiten in diesen Darstellungen sollen im Folgenden hervorgehoben werden:

Die Kohlenstoffgehalte verschiedener Zonen sind nur z.T. untereinander abhängig, d.h. der Humusgehalt in der Oberzone bestimmt nur z.T. den Kohlenstoffgehalt in den unteren Zonen. Weiterhin korreliert der Kohlenstoffgehalt mit

- dem N-Gehalt in allen Zonen,
- dem Gesamt-P-Gehalt (in den oberen beiden Zonen),
- dem verfügbaren Wasser (in den oberen beiden Zonen).

Der Kohlenstoffgehalt zeigt daneben noch sporadische Zusammenhänge mit anderen Bodeneigenschaften, die nicht mehr interpretiert werden können.<sup>+) )</sup>

Der Stickstoffgehalt ist korreliert mit

- dem C-Gehalt in allen drei Zonen (s.o.),
- dem Gesamt-P-Gehalt in allen Zonen,
- dem Gehalt an organisch gebundenem P in allen Zonen,
- zum Teil mit dem verfügbaren Wasser,
- zum Teil mit dem Al-gebundenen Phosphor.

Der Gesamt-Phosphorgehalt korreliert mit den anderen Phosphat-Fractionen mit Ausnahme des Al-gebundenen Phosphats. Außerdem bestehen Zusammenhänge mit Kationengehalten, wie K-, Ca- und Mg-Gehalt.

Der Gehalt an Al-gebundenen Phosphaten zeigt neben einer Korrelation der Zonen untereinander eine teilweise Korrelation mit Ca-gebundenen Phosphaten und mit dem Kaliumgehalt in allen drei Zonen.

---

<sup>+) )</sup> Unter dem Begriff "sporadischer Zusammenhang" soll hier verstanden werden ein Zusammenhang zwischen einer Eigenschaft in einer Bodenzone mit anderen Eigenschaften in einer oder mehreren anderen Bodenzone(n). Dagegen sei unter "systematischem Zusammenhang" eine signifikante Korrelation zwischen zwei Eigenschaften im gesamten Profil (in allen drei Zonen) verstanden.

Der Gehalt an Fe-gebundenen Phosphaten zeigt neben Korrelationen der Zonen untereinander Zusammenhänge mit den organisch gebundenen und den okkludierten Phosphaten sowie mit dem Magnesiumgehalt in der 2. und 3. Zone.

Die Gehalte an Calcium-Phosphaten korrelieren in den einzelnen Zonen hoch signifikant, wie auch mit den Na-, K- und Ca-Gehalten.

Die okkludierten Phosphate sind hoch signifikant korreliert mit den organisch gebundenen Phosphaten sowie mit den K- und Mg-Gehalten.

Die Gehalte an organisch gebundenem Phosphor zeigen neben der Korrelation der Zonen untereinander außer den bereits erwähnten keine systematischen Zusammenhänge mit anderen Bodeneigenschaften.

Die Kationenbelegung, ausgedrückt als Gehalte in  $\mu\text{val/g}$  Boden, zeigen folgende Korrelationen:

- $\text{H}^+$  - zeigt keine systematischen Zusammenhänge mit anderen Bodeneigenschaften
- $\text{Na}^+$  - korreliert mit  $\text{k}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  und  $\text{Mg}^{++}$
- $\text{K}^+$  - korreliert mit  $\text{Ca}^{++}$  und  $\text{Mg}^{++}$
- $\text{Ca}^{++}$  -  $\text{Mg}^{++}$  -  $\text{Al}^{+++}$ ,  $\text{Fe}^{++}$  und  $\text{Mn}^{++}$  zeigen, neben den schon genannten systematischen Zusammenhängen, keine weiteren mit anderen Bodeneigenschaften.

Das verfügbare Wasser zeigt neben den bereits genannten systematischen Zusammenhängen mit dem C-Gehalt und dem N-Gehalt keine weiteren Zusammenhänge.

Die Luftkapazität ist mit keinem Gehalt systematisch korreliert.

Die in Tab. 4 (s. Anhang) dargestellte Korrelationsmatrix zeigt, daß sich für das Gesamtprofil andere Korrelationen ergeben als bei zonenweiser Untersuchung. Im einzelnen sind die Unterschiede den Tabellen zu entnehmen.

Die Tab. 5 (s. Anhang) enthält die Korrelationsmatrizen für die Datenkombinationen entsprechend den Kapiteln 1.7.2.21 und 1.7.2.22. Auch hier sollen einige Besonderheiten herausgegriffen werden:

Ganz allgemein sind die Vorräte innerhalb der einzelnen Bodenzonen untereinander korreliert. Außerdem ist der C-Vorrat signifikant korreliert mit dem N-Vorrat und dem verfügbaren Wasser.

Der N-Vorrat ist korreliert mit dem Gesamt-P, dem organisch gebundenen Phosphat sowie mit der verfügbaren Wasserkapazität, der Vorrat an Gesamt-P mit den Vorräten an Fe-, Ca- und organisch gebundenen Phosphaten sowie mit den okkludierten Phosphaten und den K- und N-Vorräten.

Der Vorrat an Al-Phosphaten ist mit den Ca-Phosphaten und den K-Vorräten korreliert, der Vorrat an Fe-Phosphaten, neben den schon genannten, mit den Vorräten der organisch gebundenen sowie der okkludierten Phosphate und den K- und Mg-Vorräten.

Die Vorräte an Ca-Phosphaten korrelieren neben den schon genannten mit den Ca- und K-Vorräten.

Die Vorräte an okkludiertem Phosphat weisen neben den genannten nur noch Korrelation mit organisch gebundenen Phosphaten auf.

Vorräte an organisch gebundenen Phosphaten korrelieren mit den Vorräten an okkludierten Phosphaten, Fe-Phosphaten, Gesamt-Phosphat und Gesamt-Stickstoff.

Die Kationenvorräte verhalten sich ähnlich wie die Gehalte:

Die H-Vorräte stehen im Zusammenhang mit den Al-Vorräten, die Na-Vorräte korrelieren mit den K-, Ca-, Mg-Vorräten und mit dem verfügbaren Wasser.

Die K-Vorräte weisen neben den schon erwähnten Korrelationen mit Ca-, Mg-Vorräten und mit verfügbarem Wasser auf.

Die Vorräte an Ca, Mg, Al, Fe, Mn sowie verfügbarem Wasser und Luftkapazität weisen außer den genannten keine systematischen Korrelationen auf.

Tab. 6 (s. Anhang) enthält die Korrelationsmatrizen der Datenkombinationen entsprechend Kapitel 1.7.2.31 und 1.7.2.32. Im Vergleich zu den vorhergegebenen Datenkombinationen ist hier bemerkenswert, daß die Korrelationen viel enger sind. Die Ursache ist darin zu sehen, daß sämtliche Daten auf eine einheitliche Basis bezogen sind.

Wie bei den vorigen Matrizen bestehen Zusammenhänge auch hier zwischen den einzelnen Bodenzonen und zwischen sämtlichen Ionen untereinander. Die Korrelationen sind jetzt aber hoch signifikant bis sehr hoch signifikant. Ausnahmen davon bilden  $H^+$  und  $Mg^{++}$ , die keine systematische Korrelation zeigen.

Der Ca-Phosphatanteil ist systematisch korreliert mit den Fe-Phosphatanteilen und den Anteilen an organisch gebundenem Phosphor.

Die Luftkapazität ist korreliert mit dem Äquivalentprozent von Na, K, Al, Fe und Mn, sowie teilweise mit den Anteilen an Al-Phosphaten.

An Tab. 6 (Daten für das Gesamtprofil) ist bemerkenswert, daß das Mg-Äquivalentprozent sehr selten mit anderen Kationen korreliert ist und daß die Kohlenstoff-Stickstoffvorräte in keinem Zusammenhang mit den Äquivalentprozenten stehen. Dagegen ist die Luftkapazität sehr eng korreliert mit den Äquivalentprozenten, besonders mit Al, Fe und Mn.

In Tab. 7 sind die Korrelationsmatrizen für die Datenkombinationen entsprechend Kapitel 1.7.3.11 und 1.7.3.12 angegeben. Charakteristisch für diese Daten ist, daß systematische Korrelationen sehr selten vorhanden sind. Natrium korreliert mit K und Al, Al mit der Luftkapazität. Eine nicht systematische Korrelation besteht zwischen der Luftkapazität und den Konzentrationen verschiedener Ionen.

Die in Tab. 8 (s. Anhang) wiedergegebenen Korrelationen wurden für die Datenkombinationen der Kapitel 1.7.3.21 und 1.7.3.22 errechnet. Gegenüber Tab. 7 hat sich das Bild nicht wesentlich geändert, die Korrelationskoeffizienten sind lediglich etwas erhöht. Diese Erhöhung wurde noch ausgeprägter schon bei den Daten für die Festphase beim Übergang von Absolutgrößen zu Relativgrößen beobachtet.

In Tab. 9 (s. Anhang) sind die Korrelationsmatrizen für die Potentiale  $pM$  (Kap. 1.7.3.31 und 1.7.3.32) dargestellt. Zwischen den verschiedenen Variablen sind keine ausgeprägten systematischen Korrelationen vorhanden.

Schließlich folgen in Tab. 10 (s. Anhang) die Korrelationen für die Schofield'schen Potentiale (Kap. 1.7.3.41 und 1.7.3.42).

Zwischen allen Potentialen bestehen sehr hoch signifikante systematische Korrelationen. Auch sind fast alle Schofield'schen Potentiale sehr hoch signifikant korreliert mit den Ca-Phosphaten.

Dieselben engen Korrelationen ergeben sich auch, wenn die Werte für das Gesamtprofil zur Berechnung herangezogen werden.

Aus der Darstellung der Korrelationsmatrizen von verschiedenen Datenkombinationen geht hervor, daß zwischen den einzelnen Merkmalen unseres Untersuchungssystems bzw. des Bodenkollektivs unterschiedliche Abhängigkeiten bestehen, die im einzelnen zu erörtern nicht Aufgabe dieser Arbeit ist. Im Folgenden sei dagegen auf die Zusammenhänge zwischen Zuwachs und Standortmerkmalen eingegangen.

### 2.1.3 Der Zusammenhang zwischen Zuwachs und verschiedenen Standortmerkmalen

Die Korrelationen zum Zuwachs wurden nur bei zwei von 16 Sorten geprüft, und zwar bei den Klonen 3 (Eckhof) und 5 (Flachslanden). Diese zwei Sorten spiegeln die standörtlichen Verhältnisse am deutlichsten wider.

Von den Klimadaten korrelieren signifikant mit dem Zuwachs die Jahresmitteltemperatur, die Mitteltemperatur der Vegetationszeit und die Dauer der Vegetationszeit. Diese drei Klimadaten korrelieren auch untereinander sehr eng und bringen daher dasselbe zum Ausdruck: Je höher im Untersuchungsgebiet die Jahresmitteltemperatur, desto länger ist die Vegetationszeit und desto höher deren Mitteltemperatur, desto höher ist auch der Zuwachs. Da die untersuchten Flächen eine erhebliche Variationsbreite in diesen Daten aufweisen, ist es nicht

verwunderlich, daß der Klimaeinfluß auf den Zuwachs dominiert und die bodenkundlichen Merkmale nur vereinzelt mit dem Zuwachs signifikant korreliert sind.

So korrelieren die Gehalte für das ganze Bodenprofil überhaupt nicht signifikant mit dem Zuwachs. Für das gegliederte Profil korrelieren nur die K-Gehalte in der ersten und zweiten Bodenzone signifikant mit dem Zuwachs (0,48 + und 0,50 +). Ähnliches gilt für die Vorräte, wo nur die K- und Ca-Vorräte aus der ersten Bodenzone signifikant mit dem Zuwachs korrelieren. Ferner ergeben sich signifikante Beziehungen zwischen Zuwachs und Vorräten an Kohlenstoff und Stickstoff in der dritten Bodenzone, wobei diese Beziehungen auch in Kombination mit anderen Daten aushalten und C und N untereinander korreliert sind. Diese Korrelation ist nicht direkt deutbar, sie könnte auf die Bedeutung tiefreichender biologischer Prozesse im Boden hinweisen, die sich jedoch in den Daten über Nährstoff-, Wasser- und Luftversorgung im Boden nicht hinreichend auswirken, um direkte Korrelationen zu veranlassen.

