

Aus dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung II
- Organischer Landbau -
der Justus-Liebig-Universität Gießen

**Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose
als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger
Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. agr.)
beim Fachbereich Agrarwissenschaften und Umweltsicherung
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Dipl.-Geogr. Andrea Beste
Mainz 2002

Inhalt

1	<u>EINLEITUNG</u>	1
1.1	<u>PROBLEMSTELLUNG</u>	1
1.2	<u>FORSCHUNGSZIEL UND HYPOTHESEN</u>	2
1.3	<u>AUFBAU DER ARBEIT</u>	7
2	<u>BODENUNTERSUCHUNG MIT DER ERWEITERTEN SPATENDIAGNOSE - STAND DER FORSCHUNG</u>	8
2.1	<u>GEFÜGEBONITUR</u>	9
2.2	<u>AGGREGATSTABILITÄT</u>	14
2.3	<u>WURZELDICHTE</u>	18
2.4	<u>BODENFEUCHTE, PORENVOLUMEN UND LAGERUNGSDICHTE</u>	19
2.5	<u>ABSCHERWIDERSTAND</u>	20
3	<u>MATERIAL UND METHODEN</u>	21
3.1	<u>STANDORT</u>	21
3.1.1	<u>Naturräumliche Grundlagen</u>	21
3.1.2	<u>Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung (PÖB)</u>	24
3.2	<u>VERSUCHSANORDNUNG</u>	25
3.3	<u>GEFÜGEUNTERSUCHUNG UND PROBENAHME</u>	28
3.3.1	<u>Gefügebonitur</u>	31
3.3.2	<u>Bonitur der Mesomorphologie abgesiebter Aggregate</u>	33
3.3.3	<u>Aggregatstabilitätstest auf Wasserstabilität</u>	33
3.3.4	<u>Wurzeldichte</u>	34
3.3.5	<u>Bodenfeuchte, Porenvolumen und Lagerungsdichte</u>	35
3.3.6	<u>Abscherwiderstand</u>	35
3.4	<u>STATISTIK</u>	36
4	<u>ERGEBNISSE UND DISKUSSION</u>	39
4.1	<u>KLASSIFIKATION DER AGGREGATE IN TYPENGRUPPEN UND TEST AUF STABILITÄT</u> ..	39
4.2	<u>EINFLUSS DIFFERENZIERTER BEOBACHTUNGS- BZW. STANDORTBEDINGUNGEN AUF DIE MIT DER ESD ERFASTEN PARAMETER</u>	44
4.2.1	<u>Bodentiefe</u>	44
4.2.2	<u>Ausgangssubstrat</u>	46
4.2.3	<u>Bodenfeuchte</u>	48
4.3	<u>DISKUSSION</u>	57
4.3.1	<u>Bodentiefe</u>	57
4.3.2	<u>Ausgangssubstrat</u>	61
4.3.3	<u>Bodenfeuchte</u>	63
4.4	<u>EINFLUSS UNTERSCHIEDLICHER BEWIRTSCHAFTUNGSMAßNAHMEN AUF DIE MIT DER ESD ERFASTEN PARAMETER</u>	66
4.4.1	<u>Fruchtfolgesequenz Sommergerste, Grünbrache, Winterweizen</u>	66
4.4.2	<u>Fruchtartenvergleich Grünbrache und Winterroggen</u>	70
4.4.3	<u>Effekte der differenzierten Intensität der Grundbodenbearbeitung</u>	72
4.5	<u>DISKUSSION</u>	76
4.5.1	<u>Fruchtfolgesequenz Sommergerste, Grünbrache, Winterweizen</u>	76
4.5.2	<u>Fruchtartenvergleich Grünbrache und Winterroggen</u>	79
4.5.3	<u>Effekte der differenzierten Intensität der Grundbodenbearbeitung</u>	81

<u>5</u>	<u>UMFASSENDE DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN</u>	84
5.1	<u>HYPOTHESENDISKUSSION</u>	84
5.2	<u>KRITIK DER ERGEBNISSE</u>	90
5.3	<u>AKTUELLE VERSION DER FELDMETHODE ERWEITERTE SPATENDIAGNOSE (ESD)</u>	95
5.3.1	<u>Gefügebönitur</u>	95
5.3.2	<u>Wurzeldichte und Wurzelbönitur</u>	97
5.3.3	<u>Aggregatstabilitätstest</u>	99
5.3.4	<u>Bodenfeuchte, Porenvolumen, Lagerungsdichte und Abscherwiderstand</u>	100
5.4	<u>ABSCHLIEßENDE KRITISCHE BEMERKUNGEN ZUM VERSUCHSAUFBAU</u>	100
<u>6</u>	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	102
<u>7</u>	<u>SUMMARY</u>	108
<u>8</u>	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	114
<u>9</u>	<u>ANHANG</u>	s. BAND II

Abbildungen

<u>Abb. 1: Aufwand unterschiedlicher Bodenbeurteilungsmethoden</u>	2
<u>Abb. 2: Spatendiagnose nach GÖRBING, Feldprotokoll</u>	3
<u>Abb. 3: Spatenprofil eines verdichteten Bodens</u>	3
<u>Abb. 4: Spatenprofil eines lockeren, durch Wurzeln stabilisierten Bodens</u>	4
<u>Abb. 5: Lage der Projekt-Versuchsflächen auf dem Eichenhof in Rheinhessen</u>	21
<u>Abb. 6: Bodenkarte der Versuchsflächen</u>	22
<u>Abb. 7: Monatsmittelwerte für Niederschlag und Temperatur während des Untersuchungszeitraums</u>	23
<u>Abb. 8: Versuchsflächen des Versuchsansatzes 1</u>	26
<u>Abb. 9: Versuchsflächen des Versuchsansatzes 2</u>	28
<u>Abb. 10: Profil- und Flachspaten im Boden</u>	29
<u>Abb. 11: Bodenprofil auf den Diagnoseständern, Abheben des Profilspatens</u>	29
<u>Abb. 12: Bodenprofil mit „Bodenkamm“</u>	30
<u>Abb. 13: Feldprotokoll der ESD</u>	31
<u>Abb. 14: Zerfallsbonitur des Aggregatstabilitätstests</u>	34
<u>Abb. 15: Wurzelzählung mit Schablone</u>	34
<u>Abb. 16: Abscherwiderstandsmesser</u>	36
<u>Abb. 17: Häufigkeit der acht Aggregattypengruppen</u>	40
<u>Abb. 18: Beispiel: Polyeder, glatt, keine Poren</u>	41
<u>Abb. 19: Beispiel: Subpolyeder, glatt, wenig Poren</u>	41
<u>Abb. 20: Beispiel: Krümel, rauh, viele Poren</u>	41
<u>Abb. 21: Häufigkeitsverteilung der zusammengefassten drei Aggregattypengruppen</u>	42
<u>Abb. 22: Bodenfeuchte und Gefügenote in der Oberkrume für die verrechneten Probenahmetermine 1997 und 1998, Versuchsansatz 1</u>	51
<u>Abb. 23: Bodenfeuchte und Aggregatstabilität (in %) in der Oberkrume für die verrechneten Probenahmetermine 1997 und 1998, Versuchsansatz 1</u>	52
<u>Abb. 24: Bodenfeuchte und Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ in der Oberkrume für die verrechneten Probenahmetermine 1997 und 1998, Versuchsansatz 1</u>	53
<u>Abb. 25: Bodenfeuchte und Wasserstabilität der Typengruppen in der Oberkrume für die verrechneten Probenahmetermine 1997 und 1998, Versuchsansatz 1</u>	56
<u>Abb. 26: Bodenfeuchte und Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ an den 6 Probenahmeterminen der Fruchtfolgesequenz in der Oberkrume</u>	68

<u>Abb. 27: Bodenfeuchte und Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ an den 6 Probenahmeterminen der Fruchtfolgesequenz in der Unterkrume</u>	68
<u>Abb. 28: Zerfallsbonitur des Aggregatstabilitätstests bei sandigen Böden</u>	99
<u>Abb. 29: Zerfallsbonitur des Aggregatstabilitätstests bei tonigen Böden</u>	100

Tabellen

<u>Tab. 1: Methodik und Quantifizierbarkeit der GÖRBING- Spatendiagnose und der ESD</u>	8
<u>Tab. 2: Boniturbogen für die Gefügeböden nach HAMPL/KUSSEL 1994</u>	12
<u>Tab. 3: Durchschnittliche bodenchemische Eigenschaften der Versuchsflächen PÖB (Ap-Horizont)</u>	23
<u>Tab. 4: Vorgeschichte der ökologisch bewirtschafteten Flächen des PÖB bis 1993</u>	27
<u>Tab. 5: Gefügeböden für lehmige Böden</u>	31
<u>Tab. 6: Merkmalseinteilung der Bodenaggregate</u>	32
<u>Tab. 7: Boniturschlüssel zur Untersuchung der Mesomorphologie unter dem Binokular</u>	33
<u>Tab. 8: Messpunkte und Stichproben pro Parzelle</u>	36
<u>Tab. 9: Korrelationsmatrix für die Merkmale der Aggregatmorphologie</u>	39
<u>Tab. 10: Wasserstabilität der Typengruppen, Versuchsansätze 1 und 2</u>	43
<u>Tab. 11: Gefügeböden in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansätze 1 und 2</u>	44
<u>Tab. 12: Aggregatstabilität in Abhängigkeit von der Bodentiefe,</u>	45
<u>Tab. 13: Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“ in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansätze 1 und 2</u>	45
<u>Tab. 14: Wasserstabilität der Typengruppen in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansätze 1 und 2</u>	46
<u>Tab. 15: Lagerungsdichte und Abscherwiderstand in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansätze 1 und 2</u>	46
<u>Tab. 16: Gefügeböden in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat, Versuchsansatz 1^a</u>	47
<u>Tab. 17: Aggregatstabilität in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat, Versuchsansatz 1</u>	47
<u>Tab. 18: Wasserstabilität der Typengruppen in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat, Versuchsansatz 1</u>	48