Bei der Datenkombination Äquivalentprozente in der festen Phase ergeben sich negative Korrelationen zum Zuwachs bei den Fe-Phosphaten in der zweiten Bodenzone und dem organisch gebundenen P in der ersten Zone. Die letztere Korrelation ist nicht deutbar, die erstere ist indirekt: je saurer der Boden, desto höher ist der Anteil der Fe-Phosphate an Gesamt-P.

Von den Daten der Bodenlösung korrelieren signifikant mit dem Zuwachs in Kaliumkonzentration in der GBL, das Al-Potential (pAl 2) und eine Reihe der Schofield'schen Potentiale in der zweiten Bodenzone (pH - 0,5 pCa 0,46<sup>+</sup>, pH - 1/3 pAl 0,46<sup>+</sup>, pH - 1/2 pFe 0,49<sup>+</sup>). Die Korrelation mit der K-Konzentration bestätigt die aus den Korrelationen mit K-Gehalt und K-Vorrat

sich ergebende Aussage, während die Korrelationen zu  $pAl_2$  und den Schofield'schen Potentialen in der zweiten Zone inhaltlich mit dem aus der Korrelation zum Ca-Vorrat gezogenen Schluß übereinstimmen: Je höher diese Werte, desto geringer ist die Bodenversauerung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß sich aus den Korrelationsmatrizen nur wenige und wenig straffe Korrelationen zum Zuwachs ergeben. Zudem können diese Korrelationen, wie auch die Diskussion gezeigt hat, indirekter Natur sein, sie brauchen also keinen Kausalzusammenhang widerzuspiegeln. Die Beziehungen zwischen Zuwachs und Kaliumversorgung sowie Aziditätszustand sind jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit kausal, wobei dieser Schluß aus dem allgemeinen Kenntnisstand erfolgt. Im Folgenden sollen nunmehr die Ergebnisse der Faktorenanalyse besprochen werden, wobei aufgrund der geringen Korrelationen zum Zuwachs von vornherein keine eindeutigen Ergebnisse zu erwarten sind.

## 2.2 Ergebnisse der Faktorenanalyse

Zum besseren Verständnis sollen einige Begriffe noch kurz erläutert werden. Die **Eigenwerte** sind die Längen der Hauptachsen des Ellipsoids (ÜBERLA, 1968). Aufgrund des Eigenwerts kann man berechnen, wieviel Prozent der Gesamtvarianz ein Faktor enthält. (Diese Werte sind nicht in Tabellen sondern im Text angegeben.) Die **Kommunalität** ( $h_i^2$ ) ist eine Maßzahl dafür, in welchem Grade die Variation des beobachteten Merkmals durch die aufgefundenen Faktoren erklärt wird (LIENERT, 1957). Sie wird berechnet als Summe der Quadrate der Ladungen aller Faktoren und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

Die Ergebnisse der Faktorenanalyse werden meist in Form einer Tabelle dargestellt. In der Tabelle sind die Ladungen der Variablen in den einzelnen Faktoren angegeben. Als Grenzwert für die "Erheblichkeit" wurde eine Ladung von  $\pm 0,30$  festgelegt (SCHILLE<sup>2</sup> et al., 1967), und nur diese sind in den Tabellen angegeben. Die Höhe der Ladung, die im Bereich von +1 bis -1 liegen kann, zeigt den Grad der "Verwandtschaft" zwischen den Variablen und den Faktoren an.

Während man bei der Korrelationsanalyse von der gegenseitigen Abhängigkeit zweier Variablen ausgeht, sind bei der Faktorenanalyse alle Variablen, die irgendetwas miteinander zu tun haben, in einem Faktor enthalten. Eine Variable kann in ganz verschiedenen Faktoren enthalten sein.

Die Ergebnisse der Faktorenanalyse sind anschaulich in den folgenden Tabellen dargestellt. Sie sollen daher nicht mehr im einzelnen besprochen werden. Vielmehr soll aus den Tabellen ein Gesichtspunkt herausgehoben werden, der uns besonders interessiert, nämlich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen dem Zuwachs und den übrigen Variablen.

#### 2.2.1 Faktorenanalyse für die Datenkombination "Gehalte pro Bodenzone"<sup>+) Tab. 11)</sup>

---

<sup>+) Diese Analyse sowie die Analyse für die Datenkombination "Vorräte pro Bodenzone" wurde nach dem Programm PAFA von P. SCHNELL und P. GEBHARDT, Deutsches Rechenzentrum Darmstadt, gerechnet. Alle anderen Analysen wurden nach dem Programm "Faktorenanalyse" von Dipl. Psychologe LEHMANN, Rechenzentrum der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät der Universität Göttingen gerechnet. Für die Überlassung der Programme sowie für die Hilfe bei der Planung und Durchführung der Analysen bin ich zu großem Dank verpflichtet.</sup>

Tab. 11: Faktorenanalyse für die Datenkombination "Gehalte pro Bodenzone"

Faktoren		→						$h_i^2$
Variable		1	2	3	4	5	6	
m Höhe ü. N.N.		-.79						.68
°C J.M.T.		.38	.84					.90
°C V-VIII M.T.			.92					.88
m/m J.N.			-.66			.39		.71
m/m V-VIII N.			-.64					.63
Tage V.Z.			.88					.87
%	C							
	1			-.91				.91
	2			-.62		.60		.79
	3				.42	.75		.94
	N							
	1			-.93				.93
	2			-.53	.39	.62		.93
	3				.43	.63		.92
mg/100 g B.P <sub>t</sub>								
	1	-.53		-.74	.41			.96
	2	-.38			.52			.90
	3	-.77						.90
	P <sub>Al</sub>							
	1	.32	-.51		.55			.77
	2		-.47		.68			.73
	3	-.53			.46	.32		.67
	P <sub>Fe</sub>							
	1		-.75				.37	.77
	2	-.56	-.41				.47	.71
	3	-.78						.78
	P <sub>Ca</sub>							
	1				.87			.84
	2				.88			.83
	3				.70			.62
	P <sub>okkl</sub>							
	1	-.60		-.71				.93
	2	-.90						.96
	3	-.86	-.35					.88
	P <sub>org</sub>							
	1	-.34	-.33	-.75			.33	.93
	2	-.75						.79
	3	-.87						.81
µval/g B. H								
	1					.91		.88
	2						-.37	.38
	3					.91		.86
	Na							
	1			-.78	.35			.80
	2				.68		.39	.66
	3	-.32	-.47		.50			.70
	K							
	1				.84			.83
	2				.79		.37	.86
	3	-.52			.57			.63
	Ca							
	1				.32			.90
	2		.35		.81			.84
	3				.78			.73
	Mg							
	1	-.46					.68	.81
	2	-.35					.80	.85
	3	-.63	-.41				.45	.79
	Al							
	1					.50	.56	.73
	2				-.39	.68		.69
	3			.35	-.37	.68		.76
	Fe							
	1	.32	.31	-.50			.46	.69
	2						.85	.84
	3							.20
	Mn							
	1		.42				.62	.65
	2	-.49			-.37		.68	.90
	3	.34	.49		.66			.85
verfügb. Wasser								
	1	.36		-.72				.76
	2				.53	.53		.78
	3							.22
Luftkapazität								
	1	.44					-.39	.49
	2			.36			-.63	.66
	3				-.42		-.31	.39
Zuwachs								
	1	.34	.39	.19	.42	.25	.09	.54

Die sechs extrahierten Faktoren erklären 76 % der gesamten Varianz. Diesen durch sämtliche Faktoren erklärbaren Anteil an der Gesamtvarianz nennen wir die "extrahierte Varianz". Der Zuwachs ist nur im 1., 2. und 4. Faktor enthalten. Diese drei Faktoren erklären zusammen 59 % der extrahierten Varianz.

Der erste Faktor (22 % extr.Var.) setzt sich folgendermaßen zusammen:

Mit positiven Ladungen: Jahresmitteltemperatur,  $P_{Al1}^{+}$ ,  $Fe_1$ ,  $Mn_3$ , verfügbares Wasser und Luftkapazität der ersten Bodenzone sowie Zuwachs.

Mit negativer Ladung: Die Höhe über N.N.,  $C_3$ ,  $N_3$ ,  $P_{Al3}$ ,  $P_{Fe2}$ ,  $P_{Fe3}$ ,  $Na_3$ ,  $K_3$  und  $Mn_2$ .

Der zweite Faktor (15 % extr.Var.) enthält

Variable mit positiver Ladung: Jahresmitteltemperatur, Temperaturmittel der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit,  $Ca_2$ ,  $Fe_1$ ,  $Mn_1$  und Zuwachs.

Negative Ladungen haben: Niederschlagssumme des Jahres und der Vegetationszeit,  $P_{Al1}$ ,  $P_{Al2}$ ,  $P_{Fe1}$ ,  $P_{Fe2}$ ,  $P_{okkl3}$ ,  $P_{org1}$ ,  $Na_3$ ,  $Mg_3$ .

Der vierte Faktor (22 % extr.Var.) enthält folgende Variable:

Mit positiver Ladung:  $C_3$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ , Gesamt-P in der 1. und 2. Bodenzone,  $P_{Al}$  und  $P_{Ca}$  aller drei Bodenzone,  $Na$ ,  $K$  und  $Ca$  aller drei Bodenzone,  $Mn_3$ , verfügbares Wasser der 2. Bodenzone und Zuwachs.

Mit negativen Ladungen:  $Al_2$ ,  $Al_3$ ,  $Mn$  und Luftkapazität der 3. Bodenzone.

Diese Ergebnisse sind folgendermaßen zu interpretieren: Der Zuwachs wird von den Variablen, die zusammen mit ihm in einem Faktor vereinigt sind, beeinflusst. Haben diese dasselbe Vorzeichen, so ist die Beeinflussung ~~positiv~~<sup>positiv</sup>. Es zeigt sich, daß die Ladungen für den Zuwachs recht gering sind, sie übersteigen nicht den Wert von 0.42 (beim 4. Faktor).

+) Die im Index vorkommenden Zahlen 1, 2, 3 entsprechen den drei verschiedenen Bodenzone.

Die Kommunalitäten sind im allgemeinen ziemlich hoch, d.h. die Variablen sind gut durch die 6 Faktoren erfaßt. Die Varianz des Zuwachses wird allerdings nur zu 54 % durch die 6 Faktoren erklärt.

2.2.2 Faktorenanalyse für die Datenkombination "Gehalte des gesamten Bodenprofils" (Tab. 12)

Faktoren	→				$h_i^2$
	1	2	3	4	
Variable	.29	.28	.19	.22	
m Höhe ü. N.N.		.76			.66
°C J.M.T.	-.84	-.39			.87
°C V-VIII M.T.	-.90				.87
m/m J.N.	.70			.38	.73
m/m V-VIII N.	.74				.64
Tage V.%. % C	-.88		.89		.85 .82
% N			.91		.87
P <sub>t</sub>		.78		-.48	.90
P <sub>Al</sub>				-.46	.55
P <sub>Fe</sub>	.39	.69	.53		.65
P <sub>Ca</sub>				-.85	.74
P <sub>okkl</sub>		.87			.87
P <sub>org</sub>		.76			.68
Na				.51	.36
Na		.33	.47	-.52	.61
K		.43		-.54	.63
Ca			.42	-.73	.85
Mg		.74			.56
Al				.73	.61
Fe	-.55			.36	.54
Mn	-.46				.31
verfügbares Wasser			.54		.37
Luftkapazität		-.55	-.32		.52
Zuwachs	-.44				.22

Durch 4 Faktoren sind hier 85 % der Varianz extrahiert worden, aber nur der 1. Faktor enthält als Variable den Zuwachs (Ladung 0.44). Dieser Faktor, der 29 % der extrahierten Varianz erklärt, setzt sich wie folgt zusammen:

Positive Ladungen: Niederschlagssumme im Jahr und in der Vegetationszeit und  $P_{Fe}$ .