<u>Tab. 19: Spannweiten und Mittelwerte der Bodenfeuchte, Versuchsansätze 1 und 2</u>	48
<u>Tab. 20: Gefügenreife der Horizonte in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte,</u> <u> <u>Versuchsansätze 1 und 2</u></u>	50
<u>Tab. 21: Aggregatstabilität der Horizonte in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte,</u> <u> <u>Versuchsansätze 1 und 2</u></u>	51
<u>Tab. 22: Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“ der Horizonte in Abhängigkeit von der</u> <u> <u>Bodenfeuchte, Versuchsansätze 1 und 2</u></u>	53
<u>Tab. 23: Wasserstabilität der Typengruppen in den Horizonten in Abhängigkeit von der</u> <u> <u>Bodenfeuchte, Versuchsansatz 1</u></u>	54
<u>Tab. 24: Korrelation zwischen Bodenfeuchte und Krümelstabilität in den Horizonten</u> <u> <u>nach Jahreszeiten getrennt, Versuchsansatz 1</u></u>	55
<u>Tab. 25: Wasserstabilität der Typengruppen in den Horizonten in Abhängigkeit von der</u> <u> <u>Bodenfeuchte, Versuchsansatz 2</u></u>	55
<u>Tab. 26: Wurzeldichte in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, Versuchsansatz 2</u>	56
<u>Tab. 27: Gefügenreife der Horizonte in der Fruchtfolge</u>	66
<u>Tab. 28: Aggregatstabilität der Horizonte in der Fruchtfolge</u>	67
<u>Tab. 29: Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ der Horizonte</u> <u> <u>in der Fruchtfolge</u></u>	67
<u>Tab. 30: Wasserstabilität der Typengruppen in den Horizonten für die</u> <u> <u>Fruchtfolge</u></u>	69
<u>Tab. 31: Gefügenreife in den Horizonten im Fruchtartenvergleich Winterroggen</u> <u> <u>und Grünbrache</u></u>	70
<u>Tab. 32: Aggregatstabilität in den Horizonten im Fruchtartenvergleich</u> <u> <u>Winterroggen und Grünbrache</u></u>	70
<u>Tab. 33: Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“ in den Horizonten im</u> <u> <u>Fruchtartenvergleich Winterroggen und Grünbrache</u></u>	71
<u>Tab. 34: Wasserstabilität der Typengruppen in den Horizonten</u> <u> <u>im Fruchtartenvergleich Winterroggen und Grünbrache</u></u>	71
<u>Tab. 35: Lagerungsdichte, Abscherwiderstand und Wurzeldichte in den Horizonten</u> <u> <u>im Fruchtartenvergleich Winterroggen und Grünbrache</u></u>	71
<u>Tab. 36: Gefügenreife in den Horizonten in Abhängigkeit der</u> <u> <u>Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansätze 1 und 2</u></u>	72

<u>Tab. 37: Aggregatstabilität in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansätze 1 und 2</u>	73
<u>Tab. 38: Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“ in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansätze 1 und 2</u>	73
<u>Tab. 39: Wasserstabilität der Typengruppen in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansatz 1 und 2</u>	74
<u>Tab. 40: Lagerungsdichte, Abscherwiderstand und Wurzeldichte in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansatz 2</u>	74
<u>Tab. 41: Gefügeböden für sandige Böden</u>	96
<u>Tab. 42: Gefügeböden für tonige Böden</u>	97
<u>Tab. 43: Wurzelböden</u>	98

Abkürzungen

ESD	Erweiterte Spatendiagnose
ISCO	International Soil Conservation Organisation
UBA	Umweltbundesamt
P	Pflug
PÖB	Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung
RSU	Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
SG	Schichtengrubber
SP	Schichtenpflug
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
ANOVA	Analysis of Variance
AGGRUPP3	Mesostrukturvariable, Skala 1-3

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Böden erfüllen in einem ausgeglichenen Landschaftshaushalt fünf wesentliche Funktionen. Diese lassen sich laut WBGU (1994, S. 44), GLÖSS (1997, 82 ff.) und UBA (1998, S. 12), wie folgt definieren:

- Lebensraumfunktion:* Lebensraum und -grundlage für Pflanzen und Tiere,
Regelungsfunktion: Filter-, Puffer-, Speicher- und Transformatorfunktion für Wasser, organische und anorganische Stoffe,
Produktionsfunktion: Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln und nachwachsenden Rohstoffen,
Trägerfunktion: Träger von Siedlungen, Verkehr und Entsorgung,
Kulturfunktion: Grundlage menschlicher Geschichte und Kultur.

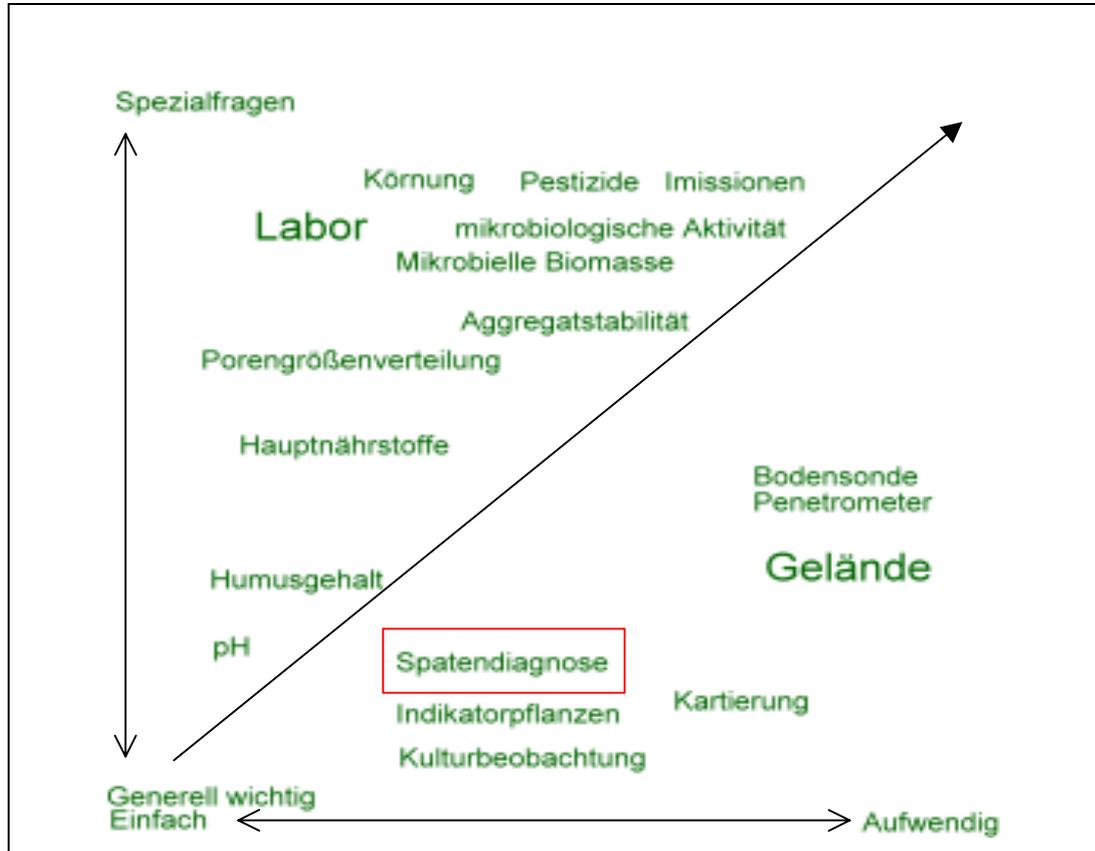
Unterschiedliche Formen der Bodennutzung müssen eine Aufrechterhaltung dieser Bodenfunktionen langfristig gewährleisten können, um nachhaltig zu sein. Den flächenmäßig größten Anteil an der Bodennutzung hat die Landwirtschaft. Weltweit führen aktuelle Bewirtschaftungspraktiken bei einem Drittel der ackerbaulich genutzten Böden zu Bodendegradation (UNEP/ISRIC 1991, RSU 1994, WBGU 1994, HURNI et al. 1996). Nach De KIMPE und WARKENTIN (1998) entsteht Bodendegradation dann, wenn die Balance zwischen den natürlichen Bodenfunktionen unausgeglichen ist. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU 1994, S. 49) und HURNI et al. (1996, S. 11) nennen hier vor allem Bodenerosion sowie die chemische, physikalische und biologische Degradation. Als Symptome für eine Beeinträchtigung der Bodenfunktionen und beginnende Bodendegradation werden die Bodenverdichtung und in deren Folge die Zunahme von Überschwemmungen, der Rückgang der Grundwasserneubildung und eine verminderte Filterwirkung der Böden genannt (WBGU 1994). Für eine langfristig ökologisch und ökonomisch tragfähige Produktivität müssen daher Bodennutzungssysteme neben der Produktionsfunktion auch die Lebensraum- und die Regelungsfunktion des Bodens vermehrt berücksichtigen (WBGU 1994, GLÖSS 1997, UBA 1998).

Um Bodennutzungssysteme hinsichtlich dieses Anspruchs überprüfen zu können, sind geeignete Indikatoren und Methoden auszuwählen und zu entwickeln (UBA 1998, BMU 1996).

Diese Indikatoren bzw. die Methoden, die der Überprüfung dienen, müssen ausreichend empfindlich auf Änderungen der Bewirtschaftungspraxis reagieren, um Veränderungen möglichst früh aufzuzeigen.

1.2 Forschungsziel und Hypothesen

Böden können hinsichtlich ihrer chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften mit Hilfe verschiedenster Mess- und Boniturmethode untersucht werden. Die Komplexität des Bodensystems bringt es mit sich, dass oft nur Teilausschnitte betrachtet werden können (z.B. pflanzenverfügbare Nährstoffe in bodenchemischer Untersuchung) und andererseits trotz erheblichem Untersuchungsaufwand nur Momentaufnahmen möglich sind (z.B. Bodenmikrobiologie), die schon aus Kostengründen die Übersicht über die Bodendynamik im Jahresverlauf erschweren (vgl. Abb. 1). Relativ einfache bodenphysikalische Untersuchungsmethoden sind oftmals zu einseitig auf bodenmechanische Ansätze ausgerichtet und berücksichtigen biologische und ökologische Parameter nicht ausreichend (UBA 1998). Aggregatstabilitätstests lassen beispielsweise Aussagen zur Stabilität zu, ermöglichen jedoch keine Rückschlüsse auf gute oder schlechte räumliche Struktureigenschaften des Bodens.



Quelle: verändert nach HAMPL/KUSSEL 1994

Abb. 1: Aufwand unterschiedlicher Bodenbeurteilungsmethoden

Die von J. GÖRBING um 19930 entwickelte „Spatendiagnose“ gilt als sehr einfache Feldmethode zur Gefügeuntersuchung. Dabei wird ein Bodenziegel mit dem Diagnosespaten direkt aus der Ackerkrume ausgegraben und sofort auf den Zustand des Gefüges (locker, mittel, fest, eventuell vorhandene Horizonte, Form der Aggregate) und anderer Parameter (Bodenfeuchte, Durchwurzelung) hin untersucht (vgl. Abb. 2)

Datum _____		Notizen			
Parzelle _____		(Organisches Material, Wurmkot)			
Frucht _____					
	Bodenstruktur	Wurzeln		Bodenfeuchte	
Oberkrume 0-15 cm	Locker, Krümelstruktur	<input type="checkbox"/>	Viele Feinwurzeln	<input type="checkbox"/>	feucht
	Krümel und Bröckel	<input type="checkbox"/>	Wenige Feinwurzeln	<input type="checkbox"/>	mittel-feucht
	Dichte, scharfkantige Klumpen	<input type="checkbox"/>	Kaum Wurzeln	<input type="checkbox"/>	trocken
Unterkrume 15-30 cm	Locker, Krümelstruktur	<input type="checkbox"/>	Viele Feinwurzeln	<input type="checkbox"/>	feucht
	Krümel und Bröckel	<input type="checkbox"/>	Wenige Feinwurzeln	<input type="checkbox"/>	mittel-feucht
	Dichte, scharfkantige Klumpen	<input type="checkbox"/>	Kaum Wurzeln	<input type="checkbox"/>	trocken

(verändert nach HAMPL 1995 c)

Abb. 2: Spatendiagnose nach GÖRBING, Feldprotokoll

Die Vorteile dieser Methode der Bodenuntersuchung sind heute für die Praxis noch gültig: Der Gesamteindruck vom Bodenzustand liefert Informationen über Parameter des Gefüges, die über eine reine Strukturbeschreibung hinausgehen. Durch die Untergliederung des Gesamteindruckes in einzelne Parameter kann der Bodenzustand systematisch untersucht und Ursachen für Veränderungen können bei regelmäßiger Wiederholung genauer abgeleitet werden. Die Parametereinteilung erleichtert die Vergleichbarkeit.



(Foto: HAMPL)

Abb. 3: Spatenprofil eines verdichteten Bodens

Der unmittelbare Kontakt zum Boden bleibt erhalten und der Zustand wird „begreifbar“. Das bedeutet, zwischen Mensch und dem Beurteilungsgegenstand Boden steht keine Probenbehandlung und die „Messinstrumente“ sind jederzeit verfügbar: Hände, Augen, Nase (vgl. hierzu Abb. 3 u. 4).



(Foto: HAMPL)

Abb. 4: Spatenprofil eines lockeren, durch Wurzeln stabilisierten Bodens

Bäuerliche Erfahrung im Umgang mit Boden wird strukturiert zur Beurteilung herangezogen. Die Methode ist sehr einfach erlernbar und die Ergebnisse sind leicht vermittelbar. Die Spatendiagnose nach GÖRBING kommt den Anforderungen aus einem Empfehlungspapier der internationalen Bodenschutzkonferenz 1996 sehr nahe.

Hier wird der Bedarf an einfachen, auch für Nichtwissenschaftler anwendbaren Methoden der Bodenbeurteilung unterstrichen. Die Anpassungsfähigkeit von Kombinationsmethoden und die Gültigkeit und Aussagekraft qualitativer Daten im Vergleich zu quantitativen Daten werden besonders herausgestellt. Als dringend notwendig wird darüber hinaus die Einbeziehung der Erfahrung von Bauern in Forschungsansätze empfohlen (ISCO 1996).

Die Treffsicherheit der Spatendiagnose bei der Bewertung von Bodenzuständen wurde immer wieder betont (GÖRBING/SEKERA 1947, MÜCKENHAUSEN 1947, EBERT 1952, TEIPEL 1952a/b, VON CAPPELN 1959, DIEZ, 1982, DIEZ 1991, HARRACH/VORDERBRÜGGE 1991, HAMPL 1995b).

JUNG (1988) stellt überdies hohe Korrelationen mit bodenphysikalischen Messungen fest. Eine ausreichende Dokumentierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse für wissenschaftliche Zwecke ist mit den Schätzwerten so, wie sie in der GÖRBING Spatendiagnose ermittelt werden jedoch nicht gegeben. Die grobe verbale Umschreibung der Parameterausprägung erleichtert zwar dem Praktiker die Schlussfolgerung und Entscheidung. Sie ist für die wissenschaftliche Dokumentation jedoch nicht differenziert und eindeutig genug.

Aufgrund der genannten Nachteile wurde die GÖRBING-Spatendiagnose 1994 von HAMPL und KUSSEL zur objektiveren Erfassung von Bodenzustandsdaten erweitert (HAMPL/KUSSEL 1994, BESTE 1996). In dieser „Erweiterten Spatendiagnose“ (ESD) wird die aktuelle Erfassung des Gefügestandes im Feld mit Hilfe einer systematischen Gefügebönnitur mit Feldmessungen und Ergebnissen aus Laboruntersuchungen kombiniert. Es kommen sowohl quantitative Messungen (z.B. Abscherwiderstand), als auch qualitative Boniturmetho-

den (Gefügebönetur, Verschlammungstest der Aggregate) zur Anwendung. Die Parameter der Kombinationsmethode ESD nach HAMPL/KUSSEL 1994 sind Gefügebönetur, Aggregatstabilitätstest, Messung von Bodenfeuchte, Porenvolumen/Lagerungsdichte und Abscherwiderstand sowie Auszählen der Wurzelmenge. Die systematischen Böneturmethoden liefern dabei die eigentliche, komplexe Information. Die Messungen der bodenkundlichen Standardwerte Abscherwiderstand und Lagerungsdichte/Porenvolumen halten die Verbindung zu bisher gängigen physikalischen Böneturbeurteilungen und erleichtern daher die Einordnung der neuen Böneturwerte.

Praktische Erfahrungen mit der erweiterten Methode innerhalb einer Forschungsarbeit zu den Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung zeigen, dass die ESD nach HAMPL/KUSSEL das Potential bietet, mit vertretbarem Aufwand Datenmaterial zu erarbeiten, das aussagekräftige Informationen über ökologisch wichtige Bodengefügeparameter liefert. Vor allem Gefügebönetur und Aggregatstabilitätstest erschienen vielversprechend. Als weiteres Ergebnis dieser Untersuchungen erscheint es jedoch notwendig, die Methode gerade in diesen neu entwickelten Bereichen Gefügebönetur (Gefügebönetur) und Aggregatstabilitätstest (Verschlammungstest) noch zu verbessern (BESTE 1996).

Ein vorrangiges Anliegen dieser Arbeit ist es demnach, die ESD zu einer für wissenschaftliche Zwecke auswertbaren Methode zu entwickeln, die

a) bewirtschaftungsbedingte Veränderungen des Bodengefüges schnell, reproduzierbar und mit geringem Aufwand erfassen kann und

b) Handlungsempfehlungen ermöglicht.

Hierbei sollen die Teilmethoden der ESD zur Beurteilung von Gefüge und Aggregatstabilität dahingehend verbessert werden, dass die Leistung des Gefüges zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des Bodens noch besser berücksichtigt werden kann (vgl. Kapitel 2).

Die Forschungsziele der vorliegenden Dissertation werden daher folgendermaßen definiert:

1. Alle im Rahmen der ESD zur Anwendung kommenden Einzelmethoden sollen auf ihre Empfindlichkeit gegenüber bereits vorhandenen bewirtschaftungsbedingten Gefügeunterschieden überprüft werden. Es gilt hierbei zu bewerten, ob diese Methoden geeignete Indikatoren für die Beurteilung der Auswirkungen der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf den Gefügezustand von Böden liefern.

2. Insbesondere die Teilmethoden Gefügeböndur und Aggregatstabilitätstest sollen weiterentwickelt und schließlich soweit verbessert werden, dass verschiedene vorrangig bewirtschaftungsbedingte Ursachen für Unterschiede im Gefügeböndurzustand des Bodens methodisch besser erfasst werden können.
3. Schließlich gilt es, die ESD als Ganzes dahingehend zu beurteilen, ob diese als einfache Feldmethode über die Beurteilung des Gefügeböndurzustandes einen effektiven Beitrag zur Bewertung wichtiger Parameter der ökologischen Funktionsfähigkeit leisten kann und zur Nutzung durch Dritte empfohlen werden kann.

Für eine umfassende Beurteilung des Gefügeböndurzustandes als einem wichtigen Indikator für die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Bodens ist es von hohem wissenschaftlichem und praktischem Interesse, ob die Stabilität der Bodenaggregate, die maßgeblich für den Gefügeböndurzustand mitverantwortlich sind, überwiegend auf kolloidchemische und physikalische oder biologische Ursachen zurückzuführen ist. Unter Zugrundelegung der Erfahrung, dass polyederartige, gering durchpörtete Aggregatformen im Vergleich zu schwammartigen, krümeligen, porösen Aggregatformen ein geringeres Maß an biogener Stabilisierung aufweisen (SUNKEL 1961), kann die Morphologie der Aggregate Hinweise auf ein höheres oder niedrigeres Maß an biologischen Stabilisierungsfaktoren geben. SCHINNER/SONNLEITNER (1996 b) und HAMPL-MATHY (1991 a) zeigen erste Anhaltspunkte auf, dass unterschiedliche Formen landwirtschaftlicher Bodennutzung (Fruchtfolge: Art der Früchte, Dichte und Dauer der Bodenbedeckung. Bodenbearbeitung: Tiefe, Wendungsintensität, Zeitpunkt) Einfluss auf die biologischen Ursachen der Aggregatstabilität nehmen können. Dem soll in der vorliegenden Arbeit weiter nachgegangen werden. Das in Kapitel 3 beschriebene Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung, in dessen Rahmen diese Arbeit entstand, bietet mit gewissen Einschränkungen die Möglichkeit, bewirtschaftungsbedingte Ursachen für Unterschiede im Gefügeböndurzustand und der Aggregatstabilität - hier innerhalb des Systems „Ökologischer Landbau“ - zu überprüfen.

In der vorliegenden Arbeit wurden, vorgegeben durch die Versuchsanlage, Effekte von Ackerbaulichen Maßnahmen wie Fruchtfolge, Fruchtarten und Grundbodenbearbeitung untersucht.

Folgende Hypothesen bilden in Abhängigkeit der vorhandenen Untersuchungsmöglichkeiten die Grundlage für die Versuchsanordnung und methodische Durchführung:

- **Hypothese I** Innerhalb der Fruchtfolgesequenz Getreide, Grünbrache, Getreide bewirkt Grünbrache aufgrund ihrer bodenregenerierenden Wirkung einen vorübergehenden Anstieg der Aggregatstabilität bei erhöhtem Krümelanteil (vgl. Kapitel 2.2) sowie ein besseres Gefüge.
- **Hypothese II** Die Bodenbearbeitung spielt hinsichtlich der Schonung des Bodenlebens eine wichtige Rolle. Der Pflug lockert das Gefüge stärker, stört jedoch das Bodenleben durch die tiefe Wendung. Bei nicht wendender oder flach wendender Bodenbearbeitung liegt im Vergleich zur krumentief wendenden Variante bei dichterem Gefüge eine höhere Aggregatstabilität und ein erhöhter Krümelanteil vor.
- **Hypothese III** Durch die Kombination von morphologischer Bodenbeurteilung (Gefügebönetur, Bönetur der Aggregatmorphologie) und dynamischem Test (Aggregatstabilitätstest) können biologische Faktoren der Aggregatstabilisierung von kolloidchemischen und vor allem verdichtungsbedingten Faktoren besser unterschieden werden.

Die hier aufgestellten Hypothesen beschreiben - bis auf Hypothese III - Effekte, die dem aktuellen Kenntnisstand entsprechen und in der Literatur vielfach beschrieben worden sind. Diese Effekte mit den Teilmethoden ESD widerspruchsfrei nachvollziehen oder - wie in Hypothese III formuliert - differenzierter erklären zu können, ist die Grundlage für eine positive Bewertung der Aussagekraft und Anwendbarkeit der ESD.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird die weiterentwickelte Methode ESD detailliert vorgestellt. Anhand des wissenschaftlichen Kontextes und eigener Forschungsarbeiten wird die grundsätzliche Eignung der in der ESD nach HAMPL/KUSSEL verwendeten Parameter und Methoden zur differenzierten Gefügebönetur dargestellt und Verbesserungsbedarf bei einigen Teilmethoden abgeleitet. In Kapitel 3 erfolgt eine Beschreibung der Versuchsanordnung und Methodik. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Versuchsansätze präsentiert und diskutiert. Kapitel 5 beinhaltet die zusammenfassende Diskussion, den Vergleich der Ergebnisse mit den Hypothesen, Methodenkritik, Empfehlungen zum Einsatz der Methode, die Formulierung weiteren Forschungsbedarfs sowie die Vorstellung einer optimierten Form der ESD. Kapitel 6 liefert abschließend eine kurze Zusammenfassung der Arbeit.