Negative Ladung: Zuwachs, Temperaturmittel des Jahres und der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit, Ca, Fe und Mn.

Die Kommunalität für den Zuwachs ist bei dieser Datenkombination sehr klein (0.22), d.h. er wird durch diese Faktoren sehr schlecht erfaßt.

Nach den Faktoren zu schließen haben demnach - im Gegensatz zu den aus den Korrelationsmatrizen abgeleiteten Aussagen - eine ganze Reihe bodenkundlicher Merkmale Einfluß auf den Zuwachs. Dieses Bild mag jedoch täuschen, da einmal die Ladungen für den Zuwachs recht niedrig sind und zum andern die Festlegung der "Erheblichkeitsgrenze" auf  $\pm 0,30$  (SCHILLER et al. 1967) im Grunde genommen willkürlich ist. ÜBERLA (1968) betont, daß in dieser Frage bisher noch keine Einigkeit besteht; setzt man die Erheblichkeitsgrenze für die Ladungen höher an, z.B. auf  $\pm 0,4$  oder  $\pm 0,5$ , so würde in vielen Faktoren sowohl der Zuwachs wie auch zahlreiche bodenkundliche Merkmale als unerheblich entfallen. Dieser Hinweis zeigt, daß eine sichere Interpretation der faktorenanalytischen Ergebnisse wegen der in vielen Fällen niedrigen Ladungen nicht möglich ist.

Die niedrigen Kommunalitätswerte, die ein Maßstab für die Erfassung einer Variablen durch die angegebenen Faktoren sind, sprechen dagegen, die "Gehalte" als Informationsträger des Systems anzunehmen. Hierfür gibt es auch logische Gründe: Der Gehalt ist eine Konzentrationsmaß, und man könnte folgern,

daß erst die Multiplikation des Gehalts mit dem Feinbodengewicht pro Mächtigkeit der untersuchten Bodenzone, also die Berechnung der "Vorräte", zu Werten führt, die das Nährstoffangebot der verschiedenen Böden charakterisieren.

### 2.3.1 Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Vorräte pro Bodenzone" (Tab. 13)

Die den Gehalten eigentümlichen Schwächen versucht man durch Berechnung der Vorräte zu beseitigen, wobei die Feinerdemenge und die Tiefe Berücksichtigung finden. Bei dieser Datenkombination wurden 6 Faktoren extrahiert, die 77 % der Gesamtvarianz erhalten.

Von der extrahierten Varianz enthält der 1. Faktor 22 %, der 2. 23 %, der 3. 15 %, der 4. 14 %, der 5. 12 % und der 6. 14 %. Nur der 2. und der 6. Faktor enthalten den Zuwachs.

Der 2. Faktor hat außer der negativen Ladung von  $Al_3$  nur positive Ladungen:  $C_3$ ,  $N_2$ , Gesamt-P in der 1. und 2. Bodenzone,  $P_{Al}$  in allen drei Bodenzone,  $P_{okk11}$ ,  $Na_1$ ,  $Na_2$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $Ca_1$ ,  $Ca_2$ ,  $Mn_3$ , verfügbares Wasser der 2. Bodenzone und Zuwachs.

Der 6. Faktor enthält alle Klimadaten. Positive Ladungen haben die Variablen: Niederschlagssumme des Jahres in der Vegetationszeit,  $N_1$ ,  $P_{Al1}$ ,  $P_{Al3}$ ,  $P_{Fe1}$ ,  $P_{Fe2}$ ,  $P_{okk13}$ ,  $P_{org1}$  und Luftkapazität der 1. Bodenzone. Negativ geladene Variable sind: Temperaturmittel des Jahres und der Vegetationszeit,  $Ca_2$ ,  $Al_1$ ,  $Fe_1$ ,  $Fe_2$ ,  $Mn_1$  und Zuwachs.

Die Ladungen sind hier wie bei der vorigen Datenkombination recht niedrig und übersteigen für den Zuwachs nicht den Wert von 0.53. Ähnlich ist es mit den Kommunalitäten. Hier gehört der Zuwachs zu den Variablen, die die niedrigsten Werte erreichen (0.56).

Tab. 13: Faktorenanalyse für die Datenkombination "Vorräte" pro Bodenzonen

Faktoren								$h_i^2$
		1	2	3	4	5	6	$h_i^2$
Variable		.22	.23	.15	.14	.12	.14	
m Höhe ü. N.N.		.90						.91
°C J.M.T.							-.84	.84
°C V-VIII M.T.							-.87	.83
mm J.N.				-.58			.58	.80
mm V-VIII N.				-.49			.60	.71
Tage V.Z.							-.87	.81
kg/ha C	1	-.44				-.61		.67
	2							.83
	3		.31	-.83				.45
N	1			-.52				.72
	2	.34	.41	-.75		-.65	.38	.87
	3			-.49				.42
P <sub>t</sub>	1					-.52		.92
	2	.85	.76					.96
	3	.75	.46					.97
P <sub>Al</sub>	1		.84		.58			.88
	2		.86				.32	.85
	3		.69					.49
P <sub>Fe</sub>	1					-.34	.51	.72
	2	.80				-.32	.35	.85
	3	.83					.34	.82
P <sub>Ca</sub>	1		.93					.88
	2		.88					.91
	3							.84
P <sub>okkl</sub>	1	.36			.89			.78
	2	.95	.33			-.70		.95
	3	.85						.97
P <sub>org</sub>	1					-.84	.33	.82
	2	.84					.31	.75
	3	.88						.84
kval/ha H	1			-.94				.91
	2			-.70				.70
	3			-.93				.90
Na	1		.81					.76
	2		.76					.72
	3					.93		.96
K	1		.81					.77
	2	.56	.68					.87
	3	.34				.83		.88
Ca	1		.80			-.37		.89
	2		.80				-.35	.83
	3					.92		.93
Mg	1					-.66		.54
	2	.57				-.41		.65
	3	.45			.44	-.40		.63
Al	1			-.52			-.40	.52
	2			-.74	.52			.87
	3		-.32	-.34		.50		.53
Fe	1					-.44	-.52	.53
	2			.61			-.42	.72
	3				.88			.87
Mn	1					-.34	-.60	.52
	2	.74		-.33	.37			.90
	3		.75		.37			.82
verfügb. Wasserl	1	-.41				-.53		.59
	2		.60	-.61				.77
	3				.89			.92
Luftkapazität	1	-.66					.40	.63
	2	-.30				.76		.80
	3					.54		.48
Zuwachs		-.19	.41	-.22	-.12	-.04	-.53	.56

2.3.2 Die Faktorenanalyse für die Datenkombination

"Vorräte im gesamten Bodenprofil" (Tab. 14)

Faktoren	→				$h_i^2$
Variable	1	2	3	4	
	.29	.28	.20	.22	
m Höhe ü. N.N.	.95				.94
°C J.M.T.				.93	.96
°C V-VIII M.T.			-.33	.89	.94
mm J.N.	.31		.75	-.44	.87
mm V-VIII N.	.33		.67	-.46	.78
Tage V. Z.				.96	.97
t/ha C			.77		.61
kg/ha N <sup>t</sup>		.31	.74		.70
P P <sup>t</sup>	.82	.49			.93
P Al		.72		-.31	.63
P Fe	.72				.75
P Ca		.90			.84
P <sup>okkl</sup>	.96				.96
P <sup>org</sup>	.90				.82
kval/ha H			.71		.55
Na		.89			.83
K	.34	.84			.83
Ca		.88			.85
Mg	.59				.44
Al			.58		.41
Fe				.46	.26
Mn		.62			.53
mm verfügb. Wasser		.63	.58		.76
mm Luftkapazität	-.50				.38
Zuwachs				.52	.35

Durch 4 Faktoren wird 89 % der Gesamtvarianz erklärt. Nur der 4. Faktor (22 % extr.Var.) enthält die ZuwachsvARIABLE. Im einzelnen setzt sich dieser Faktor zusammen aus

positiv geladenen Variablen: Zuwachs, Temperaturmittel des Jahres und der Vegetationszeit und Fe-Vorrat,

negativ geladene Variablen: Niederschlagssumme des Jahres und der Vegetationszeit und P<sub>Al</sub>.

Die Ladungen sind als hoch zu bezeichnen, der Zuwachs erreicht allerdings nur den Wert von 0.52. Auch die Kommunalitäten sind wieder hoch, Ausnahmen bilden Al, Fe, Mn, die Luftkapazität und vor allem der Zuwachs (0.35).

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß bei C, N und P die Umrechnung der Gehalte in Vorräte keinen Informationsgewinn bringt, während die austauschbaren Kationen vermehrt in den Faktor mit der stärksten Ladung für den Zuwachs auftreten. Ob dies einen echten Informationsgewinn darstellt, läßt sich wegen der geringen Ladungen allerdings nicht mit Sicherheit sagen - unter dieser Schwäche leiden fast alle Aussagen der Faktorenanalyse.

Aus dem fehlenden Informationsgewinn bei C, N und P könnte gefolgert werden, daß bei diesen Elementen stärker auf diejenigen Teilvorräte abgehoben werden sollte, die sich am Nährstoffumsatz tatsächlich beteiligen.

#### 2.4.1 Die Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozente" pro Bodenzone" (Tab. 15)

Bei der Aufstellung dieses Modells wird davon ausgegangen, daß nicht die absoluten Ionenmengen in der Pflanzphase die entscheidende Rolle bei der Ernährung der Pflanze spielen, sondern die Verhältnisse der Einzelionen gegenüber der Gesamtmenge der Ionen. Für diese Hypothese gibt es gute Gründe, sie wird aber durch die Ergebnisse nicht bestätigt.

Vier Faktoren enthalten 78 % der Gesamtvarianz. 44 % der extrahierten Varianz werden durch den 1. Faktor erklärt, 25 % durch den 2., 14 % durch den 3. und 15 % durch den 4.

Tab. 15: Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozente" pro Bodenzone

Faktoren		→				$h_i^2$
Variable		1	2	3	4	$h_i^2$
		.44	.25	.14	.15	
m Höhe ü. N.N.		-.40	.49			.43
°C J.M.T.			-.51		.67	.80
°C V-VIII M.T.		-.38	-.39		.69	.78
mm J.N.			.44	.48	-.54	.73
mm V-VIII N.			.33	.42	-.60	.67
Tage V.Z.		-.35	.45		.67	.79
H	1			.77		.69
	2	.86				.77
	3			.77		.69
Na	1	.92				.87
	2	.94				.92
	3	.93				.91
K	1	.58		.38		.54
	2	.88				.85
	3	.78				.71
Ca	1	-.47	-.55			.58
	2	-.68	-.62			.88
	3	-.71	-.57			.84
Mg	1		.74			.70
	2		.76			.77
	3		.81			.83
Al	1	.73				.56
	2	.79			.42	.86
	3	.91				.89
Fe	1	.50			.49	.51
	2	.90			.31	.96
	3	.75				.64
Mn	1				.67	.58
	2	.73			.50	.88
	3	.93				.88
P <sub>Al</sub>	1	.75				.77
	2	.85				.83
	3	.77				.62
P <sub>Fe</sub>	1	.51		.34		.50
	2		.76			.71
	3		.72		.45	.75
P <sub>Ca</sub>	1		-.71			.57
	2	-.34	-.80			.81
	3	-.36	-.78			.80
P <sub>okkl</sub>	1	-.58				.40
	2	-.33	.69			.59
	3		.88			.84
P <sub>org</sub>	1		.60			.46
	2	.40	.31		.46	.57
	3	.53	.38			.47
C <sub>t</sub>	1				-.50	.27
	2			.70		.67
	3			.81		.71
N <sub>t</sub>	1				-.59	.48
	2			.76		.65
	3			.80		.67
verfügbar. Wasser	1				-.42	.22
	2			.61	-.36	.60
	3			.40		.26
Luftkapazität	1	.70				.53
	2	.75				.64
	3	.61				.57
Zuwachs			-.52	.33	.41	.41

Der 1. Faktor enthält zwar sämtliche Kationen und die Phosphatfraktionen mit sehr hohen Ladungen, nicht aber den Zuwachs. Dieser ist nur im 2. und im 3. Faktor enthalten.