2 Bodenuntersuchung mit der Erweiterten Spatendiagnose -

Stand der Forschung

HAMPL und KUSSEL (1994) haben die Erweiterte Spatendiagnose (ESD) mit dem Ziel erarbeitet, die wesentlichen Vorteile der GÖRBING'schen Methode - Einfachheit in der Anwendung und Ergebnisvermittlung, Komplexität der Information, unmittelbare Begreifbarkeit sowie geringe Probenbehandlung - zu bewahren und darüber hinaus eine größtmögliche Eindeutigkeit und Quantifizierbarkeit der Informationen zu gewährleisten. Sie stellten folgende Mess- und Boniturmethode zur Ermittlung von Daten entsprechend den Parametern der GÖRBING-Spatendiagnose (Bodenstruktur, Durchwurzelung und Bodenfeuchte) zusammen (vgl. Tab. 1):

Tab. 1: Methodik und Quantifizierbarkeit der GÖRBING- Spatendiagnose und der ESD

<i>Parameter</i>	<i>GÖRBING-Spatendiagnose</i>	<i>Ergebnis</i>	<i>ESD nach HAMPL/KUSSEL</i>	<i>Ergebnis</i>
Bodenstruktur	Schätzung der durchschnittlichen Teilchengröße in cm	Zahl	Gefügebonitur mit angepasstem Maßstab für jeden Bearbeitungshorizont und den Unterboden. Fünffach Noteneinteilung innerhalb der Horizonte	Zahl
	Beschreibung der Teilchenform	beschreibend		
	Schätzung der Verdichtung, 4 Stufen	beschreibend	Porenvolumen und Lagerungsdichte, über gravimetrische Wassergehaltsbestimmung	Zahl
			Messung des Abscherwiderstands	Zahl
		Aggregatstabilitätstest, 3 Stufen, Umrechnung in % erreichbarer Punkte	Zahl	
Durchwurzelung	Schätzung der Durchwurzelung, 5 Stufen	beschreibend	Zählung der Wurzeldichte/cm ²	Zahl
Bodenfeuchte	Schätzung der Bodenfeuchte, 5 Stufen	beschreibend	Messung der Bodenfeuchte über gravimetrische Wassergehaltsbestimmung	Zahl

Im folgenden wird eine Einordnung der in der ESD nach HAMPL/KUSSEL (1994) verwendeten Methoden in den wissenschaftlichen Kontext hinsichtlich ihrer Aussagekraft zur Bodenzustandsbeurteilung vorgenommen. Veränderungen einzelner Teilmethoden und/oder Vorgehensweisen innerhalb der Methodik als Vorarbeit der vorliegenden Forschungsarbeit werden begründet.

2.1 Gefügebtonitur

Mit Bodengefüge oder Bodenstruktur wird in der Bodenkunde die Art der Anordnung der festen Bodensubstanz im Raum bezeichnet. Dabei werden Mikro- und Makrogefüge unterschieden. Unter Mikrogefüge versteht man die mit dem Mikroskop sichtbare Anordnung der Bodenteilchen, Hohlräume, Lösungserscheinungen und Ausfällungen (SCHINNER/SONNLEITNER 1996 a, S. 71). Das Makrogefüge gliedert MÜCKENHAUSEN (1993) in drei Hauptgruppen: Das Einzelkorngefüge, das Kohärentgefüge und das Aggregatgefüge. Kultivierte Böden weisen in der Regel Mischformen der drei Hauptgruppen auf, wobei ein biogenes Aggregatgefüge, das heißt ein Krümelgefüge angestrebt wird. Bei einem „ökologisch optimalen“ Gefügezustand des Krümelgefüges spricht man nach KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDTFEGGER (1994, S. 229) auch von einem „Schwammgefüge“. Dieser Gefügezustand zeigt einen positiven Einfluss auf die Puffer-, Filter-, Regelungs-, Lebensraum-, und Produktionsfunktion des Bodens. Nach KUBIENA (1938) ist zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit - oft auch als synonym für die Produktionsfunktion gebraucht - keine andere Anordnung dem Schwammgefüge überlegen.

Älteren und neueren Arbeiten, die zu dem Schluss kommen, zwischen dem Gefügezustand der Krume und der Produktivität bestehe kein absicherbarer Zusammenhang (RID 1961, REX 1984, DUMBECK 1986, VORDERBRÜGGE 1989, KREUZER 1993, GROß 1996), liegen Versuche mit konventioneller Bewirtschaftung zugrunde. Der Einfluss des hierbei zum Einsatz kommenden, leicht löslichen Stickstoffdüngers auf die Produktivität blieb bei den Schlussfolgerungen bisher unthematisiert. Dass Bodenstruktur und Produktivität in engem Zusammenhang stehen (DIEZ 1991), ist im Bewirtschaftungssystem des ökologischen Landbaus deutlicher nachvollziehbar, da hier der Einfluss von synthetischen, leicht löslichen Stickstoffdüngemitteln entfällt und daher eine Überlagerung der Strukturwirkung durch die Düngerwirkung nicht gegeben ist. Das Erzielen eines schwammartigen Gefüges erhält aufgrund seiner positiven Eigenschaften für die Durchwurzelung und Nährstoffverfügbarkeit, im ökologischen Landbau für die Produktionsfunktion ein größeres Gewicht als bei konventioneller Bewirtschaftung.

Da die Praxis des ökologischen Landbaus den Einsatz schnell löslicher Stickstoffdünger aus Gründen des Ressourcen- und Gewässerschutzes (UBA 1997, GEIER et al. 1997, HAAS 1997), der Lebensmittelqualität (AHRENS et al. 1983, VOGTMANN/FRAGSTEIN 1984, BACKES et al. 1997), des Pflanzenschutzes (CHABOUSSOU 1987, KAUER 1993, HÖFLICH 1996, ODÖRFER/POMMER 1997, WILDENHAYN in DIERKS/HEITEFUSS 1994) sowie der Energieeinsparung (HAMPL 1991 b, HAAS / KÖPKE 1994, HAAS et al.

1995) ablehnt, sind bei dieser Bewirtschaftungsform Nährstoffnachlieferung und -verfügbarkeit für ein gesundes Pflanzenwachstum bei organischer Düngung vor allem von der Porosität des Bodengefüges, der Aktivität der Mikroorganismen und der Intensität des Wurzelwachstums abhängig. Dem Zustand der Bodenstruktur kommt eine entscheidende Bedeutung zu, da hier der Wasserhaushalt und sämtliche Lebensprozesse im Boden, vor allem aber eine effektive Nährstoffversorgung der Nutzpflanze und damit der Ertrag mit der Bodenstruktur in direkter, wechselseitiger Verbindung stehen (SOBOTIK 1989, HELAL 1991, SCHELLER 1993). Die Bodenstruktur sollte krümelig und dabei biologisch stabilisiert sein. Sie soll eine „innige, homogene, vertikale und horizontale Durchdringung des Bodens mit Wurzeln erlauben“ (LEITHOLD 2000).

In der Denkschrift „Für eine umweltfreundliche Bodennutzung in der Landwirtschaft“ des Schwäbisch-Haller Agrarkolloquiums (ROBERT BOSCH STIFTUNG 1994, S. 19) wird zur Düngerfrage allgemein folgendermaßen Stellung bezogen: *„So spielt bei der Nährstoffzugänglichkeit für die Pflanze das Bodengefüge und die Durchwurzelung eine entscheidende Rolle. Je intensiver die Durchwurzelung und je günstiger das Bodengefüge sind, um so besser ist die Ausnutzung von Boden- und Düngernährstoffen. Wann welche Nährstoffe für die Pflanzen verfügbar sind, wird stark von der Aktivität der Bodentiere und Mikroorganismen bestimmt. Diese steuern nahezu sämtliche Abbau- und Umsetzungsvorgänge im Boden und beeinflussen dadurch neben dem Humushaushalt auch die Nährstoffnachlieferung an die Wurzeln. Bodentiere und Mikroorganismen unterscheiden sich in Anzahl und Zusammensetzung je nach Art der Düngung. So fördert organische Düngung das Bodenleben wesentlich stärker als ausschließliche Mineraldüngung.“*

Gefügeuntersuchungen müssen daher soweit wie möglich die biologische Aktivität als prägenden Faktor des Gefügestandes und der Gefügestabilität mit berücksichtigen, wenn sie über bodenmechanische Beurteilungsansätze hinausgehen sollen. Neben der biologischen Stabilisierung der Aggregate (vgl. Kapitel 2.2) besteht zwischen der biologischen Aktivität und der Morphologie von Böden ein enger Zusammenhang. An der Aggregierungsform oder Krümelung des Bodens kann – indirekt und substratabhängig - die Intensität der biologischen Aktivität beurteilt werden. Der optimale Zustand des „Schwammgefüges“ lässt sich aber bisher in seinen Einzelausprägungen nicht umfassend quantifizieren. Einfachen physikalischen Methoden zur Gefügebeurteilung (Lagerungsdichte, Porenvolumen, Eindringwiderstand, Abscherwiderstand) ist gemein, dass sie sich vornehmlich auf die Beschreibung der Dichtlagerung oder die Quantifizierung der Hohlräume konzentrieren. Diese Parameter geben zur Ermittlung von

Schadverdichtungen gute Anhaltspunkte. Über das Vorhandensein eines ackerbaulich wertvollen, schwammartigen, biogenen Aggregatgefüges können sie aber nur eingeschränkt Aufschluss geben. Komplexere Methoden zur Gefügebeurteilung von der Porengrößenverteilung nach RICHARDS bis hin zu digitaler Bildanalyse (WILKENS 1992), röntgenmorphologischen Untersuchungen (WERNER 1993) und computertomographischen Untersuchungen (ROGASIK et al. 1995) sind sehr aufwendig in der Durchführung und geben ebenfalls keine Richtwerte für ein „Schwammgefüge“.

Gefügebonituren stellen eine relativ schnelle, einfache und gleichzeitig umfassende Methode dar, den Zustand des Bodens zu erfassen. Ihnen ist gemein, dass sie eine Vereinfachung der Gefügeansprache nach der bodenkundlichen Kartieranleitung bzw. der Gefügebeschreibung nach MÜCKENHAUSEN darstellen (WERNER/THÄMERT 1988, DIEZ 1991, HASINGER 1993). Die bei der Gefügebeurteilung im Gelände von HARRACH (1998) zur Ermittlung der „Packungsdichte“ empfohlene Vorgehensweise beinhaltet beispielsweise außer einer detaillierten Beschreibung einzelner Merkmale des Makrogefüges (u.a. „Zusammenhalt“ und „Lagerungsart“ der Aggregate) noch zusätzlich die Schätzung der nutzbaren Feldkapazität, die direkt mit dem Anteil an Mittelporen als wichtigem Lebensraum von Bodenorganismen verbunden ist. Darüber hinaus wird die Wurzelverteilung als „Bioindikator“ für Verdichtungen miteinbezogen. Die Gefügebonitur nach HAMPL/KUSSEL (1994, BESTE 1996, vgl. Tab. 2) lehnt sich an die Gefügebeurteilung von DIEZ (1991) an, in der die jeweils wesentlichen Aspekte von positiven und negativen Gefügedefinitionen, einfach formuliert, mit „günstig“ und „ungünstig“ bewertet werden. Die Krümelung des Bodens ist dabei zentraler Beurteilungsfaktor.

Tab. 2: Boniturbogen für die Gefügebönetur nach HAMPL/KUSSEL 1994

Horizont	Erscheinungsbild	Gefübenote
	rauh-rundlich-krümelig, durchport, keine Verschlämmung, keine Krusten, Wurmkot	2
	- Übergangsbereich -	1,5
Oberfläche	kantig-bröckelig, beginnende Krusten	1
	- Übergangsbereich -	0,5
	Krusten, Verschlämmung, Versiegelung	0
	über 80% Krümelgefüge	2
	- Übergangsbereich -	1,5
Oberkrume	Mischgefüge aus Krümeln und Bröckeln	1
	- Übergangsbereich -	0,5
	Mischgefüge aus Bröckeln und Klumpen	0
	Mischgefüge aus Krümeln und Bröckeln	2
	- Übergangsbereich -	1,5
Unterkrume	Mischgefüge aus Bröckeln und Klumpen	1
	- Übergangsbereich -	0,5
	scharfkantiges Gefüge	0
	gut durchportetes Gefüge mit unregelmäßig-runden Oberflächen (ungestörtes Lößgefüge mit Nadelstichporen)	2
	- Übergangsbereich -	1,5
Unterboden	grobprismatisches, wenig durchportetes Gefüge mit deutlich glatten Flächen	1
	- Übergangsbereich -	0,5
	Plattengefüge, kaum Poren	0

HAMPL/KUSSEL (1994) nehmen im Vergleich zu DIEZ nochmals deutliche Vereinfachungen vor. Sie untergliedern ihre Bonitur darüber hinaus in praxisübliche Bearbeitungshorizonte. Der Unterboden repräsentiert hierbei nicht den C-Horizont, sondern den nicht durch die Grundbodenbearbeitung beeinflussten Horizont.

Für jeden Horizont liefern sie verbal kurz beschriebene Vergleichsbilder und ordnen ihnen eindeutig wertende Noten zu. Dabei entfernen sich die Wertmaßstäbe zum Unterboden hin von der Forderung eines optimalen Schwammgefüges. Die vertikale Maßstabsänderung orientiert sich dabei an der natürlichen Horizontierung der charakteristischen Lebensräume von Bodenbiozöosen im Boden wie von GISI (1997) beschrieben.

Bei der Bewertung komplexer Systeme können Definitionen von Optimalzuständen (Soll-Zustand) „Richtwert“-charakter übernehmen (vgl. KÄMPF 1953). Darüber hinaus bieten sich definierte Vergleichsbilder auch für Zwischenstufen und Negativzustände an. Die Beurteilung erfolgt dabei nicht nach einer ausführlichen Beschreibung des Einzelfalls, sondern durch die Entscheidung für eine möglichst passende Zuordnung zu vorgegebenen wesentlichen Merkmalen. Die genaue aktuelle Ausprägung einzelner Details steht nicht im Vordergrund, sondern die relative Abweichung vom Optimalzustand. Diese Vergleichsbeurteilung erleichtert und beschleunigt die Entscheidungsfindung und führt auch bei geringer fachlicher Vorbildung zu gleichmäßigen Ergebnissen. Die Gefügebönotur nach HAMPL/KUSSEL (1994) erscheint daher aus folgenden Gründen für eine differenzierte Gefügebönotur geeignet:

- Die Beurteilung des Gefügebönoturzustands erfolgt nicht über die Quantifizierung physikalisch-räumlicher Parameter (z.B. Porenanzahl und -größe, Anzahl Regenwurmröhren), sondern über das Abweichen des Ist-Zustandes vom Soll-Zustand. Der Soll-Zustand (bei HAMPL/KUSSEL jeweils die Note 2) legt den Schwerpunkt auf morphologische Merkmale, die hohe biologische Aktivität signalisieren;
- der bildhaft beschriebene Soll-Zustand steht als „Richtwert“ für einen komplexen, funktionsbezogenen Optimalzustand nach aktuellem Kenntnisstand und lässt eine schnellere Einordnung zu als einzelne Soll-Werte. Merkmalsvorgaben (hier: „Erscheinungsbilder“) vereinfachen darüber hinaus die Einordnung zu oder zwischen Optimal- und Negativzuständen und erleichtern dadurch die Entscheidung auch bei geringer fachlicher Vorbildung;
- die nach Horizonten gegliederte und qualitativ differenzierte Maßstabsskala berücksichtigt natürliche charakteristische Lebensräume von Bodenbiozöosen und ihre Beeinflussung durch die Nutzung (v.a. Bodenbearbeitung) nach aktuellem Kenntnisstand. Dabei entfernt sie sich zum Unterboden hin immer mehr von der Forderung eines „Schwammgefüges“ und

geht so in ihrer Differenzierung und Praxisnähe über die Gefügebeurteilung von DIEZ hinaus.

Als Ergebnis der 1995 vorgenommenen Untersuchungen mit der Gefügebonitur nach HAMPL/KUSSEL (BESTE 1996) erfolgte im Vorfeld dieser Arbeit eine Differenzierung der verbalen Merkmalsumschreibungen in Anlehnung an HASINGER (1993) und an eigene Beobachtungen sowie eine Verbesserung der Noteneinteilung hinsichtlich statistischer Aspekte (vgl. Tab. 5, Kapitel 3.3.1).

2.2 Aggregatstabilität

Der in der bäuerlichen Praxis positiv geprägte Begriff „Bodengare“ stand lange Zeit für den optimalen Gefügezustand eines produktiven Bodens und war landwirtschaftlicher Beurteilungsmaßstab (SEKERA/BRUNNER 1943, FRESE 1958). Nach SEKERA (1984, S. 15) versteht man unter „*Bodengare die Lebendverbauung der Krümelstruktur durch die bodenständigen Mikroorganismen*“ (vgl. auch FRESE 1958, S. 117). Nach SEKERA/BRUNNER (1942) und KULLMANN (1956) beinhaltet die Beurteilung der „Bodengare“ neben der statischen Überprüfung des Zustandes auch die Überprüfung der „Krümelbeständigkeit“, die den dynamischen Aspekt des Bodenzustandes beschreibt. Auch BAEUMER (1991) empfiehlt neben dem Vergleich zwischen Ist- und Soll-Werten des Bodenzustands die Überprüfung bodenfruchtbarkeitsbestimmender Prozesse zur Klärung von Kausalzusammenhängen. Als Abbildung natürlicher Vorgänge im Boden ist vor allem die Stabilität von Aggregaten gegenüber Wasser wichtig. Sie ist entscheidend für die Anfälligkeit eines Bodens gegenüber äußerer und innerer Erosion sowie Verdichtung.

MÜCKENHAUSEN (1993) definiert Aggregate als separate Bodenkörper, die durch Segregation oder Aggregation aus dem Kohärent- oder Einzelkorngefüge hervorgehen. Unter Segregation lassen sich dabei vorwiegend physikalische Prozesse zusammenfassen, deren gemeinsames Merkmal die Bildung von Segregaten durch die Aufteilung von Kohärentgefüge ist, z.B. Schrumpfung durch Austrocknung oder Sprengung durch Frosteinwirkung. Dabei entstehen in erster Linie Aggregate - oder Segregate im engeren Sinne - die scharfkantig, glattflächig und von polyedrischer oder prismatischer Form sind. Bei stark kalkhaltigen oder tonhaltigen Böden können diese recht stabil sein, wobei dies kein Zeichen hoher biologischer Aktivität ist (vgl. auch LIEBEROTH 1969 und KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDT-FEGER 1994).

Unter Aggregation versteht man zum einen die physikalisch-chemische Zusammenballung von Bodenteilchen. Durch Koagulation, d.h. durch die Ausfällung von Bodenkolloiden, entstehen Mikroaggregate (SCHACHTSCHABEL/HARTGE 1958). Daran beteiligt sind die Ton-Humus-Komplexe, desweiteren hängt die Verkittungstendenz vom Kolloidzustand, der Kalzium- und Magnesiumversorgung und - vor allem bei Böden des tropischen Klimabereiches - dem Vorhandensein von Eisen- und Aluminiumoxiden ab (CHESTERS et al. 1957, MÜLLER-SÄMANN 1986, MÜCKENHAUSEN 1993). Zum anderen versteht man unter Aggregation die biologische Verbauung der Mikroaggregate und Bodenteilchen durch Wurzeln, (TISDALL/OADES 1982) organische Substanzen, Bodentierexkremete, Pilzhyphen und Ausscheidungssubstanzen (u.a. Polysaccharide) von Bakterienkolonien zu Meso- und Makroaggregaten (ANDERSON 1991, KANDELER/MURER 1993). Das Ausmaß der biogenen Stabilisierung von Aggregaten hängt von der Belebtheit des Bodens und seiner Humusversorgung ab. Dabei ist zu beachten, dass nicht die absolute Menge an organischer Substanz ausschlaggebend für eine gleichbleibende Stabilität ist, sondern dass die Zusammensetzung eine ebenso große Rolle spielt (SCHINNER/SONNLEITNER 1996 a). Stark vereinfacht betrachtet, ist das Verhältnis von Nährhumus zu Dauerhumus entscheidend für die Persistenz der Stabilisierung. CHESTERS et al. (1957) und LYNCH (1983) konnten darüber hinaus Aggregatbildung und -stabilisierung nur bei gleichzeitiger Präsenz von Kohlenstoffquellen und Mikroorganismen finden.

Mit dem Begriff Krümel wird überwiegend die Aggregierungsform der biologischen Verbauung zu Meso- und Makroaggregaten bezeichnet, wenn die Gebilde nach KULLMANN (1958, S. 9) *„abgerundete Kanten sowie rauhe, poröse Oberflächen besitzen und nicht längs vorgebildeter Spalten aufbrechen, sondern in Mikroaggregate zerfallen, die eine Beschaffenheit ähnlich den Mesoaggregaten aufweisen“*. Krümel können nach SCHINNER/SONNLEITNER (1996 a, S. 87) Durchmesser von < 1 - 10 mm aufweisen. Diese Größenordnung bezeichnet auch TEIWES (1988, S. 45) als den *„Anteil ackerbaulich wertvoller Aggregate“*. Genaue Angaben über die für die Ermittlung der Aggregatstabilität zu bevorzugenden Aggregatgrößen gibt es in der Literatur nicht. In den meisten Forschungsarbeiten wird die Aggregatstabilität gegenüber Wasser im Bereich < 10 mm ermittelt (CHESTERS 1957, CZERATZKI 1957, SUNKEL 1961 b, ASPIRAS et al. 1971, KEMPER et al. 1985, HÖVELMANN/FRANKEN 1993, KANDELER/MURER 1993, MURER et al. 1993, TIPPKÖTTER 1993, DEBOSZ et al. 1998).

SEKERA/BRUNNER (1943, S. 170) bezeichnen das Vorherrschen von 1-3 mm großen Krümeln als positives Merkmal des Strukturzustands und ziehen zur Ermittlung der Aggregatstabilität in ihrer Methode „Verschlammungsbild als qualitative Schnellmethode“ die Aggregatgrößenklassen 1-2 mm und 2-3 mm heran.