Der 2. Faktor setzt sich zusammen aus

Variablen mit positiver Ladung: Höhe der Fläche über N.N., Niederschlagssumme des Jahres und der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit, Mg, P<sub>Fe</sub>, P<sub>okkl</sub>, P<sub>org</sub>.  
Variable mit negativen Ladungen: Temperaturmittel des Jahres und der Vegetationszeit, Ca, P<sub>Ca</sub> und Zuwachs.

Der 3. Faktor enthält nur Variable mit positiver Ladung:

Niederschlagssumme des Jahres und der Vegetationszeit, H<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, P<sub>Fe1</sub>, C<sub>t2</sub>, C<sub>t3</sub>, N<sub>t2</sub>, N<sub>t3</sub>, verfügbare Wasserkapazität in der 2. und 3. Bodenzone und Zuwachs.

Die Ladungen für die Zuwachsvariable übersteigt nicht den Wert von 0.52. Die Kommunalitäten sind sehr unterschiedlich, für den Zuwachs beträgt sie 0.41.

2.4.2 Die Faktorenanalyse für die Datenkombination  
"Äquivalenzwert  
Anverhältnisse für das Gesamtprofil" (Tab. 16)

4 Hauptachsen erklären 91 % der Gesamtvarianz. Der 1. Faktor enthält 40 % der extrahierten Varianz und umfaßt die Kationen mit recht großen Ladungen. Der 2. Faktor (17 % extr. Var.) schließt die Niederschlagssummen, die Vorräte an Kohlenstoff und Stickstoff sowie die verfügbare Wasserkapazität ein. Der 3. Faktor enthält alle Phosphate sowie Mg und Ca, die Höhe über N.N. und die verfügbare Wasserkapazität. Nur der 4. Faktor (22 % extr. Var.) enthält den Zuwachs.

**Tab. 16:** Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozente" für das Gesamtprofil

Faktoren	→				$h_i^2$
Variable	1	2	3	4	$h_i^2$
m Höhe ü. N.N.	-.41		-.48		.47
°C J.M.T.				.94	.93
°C V-VIII M.T.				.89	.91
mm J.N.		.62		-.58	.81
mm V-VIII N		.56		-.61	.72
Tage V. Z.				.93	.93
H	.79				.70
Na	.92				.92
K	.90				.83
Ca	-.69		.44	.35	.83
Mg	-.33		-.59	-.44	.65
Al	.93				.90
Fe	.85				.80
Mn	.85				.84
P	.76		.34		.77
P <sup>Al</sup>	.32		-.72		.70
P <sup>Fe</sup>			.82		.89
P <sup>Ca</sup>	-.44		-.85		.77
P <sup>okkl</sup>	.54		-.55		.61
C <sup>org</sup>		.93			.88
N <sup>t</sup>		.92			.91
verfügbares Wasser		.65	.36		.59
Luftkapazität	.84				.75
Zuwachs				.43	.26

Er umfaßt im einzelnen:

Variable mit positiver Ladung: Temperaturmittel des Jahres und der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit, Ca und Zuwachs.

Variable mit negativer Ladung: Niederschlagsmenge des Jahres und der Vegetationszeit sowie Mg.

Die Kommunalitäten sind allgemein sehr hoch. Lediglich der Zuwachs ist mit 0.26 sehr schlecht durch diese Faktoren erfaßt. Die Akkumulation von Variablen mit hohen Ladungen und hohem Anteil der extrahierten Varianz im ersten Faktor erklären sich durch den gemeinsamen Nenner der Äquivalentprozente, sie sind also rechnerisch begründet.

2.5.1 Die Faktorenanalyse für die Datenkombination  
"Konzentrationen pro Bodenzone" (Tab. 17)

Die Bodenlösung und ihre Zusammensetzung ist schon seit langem Untersuchungsobjekt für viele Forscher bei der Klärung verschiedener Erscheinungen im Boden. Als Kenngrößen stehen uns zur Verfügung:

1. Konzentration der Ionen in der GBL
2. Äquivalentprozente in der GBL
3. Potentiale verschiedener Ionen in der GBL
4. Schofield'sche Potentiale in der GBL

Es ist schwer, aufgrund der Konzentration der Ionen in der GBL auf die Nährstoffversorgung zu schließen. Das hat verschiedene Gründe: Bei der Gewinnung der GBL ergeben verschiedene Verhältnisse Wasser : Boden unterschiedliche Ionenkonzentrationen. Hinzu kommt die Dynamik im Jahresverlauf, die bei einigen Ionen Schwankungen unterworfen sein kann. Trotzdem ergeben sich bei einigen Ionenkonzentrationen Beziehungen zum Zuwachs.

4 Faktoren enthalten 69 % der gesamten Varianz. Zur extrahierten Varianz tragen der 1. und der 4. Faktor je 26 % bei, der 2. 22 %, der 3. 23 %. Der 1. und der 3. Faktor enthalten die Zuwachsvariable.

Der 1. Faktor enthält nur  $P_{Fe3}$  mit negativer Ladung, die anderen Variablen haben positive Ladung: Ca, Mg,  $P_{Al}$ ,  $P_{Ca}$ , jeweils für alle Bodenzonen;  $Na_3$ ,  $K_{1,3}$ ,  $C_{t3}$ ,  $N_{t2,3}$ , verfügbares Wasser in der 2. Bodenzone und den Zuwachs.

Der 3. Faktor umfaßt Variable mit positiver Ladung: Temperaturmittel für das Jahr und die Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit,  $Na_{1,2}$  und den Zuwachs.

Variable mit negativer Ladung: Niederschlagssumme des Jahres und der Vegetationszeit,  $P_{Fe1-3}$ ,  $P_{Al1,2}$ ,  $P_{okk13}$ ,  $P_{org1,3}$ ,  $C_{t1,2}$ ,  $N_{t1}$ , verfügbares Wasser.

Tab. 17: Faktorenanalyse für die Datenkombination "Konzentrationen pro Bodenzone"

Faktoren		→				$h_i^2$
Variable		1	2	3	4	$h_i^2$
m Höhe ü. N.N.		.26				.68
°C J.M.T.			-.63		-.41	.84
°C V-VIII M.T.				.86		.82
mm J.N.				-.72		.58
mm V-VIII N.				-.64		.44
Tage V.Z.				.86		.84
H	1		.58		-.32	.46
	2					.08
	3					.26
Na	1		.39		.42	.56
	2				.64	.57
	3	.80		.32		.71
K	1	.45			.43	.51
	2				.65	.47
	3	.73			.35	.67
Ca	1	.50	.34			.47
	2	.47	.45			.53
	3	.81	.32			.78
Mg	1	.38			-.58	.49
	2	.51			-.51	.55
	3	.86				.82
Al	1				-.61	.41
	2				.84	.75
	3				.45	.30
Fe	1				.41	.31
	2		-.31			.25
	3		-.35			.22
P <sub>Al</sub>	1	.73		-.36		.73
	2	.81		-.34		.78
	3	.35	-.52			.41
P <sub>Fe</sub>	1			-.71		.62
	2		-.49	-.45		.50
	3	-.32	-.66	-.43		.76
P <sub>Ca</sub>	1	.80				.74
	2	.71				.73
	3	.56				.48
P <sub>okkl</sub>	1		-.35		-.55	.51
	2		-.76		-.48	.88
	3		-.69	-.48		.79
P <sub>org</sub>	1			-.55	-.56	.64
	2		-.66		-.37	.60
	3		-.77	-.39		.79
C <sub>t</sub>	1		.66	-.41		.70
	2			-.35		.30
	3	.35			-.43	.37
N <sub>t</sub>	1		.57	-.49		.73
	2	.47			-.37	.41
	3	.33			-.39	.27
verfüg. Wasser	1		.60	-.37		.54
	2	.60	.30		-.30	.58
	3		.45			.27
Luftkapazität	1		.50		.57	.60
	2				.91	.83
	3				.50	.41
Zuwachs		.30		.50		.41

Die Kommunalität für den Zuwachs beträgt nur 0.41, d.h. nur 41 % der Varianz wird durch diese Faktoren erklärt. Die Kommunalitäten für die anderen Variablen schwanken zwischen 0.08 ( $H_2$ ) und 0.88 ( $P_{\text{okkl } 2}$ ).

2.5.2 Die Faktorenanalyse für die Datenkombination  
"Konzentrationen im Gesamtprofil" (Tab. 18)

Variable	Faktoren				$h_i^2$
	1	2	3	4	
	.28	.21	.27	.23	
m Höhe ü. N.N.			.80		.69
°C J.M.T.	-.96				.98
°C V-VIII M.T.	-.92				.94
mm J.N.	.53			.69	.89
mm V-VIII N.	.54			.63	.76
Tage V.Z.	-.98				.99
H		-.52	-.35		.48
Na			-.69		.51
K			-.65		.46
Ca		.62	-.31		.57
Mg		.70			.59
Al		-.34	-.34	-.32	.34
Fe					.11
P <sub>Al</sub>		.64			.56
P <sub>Fe</sub>	.50		.60		.62
P <sub>Ca</sub>		.71			.51
P <sub>okkl</sub>	.38		.81		.83
P <sub>org</sub>		.34	.74		.70
C <sub>t</sub>				.85	.78
N <sub>t</sub>		.32		.85	.87
verfügb. Wasser		.30		.73	.68
Luftkapazität		-.47	-.56		.64
Zuwachs	-.48				.35

Im Vergleich zur vorhergehenden Analyse wird hier durch die vier extrahierten Faktoren ein wesentlich größerer Anteil an der Gesamtvarianz, nämlich 90 %, erklärt. 28 % der extrahierten Varianz entfallen auf den 1. Faktor. Nur dieser enthält die Zuwachsvariable.

Der 1. Faktor besteht aus Variablen mit negativen Ladungen: Zuwachs, Temperaturmittel für die Jahres- und die Vegetationszeit, die Dauer der Vegetationszeit, Ca, Fe und Mn.  
Variable mit positiver Ladung: Niederschlagssummen des Jahres und der Vegetationszeit,  $P_{Fe}$ .

Die Kommunalitäten sind bei den einzelnen Variablen sehr unterschiedlich, im allgemeinen aber nicht sehr hoch. Einen der niedrigsten Werte hat die Zuwachsvariable.

Von anfang an wurde davon ausgegangen, daß die Konzentrationen keine ausreichenden Untersuchungsgrößen für die Charakterisierung des Bodens darstellen können. Trotzdem wurden die Werte bei der statistischen Analyse mit verwendet, um diese Annahme bestätigen und Vergleiche mit anderen Kenngrößen herstellen zu können.

#### 2.6.1 Faktorenanalyse für die Datenkombination

"Äquivalentprozente in der GBL pro Bodenzone" (Tab. 19)

Analog den Äquivalentprozenten in der Festphase sind sie für die GBL berechnet und ihr Zusammenhang mit dem Zuwachs ist untersucht worden. Die 4 extrahierten Faktoren erfassen 72 % der Gesamtvarianz. Nur der 2. und der 4. Faktor enthalten die Zuwachsvariable.