Die Schälchenmethode nach HAMPL/KUSSEL (1994 und BESTE 1996) stellt eine schematisierte Weiterentwicklung der SEKERA/BRUNNER-Methode der Aggregatverschlammung dar. Bei aktueller Bodenfeuchte werden Aggregate zwischen 2 und 3 mm Größe mit Wasser überstaut. Jedes Aggregat wird nun nach folgenden Verschlammungsbildern benotet (vgl. Kapitel 3, Abb. 14):

- Aggregat zerfällt nicht oder nur in wenige große Bruchstücke, Wasser klar Note 2
- Aggregat zerfällt in mehrere kleine Bruchstücke, Wasser noch klar Note 1
- Aggregat zerfällt ganz, Wasser getrübt Note 0

Mit Hilfe der Noten lässt sich die erreichbare Stabilität in Prozent errechnen.

Im Gegensatz zur allgemein üblichen Praxis der Vortrocknung der Aggregate wird die aktuelle Bodenfeuchte bei der Methode nach HAMPL/KUSSEL (1994) beibehalten. Dieses Vorgehen beruht auf der Zielsetzung, den Bodenzustand und die Anfälligkeit für Verschlammung möglichst aktuell abzubilden. Die aktuelle Bodenfeuchte, abhängig von Substrat und Gefügeausprägung hat Auswirkung auf die Aggregatstabilität. Die mit einer Vortrocknung erreichte Nivellierung von Unterschieden stellt zum einen eine Verfälschung des Ausgangszustandes und zum anderen eine Beeinflussung dar, die nicht den natürlichen Belastungen im Feld entspricht. Die Trocknung von Aggregaten kann deutliche Veränderungen des Stabilitätsverhaltens der Aggregate durch Luftspregung (WICHTMANN 1955, HENK 1989, AUERSWALD 1992, POTRATZ 1993, GÄTH 1995, ROTH 1996), den Rückgang der Pilzhyphenlänge und der Bakterienzahlen (WEST et al. 1987) sowie Verluste der biologischen Aktivität (DUTZLER-FRANZ 1977) nach sich ziehen. Bei wiederbefeuchteten Aggregaten fand WICHTMANN (1955), dass die Stabilität stark von der Art des vorangegangenen Trocknungsvorgangs beeinflusst wurde.

Die natürlichen Verhältnisse des Aggregatzustands scheinen also durch Manipulation der Bodenfeuchte stark beeinträchtigt zu werden. Die Proben für die vorliegende Arbeit wurden daher nicht durch Trocknen oder Wiederbefeuchten auf einen gleichen Feuchtegehalt gebracht, sondern bei aktueller Feuchte untersucht, da die aktuelle Belastbarkeit des Bodens mit besonderer Berücksichtigung der biologischen Stabilisierungseffekte überprüft werden sollte. Aufgrund der Beeinflussung der Stabilitätseigenschaften von Aggregaten durch Kalzium-, Natrium- oder

Chlorionen im Trinkwasser erfolgte die Verschlammung möglichst naturnah mit Regenwasser (aus dem gleichen Grund wird von KULLMANN (1956) destilliertes Wasser empfohlen). Im Vergleich zu den heute überwiegend durchgeführten Methoden der Aggregatstabilitätsmessung (Naßsiebung DE LEENHEEER/DE BOODT 1954, KEMPER/ROSENAU 1986, SCHLICHTING/BLUME 1995; Perkulationsmethode SEKERA/BRUNNER 1943, BECHER/KAINZ 1983), die aufwendige Versuchsaapparaturen und eine intensive Probenvorbehandlung voraussetzen, bietet die „Schälchenmethode“ nach HAMPL/KUSSEL (1994) folgende Vorteile:

- Schnelligkeit,
- unmittelbare Begreifbarkeit sowie geringe Probenbehandlung,
- Einfachheit in der Anwendung und Ergebnisvermittlung.

Als Ergebnis eigener Untersuchungen mit der Schälchenmethode zeigte sich aber auch hier das Problem aller Methoden zur Messung der Aggregatstabilität, nämlich, dass die alleinige Prüfung auf Stabilität gegenüber Wasser zu missverständlichen und im Hinblick auf die Bodenfunktionen falschen Schlussfolgerungen führen kann, da auch innere Verdichtungen oder ein hoher Tongehalt Ursache der Stabilität sein können (CZERATZKI 1957, MULLA et al. 1992, BERNARD/LEPKE 1996, BESTE 1996, ROTH 1996). Nach KULLMANN (1956) sind solchermaßen stabilisierte Aggregate von „geringerem landwirtschaftlichen Wert, da ihnen die Porosität fehlt“ und nach UBA (1998) reduzieren dichte Aggregate „das Versorgungspotential für die Pflanzen aufgrund des verminderten Austauschvermögens“. Für alle bekannten Methoden der Aggregatstabilitätsmessung gilt demnach, dass sie Aussagen zur Stabilität zulassen, jedoch allein keine Rückschlüsse auf gute oder schlechte Struktureigenschaften von Böden ermöglichen.

Die Gefügebonitur liefert in der ESD Anhaltspunkte dafür, auf welche Ursache eine hohe Aggregatstabilität zurückzuführen ist. Die Einschätzungen mit Hilfe der Vergleichsbilder sind aber unter Umständen nicht differenziert genug. Für eine differenzierte Beurteilung des Gefüges mit Schwerpunkt auf der biologischen Aktivität ist es von großer Bedeutung, in welchem Maße die Stabilität der Aggregate auf kolloidchemische, verdichtungsbedingt physikalische, oder biologische Faktoren zurückzuführen ist. Unter Zugrundelegung der Annahme, dass polyederartige, gering durchporete Aggregatformen im Vergleich zu schwammartigen, krümeligen, porösen Aggregatformen ein geringeres Maß an biogener Stabilisierung aufweisen (SUNKEL 1961, BLUME/BEYER 1996), kann die Morphologie der Aggregate Hinweise auf die Entstehungsform geben (vgl. Tab. 6, Kapitel 3.3.2). Die Annahme basiert auf der Beschreibung der von

Mikroorganismen, Wurzeln und Pilzhyphen bevorzugten Porenbereiche in Makroaggregaten >1 mm (SCHIN-NER/SONNLEITNER 1996 a, S. 98 ff.). CZERATZKI (1957) fand bei Krümelgrößen von 2-5 und 5-8 mm eine größere Abhängigkeit der Aggregatstabilität vom Jahresgang der mikrobiellen Aktivität als in der Fraktion 0,2-1 mm. Neuere Arbeiten beschreiben einen engen Zusammenhang zwischen dem Jahresgang der Aggregatstabilität und der mikrobiellen Aktivität (eine ausführliche Literaturübersicht findet sich bei ANDERSON 1991). Demnach bilden größere Aggregate die biologische Stabilisierungsdynamik vermutlich besser ab. Nach TISDALL/OADES (1982), OADES (1984) und ANDERSON (1991) steigt mit der Größe der Aggregate der Anteil an biogenen Stabilisierungsfaktoren an, während bei Aggregaten < 2 mm kolloidchemische, chemische und physikalische Faktoren überwiegen (vgl. auch CHESTERS et al. 1957). Eine daher als Vorversuch der Forschungsarbeit durchgeführte Testreihe mit Aggregaten der Größe 2-3 mm und 3-5 mm ergab deutlichere Unterschiede zwischen Dauerbrache- und Ackerboden bei der Gruppe 3-5 mm (vgl. Anhang, Tab. 1). Die Tests der Aggregatstabilität werden daher für die Krumenhorizonte mit der Fraktion 3-5 mm durchgeführt. Für die Oberfläche werden aus Gründen der Praxisnähe weiterhin 2-3 mm große Aggregate verwendet, da größere Fraktionen hier kaum existierten und biologische Stabilisierungsmechanismen bei den Aggregaten der Oberfläche aufgrund der extremen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen in den Hintergrund treten.

2.3 Wurzeldichte

Die Durchwurzelung des Bodens steht mit dem Gefüge in dynamischer Wechselbeziehung. Wurzeln brauchen für ein ausgeglichenes, vertikales und horizontales Wachstum das Hohlraumsystem eines unverdichteten Gefüges, wobei die Toleranzen gegenüber Verdichtung je nach Pflanzenart schwanken (HAUG/SCHUHMANN/FISCHBECK 1990, S. 138 ff.). Soll die Nährstoffversorgung der Nutzpflanze ohne chemisch-synthetische Düngemittel erreicht werden, ist eine gute Durchwurzelung darüber hinaus von essentieller Bedeutung für den Ertrag. Der Übergangsbereich von der Krume zum Unterboden ist für die Nährstoff- und Wassererschließung von besonderer Bedeutung (HAUG/SCHUHMANN/FISCHBECK 1990, HARRACH/VORDERBRÜGGE 1991, MEUSER 1991). Die von HAMPL/KUSSEL (1994) in die ESD integrierte Zählung der Wurzeldichte im Unterboden (40 cm Tiefe) berücksichtigt diesen Übergang in besonderem Maße. Sie stellt eine Abwandlung der Bohrkernmethode nach HELLRIEGEL (in BÖHM 1979 und in KÖPKE 1979) dar, bei der die austretenden Wurzelspitzen beider Teile eines auseinandergebrochenen Bohrkerns gezählt werden. Nach KÖPKE

(1979) bestehen relativ enge Korrelationen zwischen der Anzahl der Wurzeln an der Bruchfläche und der Wurzelmasse bzw. Wurzellänge im Bohrkern. Der bei HELLRIEGEL gegebene Bezug zum Durchmesser des Bohrers wird in der Methode nach HAMPL/KUSSEL durch einen Flächenbezug mittels Schablone ersetzt. Die Aussagekraft von Wurzelzählungen mit der Bohrkernmethode hängt aufgrund der natürlichen Heterogenität der Durchwurzelung stark von der Stichprobenmenge ab (KÖPKE 1979). Die ESD als Kombinations-Methode mit qualitativem Schwerpunkt kann allerdings nicht sehr stichprobenintensiv durchgeführt werden. Eine Einschätzung der Aussagekraft der Wurzelzählung als Teilmethode der ESD bei geringer Stichprobenmenge konnte nach ersten Untersuchungen (BESTE 1996) noch nicht vorgenommen werden.

2.4 Bodenfeuchte, Porenvolumen und Lagerungsdichte

Zur Ergänzung der durch die Gefügebonitur gewonnenen Ergebnisse werden die Standardparameter Bodenfeuchte, Porenvolumen und Lagerungsdichte mit Hilfe der gravimetrischen Methode erhoben.