**Tab. 19:** Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozentage in der GBL pro Bodenzone"

Variable	Faktoren				h <sub>i</sub> <sup>2</sup>
	1	2	3	4	
m Höhe ü. N.N.	.29	.77			.66
°C J.M.T.		-.56	-.59		.70
°C V-VIII M.T.			-.79		.76
mm J.N.			.76		.65
mm V-VIII N.			.69		.55
Tage V.Z.		-.44	-.66		.60
H	1		.45		.25
	2	-.57			.43
	3	-.74		-.32	.68
Na	1	-.74			.63
	2	-.66			.58
	3	-.42		-.44	.41
K	1	-.74			.59
	2	-.79			.65
	3	-.85			.82
Ca	1	.58	-.52		.65
	2	.50	-.50		.59
	3		-.66	.34	.62
Mg	1	.36	.73		.73
	2	.34	.75		.73
	3		.83		.81
Al	1		.58	-.55	.75
	2	-.72			.59
	3	-.68			.53
Fe	1	-.35		-.54	.52
	2	-.44	.39		.35
	3		.43		.27
C <sub>t</sub>	1	.54	-.40	.55	.81
	2			-.57	.57
	3			.40	.58
N <sub>t</sub>	1	.52		.66	.78
	2			.44	.65
	3			.35	.54
verfügb. Wasser	1	.40	-.42	.52	.63
	2			.50	.65
	3			.54	.19
Luftkapazität	1	-.38	-.47	.31	.50
	2	-.82			.74
	3	-.76			.71
P <sub>Al</sub>	1			.48	.42
	2			.39	.44
	3		.35	.60	.51
P <sub>Fe</sub>	1		.32	.61	.52
	2		.74		.61
	3		.80		.70
P <sub>Ca</sub>	1			.68	.51
	2			.69	.56
	3			.59	.42
P <sub>okkl</sub>	1	.54	.45		.55
	2		.88		.92
	3		.86		.77
P <sub>org</sub>	1	.67	.35	.34	.79
	2		.61		.61
	3		.82	.41	.73
Zunahme			.77		

Der 2. Faktor, der 31 % der extrahierten Varianz enthält, setzt sich zusammen aus Variablen mit positiver Ladung: Höhe der Fläche über N.N., Mg,  $P_{Fe}$ ,  $P_{okkl}$ ,  $P_{org}$ , jeweils für alle 3 Bodenzonen; außerdem  $Al_1$ ,  $Fe_{2,3}$ ,  $P_{Al3}$ . Variable mit negativer Ladung: Zuwachs, Jahresmitteltemperatur, Dauer der Vegetationszeit,  $Ca_{1-3}$ ,  $C_{t1}$ , verfügbares Wasser und Luftkapazität für die 1. Bodenzone.

Der 4. Faktor enthält 18 % der extrahierten Varianz und setzt sich zusammen aus Variablen mit positiver Ladung:  $P_{Al1-3}$ ,  $P_{Ca1-3}$ , Zuwachs,  $Ca_3$ ,  $C_{t2,3}$ ,  $P_{org2}$ . Variable mit negativer Ladung:  $H_3$ ,  $Na_3$ ,  $Al_1$ ,  $Fe_1$  und die Luftkapazität in der 3. Bodenzone.

Auch hier hat die Zuwachsvariable eine der niedrigsten Kommunalitätswerte (0.36).

#### 2.6.2 Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozentage in der GBL für das gesamte Bodenprofil" (Tab.20)

Wie bei allen anderen faktorenanalytischen Ansätzen ist auch hier der Anteil an der Gesamtvarianz, der durch die 4 Hauptachsen (Faktoren) erklärt werden kann, wesentlich höher, wenn man nicht die einzelnen Bodenzonen, sondern das Gesamtprofil betrachtet. Hier können 91 % der Gesamtvarianz durch die 4 Faktoren erklärt werden.

Der 1. Faktor enthält 29 % der extrahierten Varianz. Dies ist der einzige Faktor, der die Zuwachsvariable mit einer Ladung von 0.51 enthält. Im einzelnen setzt sich zusammen aus: Variablen mit positiver Ladung: Niederschlagssummen des Jahres und der Vegetationszeit, Mg,  $P_{Fe}$ ,  $P_{okkl}$ . Variable mit negativer Ladung: Temperaturmittel des Jahres und der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit, Ca, Zuwachs.

Auch hier erreicht der Zuwachs nur den Kommunalitätswert von 0.31.

**Tab. 20:** Faktorenanalyse für die Datenkombination "Äquivalentprozentage in der GBL für das gesamte Bodenprofil

Variable	Faktoren				h <sub>i</sub> <sup>2</sup>
	1	2	3	4	
	.29		.28	.22	
m Höhe ü.N.N.		-.66	-.60		.86
°C J.M.T.	-.96				.96
°C V-VIII M.T.	-.89			-.36	.96
mm J.N.	.43			.79	.89
mm V-VIII N.	.42			.74	.80
Tage V.Z.	-.97				.98
H			-.67		.53
Na			-.72	-.32	.70
K			-.71	-.30	.61
Ca	-.46	.50			.57
Mg	.42		.54		.53
Al		-.64	-.36		.65
Fe		-.71			.54
C <sub>t</sub>				.83	.79
N <sub>t</sub>			.31	.82	.82
verfügb. Wasser		.46		.65	.64
Luftkapazität			-.86		.83
P <sub>Al</sub>		.57			.47
P <sub>Fe</sub>	.59	-.40	.38		.67
P <sub>Ca</sub>		.45	.35		.33
P <sub>okkl</sub>	.51	-.31	.66		.80
P <sub>org</sub>			.71		.62
Zuwachs	-.51				.31

2.7.1 Faktorenanalyse für die Datenkombination  
"Potentiale pro Bodenzone" (Tab. 21)

Wegen der Schwächen, die die Konzentrationen und die Äquivalentprozentage in der GBL bezüglich der Charakterisierung des Bodens haben, wurden aus den Ionenkonzentrationen die Ionenaktivitäten berechnet. Die Ionenaktivität ist ein Maß für die tatsächliche wirksame Ionenmenge in einer Lösung, sie wird berechnet nach der Gleichung

$$a_M = f_M \cdot c_M^+$$

$a_M$  - Aktivität des Ions M

$f_M$  - Aktivitätskoeffizient, der über die Ionenstärke berechnet wird und für verschiedenwertige Ionen unterschiedlich groß ist (mit Werten  $< 1$ )

$c_M^+$  - Konzentration des Ions M

Der negative Logarithmus der Aktivität, ausgedrückt in Mol/l wird in dieser Arbeit als Potential bezeichnet. Diese Kenngröße benutzen viele Forscher für die Klärung verschiedener Fragen bei der Untersuchung des Bodens als einer selbständigen natürlichen Erscheinung (ULRICH, 1966, 1961; KOMAROVA, 1956; KOVDA und ORLOV, 1967; BECKETT, 1964; SCHEFFER, ULRICH und LISANTI, 1962, u.a.). Einige von ihnen betonen, daß die Potentiale auch als Kennwerte für die Beurteilung des Bodens als Nährmedium für die Pflanze dienen können. CHAKARVATI (1966) nimmt die Gesamt-Ionenaktivität als Maßstab für die Bodennährstoffversorgung.

Fast alle diese Untersuchungen beschäftigten sich mit landwirtschaftlichen Problemen, und es ist ungewiß, ob die dabei gewonnenen Erfahrungen auf die in der Regel in einem anderen Aziditätsbereich befindlichen forstlich genutzten Böden und auf das anders gelagerte Problem forstlichen Ertragszuwachses übertragen werden können.

Tab. 21: Faktorenanalyse für die Datenkombination  
"Potentiale pro Bodenzone"

Variable	Faktoren				$h_i^2$
	1	2	3	4	
	.28	.30	.22	.19	
m Höhe ü.N.N.	.79				.71
°C J.K.T.	-.55	-.32	.61		.79
°C V-VIII M.T.		-.36	.75		.77
mm V-VIII N.			-.50		.46
mm J.N.			-.64	-.37	.62
Tage V.Z.	-.45	-.37	.66		.78
pH	1 .33		.32	.71	.75
	2	-.76		.39	.75
	3	-.73			.58
pNa	1 .30			-.62	.52
	2 .60			-.46	.50
	3 .32	.45	.36		.47
pK	1 .39			-.65	.63
	2 .36			-.74	.76
	3 .46			.54	.60
pCa	1	.56			.39
	2 .51	.69			.79
	3 .41	.65	.40		.79
pMg	1 -.30	.75			.74
	2 -.46	.65			.74
	3 -.50	.57	.45		.79
pAl	1	-.36		.64	.65
	2	-.90			.83
	3	-.55			.40
pFe	1	-.54			.35
	2	-.37		-.53	.44
	3				.04
C <sub>t</sub>	1 -.35		-.63	-.35	.65
	2		-.58		.38
	3	-.46	-.35		.38
N <sub>t</sub>	1		-.73		.67
	2	-.40	-.49		.44
	3	-.41			.26
verfügbares Wasser	1 -.35		-.59		.53
	2	-.44	-.61		.61
	3	-.34			.26
Luftkapazität	1 -.51	.52			.60
	2	.56		.56	.73
	3	.60			.46
PAl	1		-.68	.42	.71
	2		-.60	.58	.75
	3	.41		.32	.32
P <sub>Fe</sub>	1 .33		-.68		.58
	2 .69				.53
	3 .82				.76
P <sub>Ca</sub>	1	-.58		.67	.85
	2	-.71		.53	.80
	3	-.63		.30	.53
P <sub>okkl</sub>	1 .54	-.34			.49
	2 .89				.87
	3 .87				.79
P <sub>org</sub>	1 .39		-.47	-.44	.59
	2 .63	-.33			.54
	3 .88				.87
Zuwachs	1 -.35	-.46			.37

Wie aus Tab. 21 hervorgeht, enthalten nur die ersten beiden Faktoren die Zuwachsvariable. 75 % der Gesamtvarianz können durch 4 Faktoren extrahiert werden.

Der 1. Faktor (28 % extr.Var.) besteht aus Variablen mit positiver Ladung: Höhe der Fläche über N.N., pNa, pK,  $P_{Fe}$ ,  $P_{okkl1}$ ,  $P_{org}$ , jeweils für alle 3 Bodenzonen;  $pH_1$ ,  $pCa_{2,3}$ ,  $pAl_3$ .

Variable mit negativer Ladung: Jahresmitteltemperatur, Dauer der Vegetationszeit,  $pMg_{1-3}$ , Zuwachs,  $C_{t1}$ , verfügbares Wasser in der 1. und 3., Luftkapazität in der 1. Bodenzone.

Der 2. Faktor (30 % extr.Var.) enthält Variable mit positiver Ladung: pCa, pMg, Luftkapazität jeweils für alle 3 Bodenzonen;  $pNa_3$ .

Variable mit negativer Ladung: Temperaturmittel des Jahres in der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit,  $pAl_{1-3}$ ,  $P_{Ca1-3}$ , Zuwachs,  $pH_{2,3}$ ,  $pFe_{1,2}$ ,  $C_t$ ,  $N_{t2,3}$ ,  $P_{okkl1}$ ,  $P_{org2}$ , verfügbares Wasser in der 2. Bodenzone.

Die Kommunalitäten liegen zwischen 0.04 bei  $pFe_3$  und 0.87 bei  $P_{okkl2}$ . Der Kommunalitätswert für den Zuwachs ist 0.37.

#### 2.7.2 Faktorenanalyse für die Datenkombination

"Potentiale im Gesamtprofil" (Tab. 22)

Die 4 Faktoren erfassen 93 % der Gesamtvarianz. Der 1. Faktor, der 24 % der extrahierten Varianz erfaßt, enthält als einziger die Zuwachsvariable. Er setzt sich zusammen aus Variablen mit positiver Ladung: Niederschlagssummen des Jahres und der Vegetationszeit,  $P_{Al}$ ,  $P_{Fe}$ ,  $P_{okkl}$ .

Variable mit negativer Ladung: Temperaturmittel des Jahres in der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit und Zuwachs.

Tab. 22: Faktorenanalyse für die Datenkombination  
 "Potentiale im Gesamtprofil"

Variable	Faktoren				$h_i^2$
	1	2	3	4	
m Höhe ü. N.N.				.85	.74
<sup>o</sup> C J.M.T.	-.93				.96
<sup>o</sup> C V-VIII M.T.	-.91				.95
mm J.N.	.44		-.69		.85
mm V-VIII N.	.45		-.63		.70
Tage V.Z.	-.97				.97
H		.91			.91
Na		-.36		.67	.60
K				.70	.61
Ca		-.68	.33	.33	.78
Mg		-.50	.33	.54	.66
Al		-.90			.87
Fe					.06
C			-.88		.80
N <sup>t</sup>			-.88		.87
verfügb. Wasser			-.71		.64
Luftkapazität		-.49		-.52	.67
P	.40	.51			.52
P <sup>Al</sup>	.47			.64	.64
P <sup>Fe</sup>		.84			.71
P <sup>Ca</sup>	.34			.81	.82
P <sup>okkl</sup>		.34		.70	.63
P <sup>org</sup>					.35
Zuwachs	-.48				

Die Kommunalitätswerte sind recht hoch, ausgenommen das Eisenpotential (0.06) und der Zuwachs (0.35).