Die Bodenfeuchte beeinflusst die Gefügestruktur, die Aggregatstabilität und den Scherwiderstand. Diese Parameter können nur im Zusammenhang mit der Bodenfeuchte beurteilt werden. Darüber hinaus kann die Bodenfeuchte Hinweise auf das Wasseraufnahme- und Speichervermögen eines Bodens geben. Neben Textur, Niederschlag und/oder Kondensation und dem Abstand zum Grundwasser sind Pflanzendecke und Bodengefüge bewirtschaftungsabhängige beeinflussende Faktoren. Durch nicht angepasste Bewirtschaftung verdichtete Böden haben bei gleichen klimatischen Voraussetzungen und gleicher Pflanzendecke eine geringere Wasseraufnahme- und speicherkapazität als schonend gelockerte und biologisch stabilisierte Böden des gleichen Bodentyps. Biologisch erzeugte Mittel- und Grobporen eines „optimalen Schwammgefüges“ (KUNTZE ET AL. 1994, nicht zu verwechseln mit technisch überlockertem Gefüge nach der Bodenbearbeitung) erlauben eine optimale Ausnutzung des Speichervermögens bei gleichzeitig ausreichender Belüftung und Bereitstellung von Lebensräumen für Mikroorganismen und deren Stoffwechselprozesse (LIEBEROTH 1969, MÜCKENHAUSEN 1993, SCHINNER/SONNLEITNER 1996 b).

Gesamtporenvolumen und Lagerungsdichte geben substratspezifische Hinweise auf Verdichtungen oder Überlockerungen. Durch die Kombination mit diesen Standardparametern lassen sich die Ergebnisse der ESD zusätzlich besser in den Kontext anderer Bodenuntersuchungen einordnen, da die Lagerungsdichte eine oft verwendete Bezugsgröße ist.

2.5 Abscherwiderstand

Der Abscherwiderstand gilt als Maß für die Festigkeit der Bodenstruktur (SCHAFFER 1960). Tonanteil und Bodenfeuchte sind beeinflussende Faktoren und müssen zur Beurteilung des Abscherwiderstands hinzugezogen werden. Abrupte Änderungen in der Dichtlagerung, wie sie beim Pflugeinsatz am Übergang zum Unterboden häufig beobachtet werden, werden nach UBA (1998) bei gleicher Bodenfeuchte gut erfasst. Nach eigenen Erfahrungen werden sie im Vergleich mit der Ermittlung des Porenvolumens durch die Messung des Abscherwiderstandes - gleiche Bodenfeuchte vorausgesetzt - sensibler erfasst (BESTE 1996). Die Konzentration auf einzelne physikalische Messgrößen erscheint unter diesem Gesichtspunkt einer Kombination in der Aussagekraft unterlegen (UBA 1998).

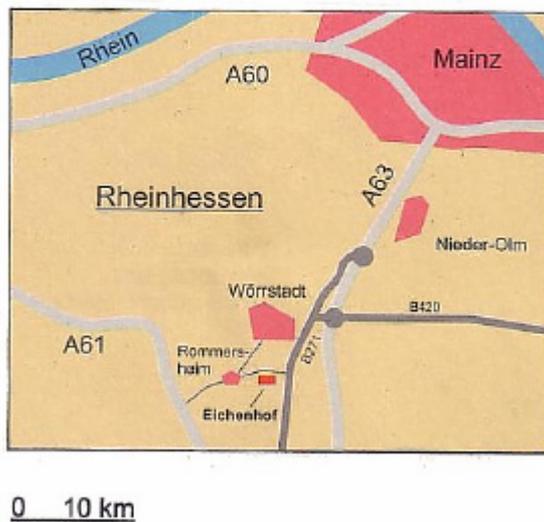
3 Material und Methoden

3.1 Standort

3.1.1 Naturräumliche Grundlagen

Der Versuchsstandort liegt im zentralen Rheinhessen auf einer Anhöhe (230 m ü. NN), 1 km südlich von Wörstadt, im Rhein Hessischen Tafel- und Hügelland (vgl. Abb. 5).

Kartenausschnitt:

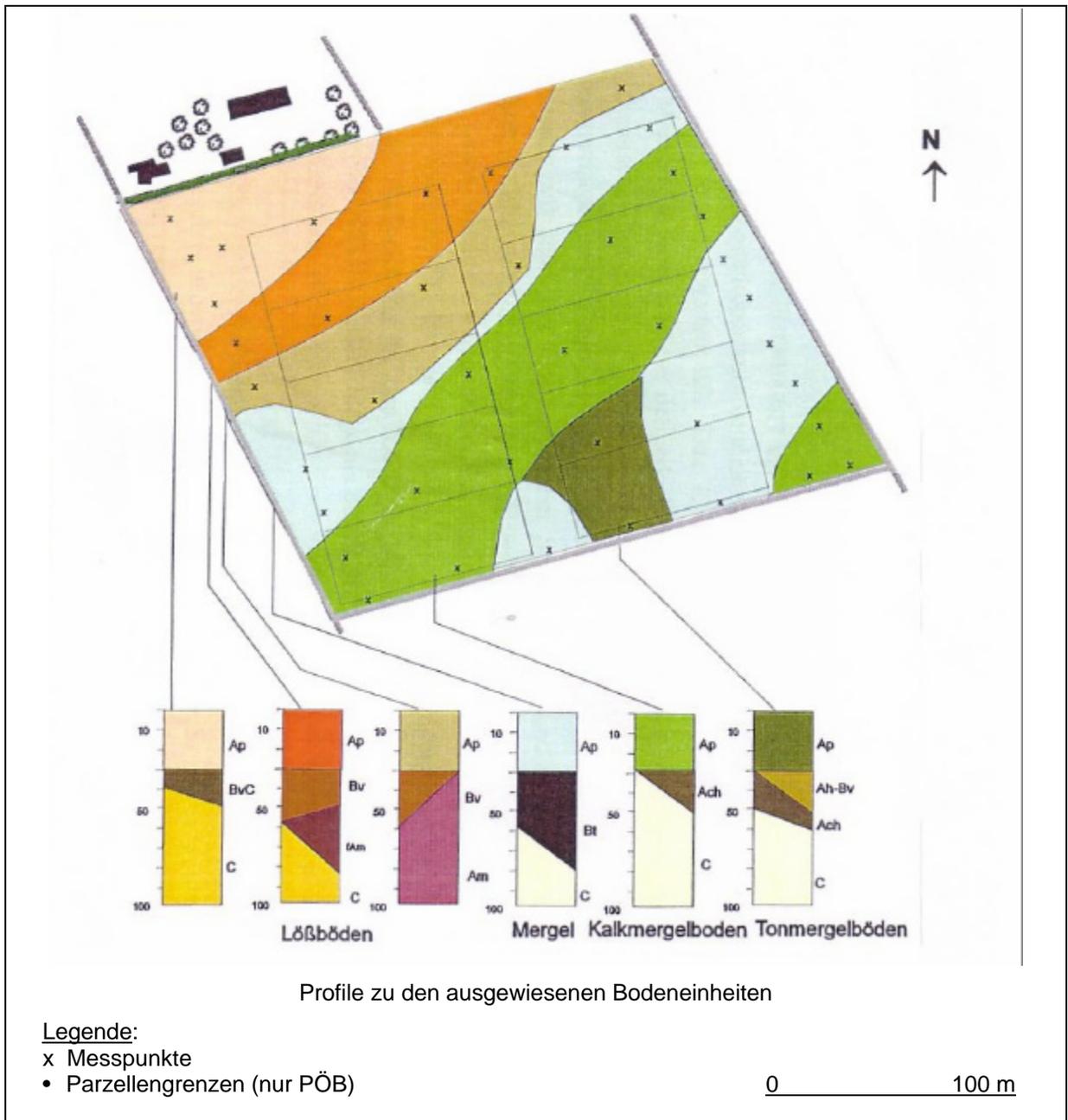


(Entwurf: GREIS in BESTE/HAMPL 1999)

Abb. 5: Lage der Projekt-Versuchsflächen auf dem Eichenhof in Rheinhessen

Den geogenen Untergrund des Versuchsstandortes bilden Kalke und Mergel des Miozän. Den nordwestlichen Teil überdecken pleistozäne Lößauflagen. Im südöstlichen Teil der Versuchsfläche finden sich Kalkmergelschichten im Bereich der Bodenbildung. Den Kuppenbereich (südöstlich) bilden Rendzinen, während am Unterhang Kolluvium (nordwestlich) vorliegt (BUCHMANN 1994, vgl. Abb. 6 und Anhang, Text 1). Der Boden lässt sich insgesamt bis 60 cm Tiefe als schluffig-toniger bis toniger Lehm bezeichnen (vgl. Anhang, Tab. 29 und 46). Aus dem während der letzten Kaltzeit als äolisches Sediment auf weiten Flächen Rheinhesens zur Ablagerung gekommenen Löß entwickelten sich unter dem Einfluss des postglazialen

Steppenklimas und infolge der Klimaerwärmung im Holozän Schwarzerden (Tschernoseme). Für die Tschernoseme des Mainzer Beckens ist der hohe Carbonatgehalt im A-Horizont charakteristisch (LUDWIG 1977, MÜCKENHAUSEN 1993). Die Lößlehmböden Rheinhessens sind aufgrund ihrer guten Basenversorgung und dem hohen Schluffanteil sehr fruchtbar und erreichen Bodenzahlen von 80-90.



(Entwurf: VOIGT 1998 nach BUCHMANN 1996)

Abb. 6: Bodenkarte der Versuchsflächen

Die chemische Bodenuntersuchung ergab folgende Durchschnittswerte für die Versuchsflächen (vgl. Tab. 3, nach EMMERLING 1995 und Anhang, Tab. 47):

Tab. 3: Durchschnittliche bodenchemische Eigenschaften der Versuchsflächen PÖB (Ap-Horizont)

$CaCl_2$ -pH	% N_i	% C_{org}	C/N	CAL- P_2O_5 mg/100g	CAL- K_2O mg/100g	CAL- MgO mg/100g	$CaCO_3$
7,55	0,18	1,93	10,7	17,6	54,9	135,9	16,0%

Die hohen Kaliumwerte werden darauf zurückgeführt, dass Tonminerale bei pH-Werten von 7,5 hohe Mengen an Kalium fixieren können, die hohen Mg-Gehalte ergeben sich durch Mergelbeimengungen im Boden (EMMERLING 1995).

Klimatisch ist Rheinhessen durch die Leelage zum Hunsrück vor direkten maritimen Klimateinflüssen geschützt, was eine schnelle Erwärmung im Frühjahr und eine starke Aufheizung im Sommer mit sich bringt. Die Jahresdurchschnittstemperatur des sehr milden Klimas beträgt 10°C. Die orographischen Verhältnisse führen infolge des Föhneffektes gleichzeitig zu Niederschlagsarmut (500 - 600 mm im Jahr) (KANDLER 1977). Abbildung 7 zeigt die Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag während des Untersuchungszeitraums.