Obwohl die beiden ersten Faktoren gemeinsam 58 % extrahierte Varianz enthalten und fast alle Potentiale sowie die Zuwachsvariable aufweisen, ist der Informationswert der Potentiale nicht prinzipiell besser als der anderer Datenkombinationen.

2.8.1 Die Faktorenanalyse für die Datenkombination  
 "Schofield'sche Potentiale pro Bodenzone" (Tab. 23)  
 pM -1/zpM

Variable	Faktoren				h <sub>i</sub> <sup>2</sup>
	1	2	3	4	
m Höhe ü. N.N.	.34	.22	.24	.18	.69
°C J.M.T.		-.61		-.47	.67
°C V-VIII M.T.	.33	-.35		-.60	.64
mm J.N.		.37	.43	.50	.64
mm V-VIII N.		.37	.33	.47	.48
Tage V.Z.	.30	-.49		-.52	.62
Na			-.88		.90
			-.47		.85
					.82
K			-.85		.86
			.51		.89
					.80
Ca			-.92		.96
			-.38		.87
					.85
Mg			-.88		.95
			-.34		.82
					.87
Al			-.90		.89
			-.63		.80
				-.41	.63
Fe			-.92		.92
			-.53		.78
					.83
C <sub>t</sub>			.31	.66	.62
				.63	.43
					.55
N <sub>t</sub>				.76	.68
				.54	.39
			.46		.45
verfügbares		-.32		.71	.65
Wasser				.66	.57
			.60		.45
Luftkapazität	-.35	-.45			.36
	-.45	-.35	-.43		.53
	-.54				.39
P <sub>Al</sub>				.71	.61
			-.34	.67	.62
		.37			.23
P <sub>Fe</sub>		.36		.61	.54
		.70			.52
		.83			.79
P <sub>Ca</sub>	.64		-.54		.85
	.77		-.38		.77
	.70				.54
P <sub>okkl</sub>		.52			.52
		.88			.85
		.91			.83
P <sub>org</sub>		.44		.45	.43
		.58			.48
		.89			.82
Zuwachs	.42	-.31			.29

Die Schwäche von Konzentrationswerten, Äquivalentprozente und Potentialen als Kennwerte für die Charakterisierung des Nährstoffhaushaltes versucht SCHOFIELD zu umgehen. Nach dem von ihm aufgestellten Verhältnis-Gesetz (Ratio Law) ist das unter Berücksichtigung der Ionenwertigkeit gebildete Verhältnis der Aktivitäten zweier Kationen in der Bodenlösung, die mit der Festphase im Gleichgewicht steht, unabhängig von der Salzkonzentration der Bodenlösung, d.h.

$a_1^+ / a_2^+ = \text{const.}$ , oder  $pM_1 - pM_2 = \text{const.}$  für einwertige Kationen.

Für mehrwertige Kationen muß die Wertigkeit berücksichtigt werden:

$1/z_1 pM_1 - 1/z_2 pM_2$ ; z-wertigkeit der Kationen.

Diese Größen, die für alle Kationen errechnet werden können, werden als Schofield'sche Potentiale oder auch als Nährstoffpotentiale bezeichnet. (ULRICH, 1961; SCHEFFER und ULRICH, 1962). Wie bei den Potentialen wurden fast alle Untersuchungen bisher im Hinblick auf landwirtschaftliche Probleme durchgeführt.

KINNO (1966) hat die Aussagekraft der Nährstoffpotentiale für die Nährstoffdynamik im Boden untersucht und gezeigt, daß der Einfluß der Düngung, des Nährstoffentzugs durch die Pflanzen und der Nährstofffestlegung auf die Nährstoffdynamik in den Nährstoffpotentialen zum Ausdruck kommt.

Die Nährstoffpotentiale sind unter zwei Bedingungen aussagekräftige Kennwerte (ULRICH, 1961):

1. Der Boden muß fast ausschließlich als Kationenaustauscher wirken.
2. Die Konzentration der Gleichgewichtsbodenlösung darf nicht zu hoch sein.

Die 1. Bedingung wird sowohl von der mineralischen als auch von der organischen Substanz des Bodens erfüllt. Auch die 2. Bedingung ist für die meisten Waldstandorte in der Regel erfüllt. Ungeklärt ist, welche Rolle die mikrobiologische Tätigkeit bei dem Problem der Nährstoffpotentiale in der Wald- Biogeozönose spielt. Dies konnte in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Die hier berechneten Schofield'schen Potentiale sind nur auf die pH-Werte bezogen worden. Durch 4 Faktoren konnte 78 % der Gesamtvarianz erklärt werden. Nur der 1. der beiden Faktoren enthält die Zuwachsvariable.

Der 1. Faktor (34 % der extr.Var.) enthält Variable mit positiver Ladung: Temperaturmittel und Dauer der Vegetationszeit, K, Mg,  $P_{Ca}$ , Zuwachs,  $Na_{2,3}$ ,  $Ca_{2,3}$ ,  $Al_{2,3}$ ,  $Fe_{2,3}$ ,  $C_{t3}$ ,  $N_{t3}$ , verfügbares Wasser in der 3. Bodenzone. Negative Ladung hat die Luftkapazität.

Der 2. Faktor (22 % extr.Var.) enthält Variable mit positiver Ladung: Höhe der Fläche über N.N., Niederschlagssumme des Jahres und der Vegetationszeit,  $P_{okkl}$ ,  $P_{Fe}$  und  $P_{org}$ , jeweils für sämtliche Bodenzone;  $P_{Al3}$ . Variable mit negativer Ladung: Temperaturmittel des Jahres und der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit, Zuwachs, verfügbares Wasser in der 1., Luftkapazität in der 1. und der 2. Bodenzone.

Die 4 Faktoren erfassen die einzelnen Variablen in ganz unterschiedlichem Ausmaß. So ist die Varianz von  $Ca_1$  zu 96 % in den 4 Faktoren enthalten, die Varianz des Zuwachses nur zu 29 %. Die Kommunalitäten für die anderen Variablen liegen zwischen diesen Extremwerten.

2.8.2 Die Faktorenanalyse für die Datenkombination

"Schofield'sche Potentiale für das Gesamtprofil" (Tab. 24)

Variable	Faktoren				$h_1^2$
	1	2	3	4	
	.38	.19	.19	.22	
m Höhe ü. N.N.		.87			.77
°C J.M.T.				.93	.97
°C V-VIII M.T.				.91	.98
mm J.N.	-.37	.31	.63	-.41	.80
mm V-VIII N.			.58	-.42	.66
Tage V.Z.				.97	.99
Na	.96				.94
K	.92				.92
Ca	.96				.97
Mg	.93				.93
Al	.79				.73
Fe	.92				.96
C			.91		.84
N <sub>t</sub>			.93		.92
verfügbares Wasser		-.30	.75		.68
Luftkapazität	-.44	-.44	-.30		.52
P	.43		.36	-.38	.48
P <sub>Al</sub>		.63		.44	.61
P <sub>Fe</sub>					
P <sub>Ca</sub>	.82				.73
P <sub>okkl</sub>		.84			.83
P <sub>org</sub>		.73			.62
Zuwachs				.47	.34

93 % der Gesamtvarianz können durch die 4 Faktoren erklärt werden. Hier enthält nur der 4. Faktor (22 % extr.Var.) die Zuwachsvariable.

Er umfaßt im einzelnen Variable mit positiver Ladung: Temperaturmittel des Jahres und der Vegetationszeit, Dauer der Vegetationszeit und Zuwachs. Variable mit negativer Ladung: Niederschlagssummen des Jahres und der Vegetationszeit,  $P_{Al}$  und  $P_{Fe}$ .

Es ist bemerkenswert, daß der 1. Faktor alle Potentiale mit sehr hoher Ladung enthält, nicht aber den Zuwachs.

Die Kommunalitäten sind sehr hoch und fallen selten unter 0.50. Auch hier bildet der Zuwachs mit einem Wert von 0.34 eine Ausnahme.

Bei der statistischen Auswertung wurden zunächst die Schofield'schen Potentiale verwendet, bei denen die Potentiale der Einzelionen auf den pH-Wert bezogen werden ( $\text{pH}-1/z_pM$ ). In den Korrelationsmatrizen hatte sich gezeigt, daß die Schofield'schen Potentiale in der 2. Bodenzone mit dem Wachstum der Bäume signifikant korreliert sind. Diese Tatsache wirft die Frage auf, warum gerade die 2. Bodenzone und nicht auch die 1. Zone diese Korrelation aufweist. Eine Antwort darauf könnte sein, daß in der 1. Bodenzone aufgrund der dort herrschenden starken mikrobiologischen Tätigkeit diese Relationen verlorengegangen sind.

Nach den gewonnenen Ergebnissen spielt die 3. Bodenzone keine große Rolle bei der Ernährung und damit beim Wachstum der Bäume. Mehr als die Hälfte der Standorte steht in Kontakt mit dem Grundwasser. Die Beweglichkeit und Zusammensetzung des Grundwassers kann wesentlich die Zusammensetzung der Bodenlösung beeinflussen.

Die Schofield'schen Potentiale, die nicht auf den pH-Wert sondern auf andere Ionen bezogen wurden ( $1/z_1 pM_1 - 1/z_2 pM_2$ ), haben keine signifikante Korrelation mit dem Wachstum erbracht. Dies steht nicht im Einklang mit den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren. Um nur ein Beispiel zu nennen: Für die Charakterisierung des Kaliumhaushaltes im Boden wurde von SCHEFFER und ULRICH (1962), LISANTI und ULRICH (1962), BECKETT (1964) und anderen das Potential  $\text{pK}-1/2p$  (Ca+Mg) vorgeschlagen. Der Zusammenhang zwischen diesem Potential und dem Wachstum ist bei verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen zum Ausdruck gekommen (RINNO, 1966).

### 3.0 Diskussion

In Tab. 25 sind aus der Faktorenanalyse die Kommunalitäten  $h_i^2$  für die Zuwachsvariable nochmals zusammengefaßt. Diese Kommunalitäten sind eine Maßzahl dafür, in welchem Ausmaß die Variation des Zuwachs durch die Faktorenkombination erklärt wird. Da die Kommunalität Werte zwischen 0 (keine Erklärung) und 1 (vollständige Erklärung) annehmen kann, sind die gefundenen Kommunalitäten für den Zuwachs als niedrig zu bezeichnen, d.h. der Zuwachs wird nur unzureichend durch die eingegebenen Faktoren erklärt.

Da versucht wurde, sowohl die klimatischen wie auch die bodenphysikalischen und bodenchemischen Faktoren, also die Wachstumsfaktoren Wärme, Wasser und Nährstoffe, durch entsprechende Daten in die Faktorenanalyse aufzunehmen, kann die unzureichende Erklärung des Zuwachs nicht auf die Nichtberücksichtigung von Zuwachsfaktoren zurückgeführt werden. Vielmehr muß aus diesem Ergebnis der Schluß gezogen werden, daß die verwendeten Parameter entweder dem Standort der geprüften Pappelsorte nicht entsprechen (z.B. bei den aus mehr oder weniger weit entfernten Klimastationen gemittelten Klimadaten) oder überhaupt zur Standortscharakterisierung im Hinblick auf Zuwachsleistung unzureichend geeignet sind. Der letztere Schluß hat erhebliche wissenschaftliche Bedeutung, wenn auch in negativem Sinn: Die durch bodenchemische, bodenphysikalische und klimatologische Messungen erhaltenen Daten genügen nicht den Ansprüchen, die die ökologische Forschung an solche Daten stellen muß. Es muß demnach die Forderung erhoben werden, Methoden zu entwickeln, die die Wirkung des Standorts beim Zustandekommen des Zuwachs besser zum Ausdruck bringen als dies die bisher verwendeten Methoden tun. Dieses Resultat kann eigentlich nicht überraschen, richtet sich doch die bisherige Bodenuntersuchungsmethodik nach rein bodenkundlichen Kriterien und Fragestellungen aus. Über die Richtung, die bei der Entwicklung brauchbarer Methoden einzuschlagen ist, läßt sich aus der vorliegenden Arbeit nichts ableiten.

Tab. 25:

Datenkombination	Kommunalität für die Zuwachsvvariable $h_i^2$
1. Gehalte pro Bodenzone	0.54
2. Gehalte für Bodenprofil	0.22
3. Vorräte für Bodenzone	0.56
4. Vorräte für Bodenprofil	0.35
5. Äquivalentprozent $X_{MS}^S$ . 100 pro Bodenzone	0.41
6. Äquivalentprozent $X_M^S$ . 100 für Bodenprofil	0.35
7. Konzentration in GPL pro Bodenzone	0.41
8. Konzentration in GPL für Bodenprofil	0.35
9. Äquivalentprozent $X_M^L$ . 100 pro Bodenzone	0.36
10 Äquivalentprozent $X_M^L$ . 100 für Bodenprofil	0.31
11. Potential pro Bodenzone	0.37
12. Potential für Bodenprofil	0.35
13. Schofield'sches Potential pro Bodenzone	0.29
14. Schofield'sches Potential für Bodenprofil	0.34

Diese prinzipielle Schlußfolgerung wird nicht aufgehoben durch eine Reihe von Unzulänglichkeiten, die dem Untersuchungsmaterial anhaften und das Ergebnis der statistischen Untersuchung negativ beeinflußt haben. Die wichtigste dieser Unzulänglichkeiten ist die bei der Geländeaufnahme erkannte Heterogenität der Ausgangslage. In sehr unterschiedlichem Ausmaß weisen die Versuchsflächen Einflüsse von landwirtschaftlicher Nutzung, Bodenbearbeitung und Düngung auf, so daß sehr wahrscheinlich die Startbedingungen für die Pappel unterschiedlich und nicht mit dem heutigen Bodenzustand identisch waren. Das Zuwachsergebnis enthält also Komponenten, die sich heute der Erfassung entziehen.

Schließlich muß speziell im Hinblick auf die Überprüfung der ökologischen Aussagekraft bodenchemischer Methoden die große Streubreite der Versuchsflächen sowohl hinsichtlich der klimatischen Faktoren wie auch hinsichtlich des Bodenwasser-Haushalts (grundwasserfreie und grundwassernahe Standorte) als nachteilig bezeichnet werden. Es wäre richtiger gewesen, für eine solche Fragestellung im Hinblick auf Klima und Wasserhaushalt stratifiziertes Material zu verwenden. Eine solche Stratifizierung erfordert jedoch ein Mehrfaches an Versuchsflächen, so daß die geringe Anzahl der Versuchsflächen ebenfalls als unzulänglich bezeichnet werden muß.

Der Versuch, die Beziehungen zwischen Zuwachs und allen am Standort wirksamen Wachstumsfaktoren mathematisch-statistisch zu erfassen, stellt demnach folgende Anforderungen:

1. Erfassung der Wachstumsfaktoren durch besser geeignete Parameter.
2. Standörtliche Homogenität der Erhebungsfläche (ist in vielen klassischen Versuchen nicht gegeben).
3. Bei Heranziehung jüngerer Bestände als Versuchsmaterial: Identische Kultur- und Jungwuchsbehandlung.
4. Hohe Anzahl von Erhebungsflächen.

Da vorhandene Versuchsanlagen diesen Forderungen wohl kaum gerecht werden, wären künftige Untersuchungen dieser Art als Erhebungsuntersuchungen durchzuführen. Durch die bei der Auswahl der Erhebungsflächen angewendeten Kriterien kann dabei die erwünschte Aussage bis zu einem gewissen Maß angesteuert werden.

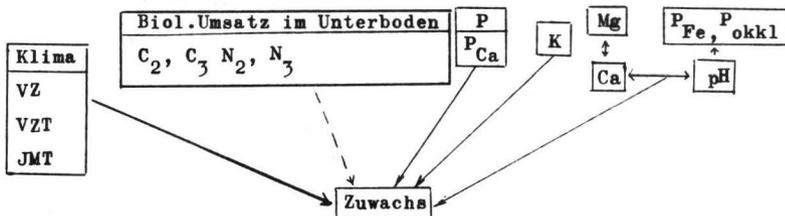
Es war Sinn und Zweck dieser Arbeit, mit einem neueren statistischen Verfahren - der Faktorenanalyse - den Versuch zu machen, die Wachstumsfaktoren in eine quantitative Beziehung zum

Zuwachs zu bringen und besonders für die Nährstoffe die Aussagekraft verschiedener Modelle bodenchemischer Charakterisierung am Beispiel der Schwarzpappel zu überprüfen. Nach der Diskussion und Kritik des Ansatzes der Arbeit seien daher die entsprechenden Ergebnisse noch kurz diskutiert, obwohl wegen der häufig geringen Ladungen der Variablen einschließlich des Zuwachs diese Ergebnisse nur mit Zurückhaltung interpretiert werden können.

Die niedrigeren Kommunalitäten für die Zuwachsvariable bei den Modellen, die mit Durchschnittswerten für das gesamte Bodenprofil arbeiten, lassen den Schluß zu, daß für die Charakterisierung des Nährstoffhaushalts von Böden eine Zweiteilung des Solums sinnvoll ist: Hierbei sollte der obere Teil des Solums der Zone entsprechen, in der im wesentlichen der durch Humusumsetzungen bewirkte Nährstoffumsatz erfolgt (entspricht in der vorliegenden Arbeit der 1. Bodenzone), während der Hauptwurzelraum als eigene Zone (2. Bodenzone) ausgedehnt wird. Der Teil des Solums, unter dem Hauptwurzelraum (3. Bodenzone) kann nach den Ergebnissen dieser Arbeit außer Betracht bleiben.

Von den angewandten bodenchemischen Modellen (Gehalte, Vorräte, Potentiale usw.) hat sich keins als eindeutig überlegen erwiesen.

Den Einfluß der nach der Korrelations- und Faktorenanalyse signifikant mit dem Zuwachs verknüpften Merkmale veranschaulicht das folgende Diagramm:



Die stärkste Ladung weisen in allen Kombinationen die Klimadaten: Dauer der Vegetationszeit (VZ), Mitteltemperatur der Vegetationszeit (VZT) und Jahresmitteltemperatur (JMT) auf, die untereinander sehr eng korreliert sind. Dies entspricht der Feststellung von RÜHRIG (1959), wonach die Wachstumsleistung von Schwarzpappelhybriden bei sonst günstigen Voraussetzungen in erster Linie eine Funktion der Wärme ist. Die Untersuchungen bestätigen diese Ansicht voll und ganz. Nach KLEINSCAMIT (1963) ist der mit zunehmender Wärme steigende Höhenzuwachs im wesentlichen auf die längere Vegetationszeit zurückzuführen.

Nach WITTICH (1951) stellt der Pappelanbau folgende Ansprüche an den Boden:

1. ausreichende Wasserversorgung,
2. gute Durchlüftung,
3. hoher Mineralstoffgehalt
4. annähernd neutrale oder neutrale Bodenreaktion.

Die vorgelegte Untersuchung hat keine klaren Beziehungen zum Wasser- und Lufthaushalt des Bodens ergeben, was jedoch auf methodische Schwierigkeiten zurückzuführen ist: Die eingespeisten Meßdaten sind nicht in der Lage, den Wasser- und Lufthaushalt so verschiedener Standorte zu charakterisieren, wie sie bei den Versuchsflächen vorlagen. Die auch der allgemeinen Erfahrung entsprechenden Angaben WITTICH's über die Ansprüche der Schwarzpappel an die Bodenreaktion kommen dagegen in den verschiedenen Kombinationen der Faktorenanalyse deutlich zum Ausdruck: Ca-Zustand und pH der Böden sind positiv mit dem Zuwachs verknüpft. Dagegen ist der in der Faktorenanalyse verschiedentlich zum Ausdruck kommende negative Einfluß des Mg-Zustands auf den Zuwachs indirekter Natur: Je saurer ein Boden, je schlechter also sein Ca-Zustand, um so besser ist bei bindigen Böden in der Regel die Mg-Versorgung relativ zur Ca-Versorgung.

Die von verschiedenen Autoren (z.B. GUSSONE, 1965; GUNZL, 1967) betonten hohen Bodenansprüche der Pappel erstrecken sich nach den Ergebnissen dieser Untersuchung auch auf die K- und P-Versorgung sowie über den biologischen Umsatz auf die N-Versorgung. Die negativen Beziehungen zwischen Zuwachs und okkludierten sowie Al-Phosphaten sind wie beim Mg indirekter Art, während die positiven Beziehungen zum Ca-Phosphat sowohl indirekter wie direkter Natur sein können. Die Bedeutung des K-Zustands des Bodens für den Zuwachs ergibt sich aus den Kombinationen: Vorräte, Äquivalentprozent, Konzentrationen, Potentiale und Schofield'sche Potentiale, jeweils pro Zone. Sie ist aus Düngungsversuchen bisher vorwiegend von Moorstandorten (BAULE und FRICKER, 1967). Da der K-Zustand des Bodens relativ zum Ca-Zustand sich um so mehr verschlechtert, je höher der pH-Wert des Bodens ist, kann die faktorenanalytisch gefundene Besprechung nicht indirekter Natur sein.

Überraschend ist, daß weder das C/N-Verhältnis noch der N-Vorrat in der 1. Bodenzone zum Zuwachs eine Beziehung zeigt, obwohl durch N-Düngung am sichersten Zuwachsstärkung zu erwarten sind (z.B. GUSSONE, 1965; MEIDEN, 1961). Dagegen weisen C und N in der 2. und 3. Zone positive Beziehungen zum Zuwachs auf. Man kann diese Ergebnisse so deuten, daß unter dem Einfluß von Baumart und Bodenvegetation der biologische Zustand im Oberboden auf den Versuchsflächen allgemein recht günstig ist, was durch die Geländebeobachtungen gestützt wird. Die verschiedenen Standorte werden unter diesen Bedingungen hauptsächlich durch den biologischen Bodenzustand in der 2. Bodenzone differenziert, als dessen Maß die C- und N-Akkumulation in der 2. und 3. Bodenzone anzusehen ist. Folgt man dieser Argumentation, so läßt sich aus den erwähnten Befunden doch die Bedeutung der vom biologischen Bodenzustand abhängigen N-Versorgung für den Zuwachs ablesen.

Dieses Beispiel zeigt gleichzeitig nochmals in aller Deutlichkeit, daß die verwendeten Kriterien zu indirekter Art sind, als daß klare Beziehungen zum Zuwachs erwartet werden könnten. Ein wesentlich direkteres Maß für die Charakterisierung der N-Versorgung des Bestandes aus dem Boden wäre die Messung der biologischen Nettomineralisation am Standort. Das Beispiel weist immerhin in die Richtung, in der sich ökologische Bodenuntersuchungsmethoden entwickeln sollten: Zur Erfassung der im Nährstoffhaushalt am Standort umgesetzten Nährstoffmengen.

#### 4.0 Zusammenfassung

1. Auf der Grundlage biogeozönotischer Vorstellungen wird die "Prüfung ohne Eingriff" als ein den ökologischen Problemen am besten entsprechendes Untersuchungsverfahren herausgestellt.
2. Die mathematisch-statistischen Verfahren bei der "Prüfung ohne Eingriff" werden diskutiert; insbesondere wird die Faktorenanalyse im Vergleich zu anderen Verfahren erörtert.
3. Die Faktorenanalyse wurde auf Versuchsflächen mit 7- bis 8-jährigen Schwarzpappelklonen (16-Sorten-Versuch) angewendet. Als Daten wurden klimatische, bodenphysikalische und bodenchemische Meßwerte eingegeben mit dem Ziel, die Wachstumsbedingungen am Standort zahlenmäßig auszudrücken. Für die bodenchemischen Daten wurden verschiedene Modelle aufgestellt, bei denen die Meßwerte als Gehalte, Vorräte und Äquivalentprozentage in der festen Phase bzw. als Konzentrationen, Äquivalentprozentage, "Potentiale" und Schofield'sche Potentiale ausgedrückt wurden.
4. Die Faktorenanalyse ergab nur relativ niedrige Kommunalitäten für die Variable "Zuwachs der Pappel". Aufgrund dieses Ergebnisses wird der Versuchsansatz kritisch diskutiert und die Notwendigkeit der Erarbeitung ökologischer aussagekräftiger Methoden sowie zahlreicher und sorgfältig ausgewählter Erhebungsflächen für die "Prüfung ohne Eingriff" herausgestellt.
5. Die Ergebnisse der Faktorenanalyse lassen erkennen, daß der Zuwachs der Pappel in erster Linie durch klimatische Faktoren (Dauer der Vegetationszeit, Temperatur), in zweiter Linie durch den pH-Wert und die mit ihm verbundenen Faktoren (Ca-Zustand usw.) bestimmt wird. Dazu kommen als Nährstoffe N, P und K.

### Literaturverzeichnis

- Ahrens, H., 1967: Varianzanalyse, Akademie-Verlag  
Berlin, WTB, Band 49
- Assmann, E., 1968: Die Ausnutzung der standörtlich möglichen  
Produktion zu optimalen Ertragsleistungen  
aus "Möglichkeiten optimaler Betriebsgestaltung  
in der Forstwissenschaft", München S. 1161
- Atanasiu, N. und Schneider, B., 1966: Zur Frage der Erfassung  
von Wirkung und Wechselwirkung  
Z. Acker und Pflanzenbau, Bd. 123, Heft 1
- Faule, H., und Fricker, Cl., 1967: Die Düngung von Waldbäumen.  
Bayerischer Landwirtschaftsverlag, München  
Basel, Wien
- Boguslawski v., E., 1966: Standortforschung, Schriften des  
Forschungsrates für Ernährung, Landwirtschaft  
und Forsten, Heft 1, Bad Godesberg
- Beckett, P.H.T., 1964: Studies on Soil Potassium  
Journal of Soil Science, Vol.15 No.1, S.1-8
- Benecke, P., 1966: Die Geländeansprache des Bodengefüges in  
Verbindung mit der Entnahme von Stechzylinder-  
proben für Durchlässigkeitsmessungen  
Z.f.Kulturtechnik und Flurbereinigung, 7.Jahrg.  
Heft 2, S. 91-101
- Chakarvati, S., 1965: Total Ionic Aktivität as a Measure of Soil  
Fertility, Journal of the Indian Society of  
Soil Science Vol. 13, S. 223-226
- Chang, C.S. and Jackson, M.L., 1957: Fraktionation of Soil  
Phosphorus, Soil Science 84, S. 133-144
- Eman, T.I., 1966: O nekotonih metematicheskikh modelah v  
biogeocenoze; Problemi Kibernetiki 16, S. 191-202  
Moskova
- Flechtner, H.J., 1967: Grundbegriffe der Kybernetik, eine Ein-  
führung, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft  
M.B. Stuttgart
- Ferrari, Th.J., 1965: Prüfung mit und ohne Eingriff aus "Aktuelle  
Probleme des landwirtschaftlichen Versuchswesens"  
Linz/Donau Band 6, Landw.-chem. Versuchsanstalt

- Ferrari, Th.J., 1965b: Modelle in der Bodenfruchtbarkeitsforschung und ihre Prüfung, Zeitschrift f. Pfl.ernährung, Düngung, Bodenkunde, Band 109, S. 155-168
- Ferrari Th.J. et al., 1967: Factor Analysis in agricultural research, Netherlendsjournal of agricultural science 5. S. 211 - 221
- Gorstko, A.B., 1966: O matematičeskoj modeli regulirovanija biocenoza, Problemi Kibernetiki 16, S.217-219 Moskva
- Günzl, L., 1967: Anbauergebnisse und Erfahrungen mit Pappel-hybriden, Centralblatt f.d. gesamte Forstwesen 1 S. 21 - 35
- Gussone, H.A., 1965: Die Düngung der Pappel, Landwirtschaftliche Zeitschrift der Nord-Rheinprovinz Nr. 46 und 47
- Harman, H.L., 1960: Modern factor analysis, Chicago
- Hattmer, H.H., 1967: Variation von Baumhöhe, Brusthöhedurchmesser und Mortalität in einer Feldversuchsserie mit Schwarzpappeln Hybridklone, Silvae Genetica 16, Heft 5-6, S. 149-192, Sept./Dez. - Frankfurt/Main
- Jenny, H. und Grossenbacher, K., 1963: Root-Soil Boundary Zones as seen in the Elektron Microscope, Soil Sci, Soc. of Amer. Proc. 27. S. 273-277
- Kenndall, M.B., 1968: A course in Multivariate Analysis, Charler griffin & Co, London
- Kennel, R., 1966: Soziale Stellung, Nachbarschaft und Zuwachs, Forstwissenschaftliches Zentralblatt 85, S.193-204
- Kleinschmit, J., 1963: Unterschiede im Wachstum und in der Nährstoffaufnahme verschiedener Pappelklone Diss. Forstl.Fak.Göttingen, Hann. Münden
- Kovda, V.A. and Orlov, A.S., 1967: On the importance of ion activity method for the theory of soil formation and soil fertility. Anales de edafologia y agrobiologia, Tomo XXVI, Num. 1-4, Madrid, S. 925-944
- Komarova, N.A., 1956: Vystesnenie pocvennych rastvorov metodami zamesenija zidkostjami i ispol'zovanie metoda v pavenyh issledovanijah, Diss. Moskva. Tr. Pocz. iu-ta im V.V. Dokucaeva T. LI
- Laatsch, W., 1967: Beziehungen zwischen Standortsfaktoren, Ernährungs-zustand und der wachstumsleistung von Baldbeständen. Referat am XIV. Inpro-Kongreß. Sektion 21, München

- Leibundgut, H., 1966: Die Waldpflege, Hauptverlag- Bern
- Lienert, G.A., 1959: Prinzip und Methode der multiplen Faktorenanalyse demonstriert an einem Beispiel, Biometrische Zeitschrift Band 1, Heft 2.
- Lisanti, L.E. und Ulrich, B., 1962: Beziehungen zwischen Pflanzen-ertrag und Kalium-Calcium-Potential des Bodens anhand von Feldversuchen, IV Simposio Internazionale di Agrochimica, Pisa-Firenze 9-14 April 62, S.454-462
- Marschner, H., 1968: Mineralstoffwechsel, aus Fortschritte der Botanik, Band 30, S. 75-85
- Meiden, van der, H.A., 1961: Die Wirkung der Phosphatdüngung auf Pappelpflanzungen  
Phosphorsäure Essen 21. S. 39-50
- Orlov, D.S., 1967: Aktivnosti ionov solej v prcvah i ih znacenie dlja teorii pocvoobrazovani ja i plodorodija pocv  
Biologiceskie nauki N. 10, S. 95-106
- Poletaev, I.A., 1966: O matematiceskikh modelah elementarnih processov v biogeozenosah, Problemi Kibernetiki 16, S. 171-190  
Moskva
- Ralston, C.W., 1964: Evaluation of Forest Site Productivity, International Review of Forest Research Vol. 1 London
- Rehfuess, K.E., 1967: Beziehung zwischen Standort, Ernährungs-zustand und Wuchsleistung von Tannenbeständen (Abies alba) in Süddeutschland, Habil., München
- Reiher, W., und Röstel, H.J., 1962: Die Anwendung der Faktorenanalyse in der Pflanzenzüchtung. Zeitschrift für Pflanzenzüchtung 48, S. 14-28
- Rinno, G., 1966: Die Aussagekraft der Nährstoffpotentiale über die Nährstoffdynamik im Boden. Albrecht-Thaer-Archiv Band 10, Heft 10
- Röhrig, E., Zycha, M. und a., 1959: Die Pappeel, Anbau, Pflege, Verwertung. Parey, Hamburg
- Scheffer, F., Ulrich, B., Lisanti, L.E., 1962: Nährstoffpotentiale zur Charakterisierung des Nährmediums von Pflanzen. 1. Die Problematik der Nährstoffuntersuchungen des Bodens. IV. Simposio Internazionale die Apochimica, Pisa-Firenze 9-14, April 1962
- Scheffer, F. und Ulrich, B., 1962: Betrachtungen zur Pflanzen-verfügbarkeit des Kaliums im Boden, "Kali-Briefe" 23. Folge, Kali-Instl. Bern

- Schiller, H. und et.: 1967: Fruchtbarkeitsstörungen bei Rindern in Zusammenhang mit Düngung, Flora und Mineralstoffgehalt des Wiesenfutters. Linz/Donau, Landwirtschaftlich-Chemische Bundesvers.anst.
- Schlichting, B. und Blume, H.P., 1966: Bodenkundliches Praktikum, Parey-Verlag, Hamburg
- Schmetter, L., 1965: Möglichkeiten der Bearbeitung ökologischer Probleme, aus "Aktuelle Probleme des Landwirtschaftlichen Versuchswesens" Linz/Donau, Band 6, Landw.-chem.-Bundesversuchsanstalt.
- Smith, L.F., 1960: Early growth of Slash Pine on upland and wet sites. 7. For. 58 S. 724-725
- Schukatschev, V.N., 1964: Osnovi lesnij biogeocenologii, Nauka Moskva
- Schukatschev, V.N., 1967: Biogeozonologija i ee sovremenie zadaci; Zurnal obseej biologije T XX VIII, No. 5, - S. 501-509
- Thienemann, A.G., 1956: Leben und Umwelt, Rowohlt-Hamburg
- Thompson, G.W., and McComb, A.L., 1962: Growth of plantation Black Walnut in relation to pH and certain chemical factors of the soil. For. Sci. 8, S. 322-333 (Nach Raltson 196)
- Überla, K., 1968: Faktorenanalyse; Eine systematische Einführung für Psychologen, Mediziner, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg New York
- Ulrich, B., 1961: Boden und Pflanzen, ihre Wechselbeziehungen in physikalischen-chemischen Betrachtungen, Stuttgt.Enke-Verl.
- Ulrich, B., 1966: Kationenaustausch-Gleichgewichte in Böden. Z.f. Pflanzenernährung, Düng., Bodenkd. 113, S.141-159
- Ulrich, B., 1963: The Concept of Availability of Nutrients to Plants. Seminar on Soil-Plant Relationships Wien, 26 March 63
- Voak, H., 1965: Probleme bei der Anwendung der Faktorenanalyse aus "Aktuelle Probleme des Landwirtschaftlichen Versuchswesens", Linz/Donau, Band 6  
Landwirtschaftliche-chem. Bundesversuchsanstalt
- Wittich, W., 1951: Die Standorte der Pappel. S. 98-111 aus "Das Pappelbuch" Herausgeber Hesmer H., Bonn. Verlag des Deutschen Pappelvereins
- Wittich, W., 1964: Die Düngung in der Forstwirtschaft, Ve Congres mondial des Fertilisants - Zürich
- Yomanato, 1962: Relation between properties and growth of Todo-Fir (A. mayriana) For. Soils Rep. For Exp. Sta./Meguro, Tokyo) 12, S. 157-233













Im Selbstverlag der Anstalten für  
Bodenkunde der Universität Göttingen

Herausgeber: B. Meyer und B. Ulrich

Schriftleitung: P. Hugenroth

Bestellungen über:

Institut für Bodenkunde, Göttingen, von Siebold-Str. 4

Institut für Bodenkunde und Waldernährung,  
Hann. Münden, Mitscherlichstr. 3

oder den Buchhandel (Gewährung von Wiederverkäufer-Rabatt)

Selbstkostenpreis            DM