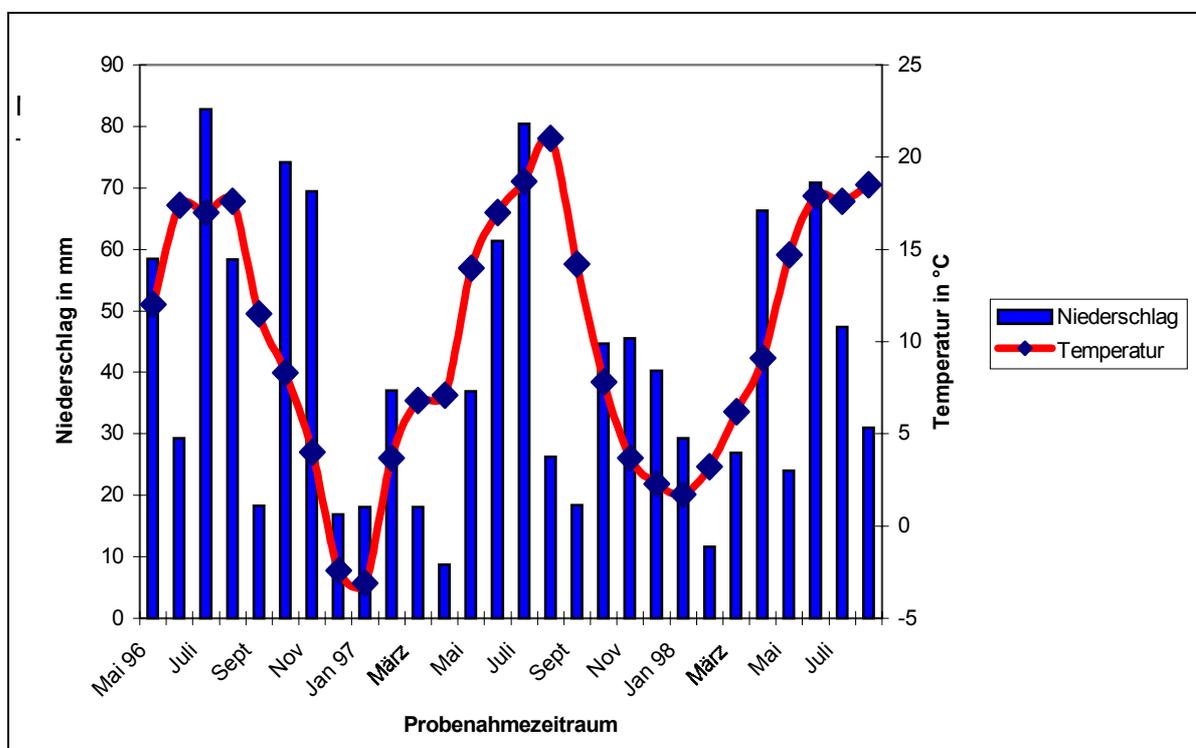


Abb. 7: Monatsmittelwerte für Niederschlag und Temperatur während des Untersuchungszeitraums

3.1.2 Projekt *Ökologische Bodenbewirtschaftung (PÖB)*

Das „Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung“ wird von der Stiftung Ökologie & Landbau, Bad Dürkheim, gemeinsam mit der Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Mainz, durchgeführt und vom Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz gefördert.

Es dient der Demonstration von Bodenbewirtschaftungsverfahren, die die Erhaltung und Förderung des ökologischen Gleichgewichtes von Agrarökosystemen zum Ziel haben, sowie der Vermittlung entsprechender Beratungsinhalte und -methoden an die staatliche Landwirtschaftsberatung in Rheinland-Pfalz. Projektbeginn war 1994, die geplante Laufzeit beträgt zehn Jahre (HAMPL 1996b). Der Schwerpunkt des Projektes liegt auf der Untersuchung unterschiedlicher Grundbodenbearbeitungsvarianten in ökologischer Fruchtfolge hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Ökosystem Boden und ihrer Anwendbarkeit im ökologischen Landbau. Zur praxisnahen Demonstration und Erforschung unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren wurden die Versuchspartellen in einer Ausdehnung von 12 x 100 m angelegt. Die Kulturen einer fünfgliedrigen Ackerbaufruchtfolge (Grünbrache, Winterweizen mit nachfolgender Zwischenfrucht, Erbsen, Winterroggen mit nachfolgender Zwischenfrucht, Sommergerste) sind in zweifacher Wiederholung mit jeweils drei Bodenbearbeitungsvarianten angelegt, so dass der Versuch insgesamt 30 Partellen umfasst. Grünbrache und Zwischenfrüchte sind leguminosenbetonte Gründüngungsgemenge mit hoher Wurzelleistung zur Bodenregeneration. Die Grundbodenbearbeitung findet im Sommer jeweils nach Getreide statt und wird zur Stabilisierung der gelockerten Krume mit der anschließenden Ansaat von Gründüngungsgemengen kombiniert. In der fünfgliedrigen Fruchtfolge wird somit in drei von fünf Jahren jeweils nach Winterweizen und Winterroggen vor Zwischenfrucht sowie nach Sommergerste vor Grünbrache die differenzierte Grundbodenbearbeitung durchgeführt (HAMPL 1996b).

Varianten der Grundbodenbearbeitung:

- **P** Pflug (krumentief wendend in 30 cm Tiefe)
- **SP** Zweischichtenpflug (flach wendend in 15 cm, tief lockernd in 30 cm Tiefe)
- **SG** Schichtengrubber (nicht wendend, lockernd in 30 cm Tiefe)

3.2 Versuchsanordnung

Ausgehend von den genannten Hypothesen (vgl. Kapitel 1.2) wurden zwei Versuchsansätze mit unterschiedlichen Variationsbedingungen erstellt, um anhand der unterschiedlichen Auswirkungen der Fruchtfolge und der Bodenbearbeitung die Empfindlichkeit und Eignung der ESD zu testen:

Versuchsansatz 1:

Vergleichende Untersuchung zur Auswirkung der Fruchtfolgedynamik bei ökologischer Bewirtschaftung auf die Gefügedynamik;

Versuchsansatz 2:

Vergleichende Untersuchung zur Auswirkung von Grünbrache und Roggen sowie nicht wendender, flach wendender und krumentief wendender Grundbodenbearbeitung bei ökologischer Bewirtschaftung auf die Gefügedynamik

Innerhalb Versuchsansatz 1 fand der Vergleich anhand der Parameter Gefüge, Aggregatmorphologie, Aggregatstabilität und Bodenfeuchte statt. Die Probenahme erfolgte von Mai 1996 bis Juli 1998 im Mai und Juli 1996, im März, Mai, Juli und September 1997 und im März, Mai und Juli 1998, (die Probenahmen in September 1996 und 1998 entfielen wegen heftigen Niederschlägen (z.T. Schnee). Die differenzierte Grundbodenbearbeitung wurde miterfasst.

Innerhalb Versuchsansatz 2 wurde in den Jahren 1996, 1997 und 1998 jeweils im Mai eine umfassende Erweiterte Spatendiagnose vorgenommen.

Die Untersuchungen und Probenahmen fanden innerhalb des Projektes Ökologische Bodenbewirtschaftung (PÖB) statt.

Innerhalb des Versuchsansatzes 1 wurde auf den Versuchsflächen des PÖB die Fruchtfolge-sequenz Sommergerste, Grünbrache, Winterweizen in zweifacher Wiederholung beprobt. Die für jede Frucht vorhandenen 3 Grundbodenbearbeitungsvarianten wurden dabei ebenfalls getrennt erfasst (vgl. Abb. 8). Die differenzierte Grundbodenbearbeitung fand während dieses Zeitraums im Spätsommer 1996 vor der Ansaat der Grünbrache statt. Das Ausgangssubstrat ist Löß, Löß auf Mergel bzw. Löß auf Kalk- und Tonmergel (vgl. Abb. 6).

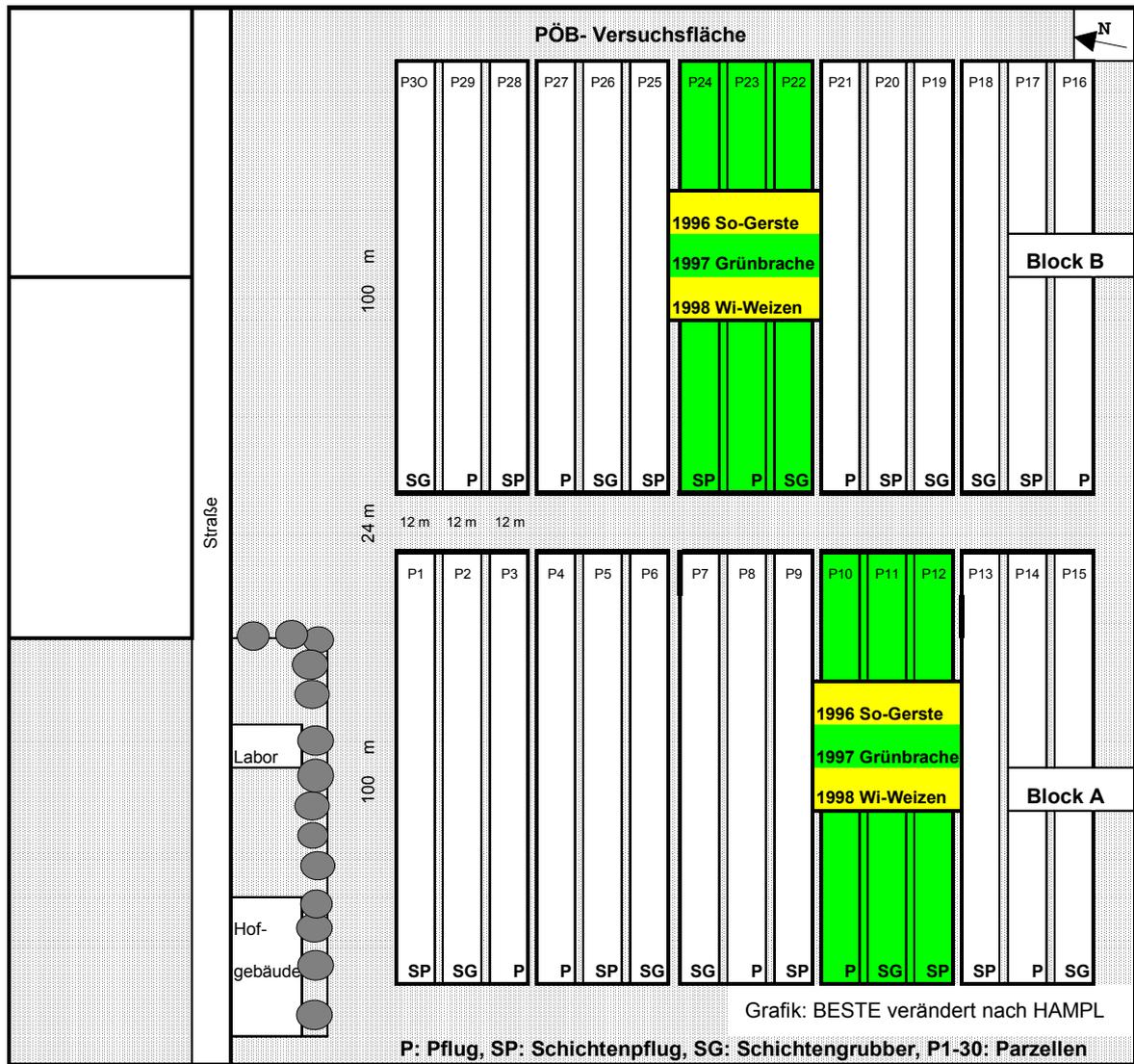


Abb. 8: Versuchsflächen des Versuchsansatzes 1

Die Versuchsflächen des PÖB werden nach den Richtlinien der AGÖL ökologisch bewirtschaftet (AGÖL 1998). Bis zum Herbst 1994 befanden sie sich unter integrierter Bewirtschaftung (vgl. Tab. 4).

Tab. 4: Vorgeschichte der ökologisch bewirtschafteten Flächen des PÖB bis 1993

Maßnahmen	Ökologische Bewirtschaftung seit 1994	Vorhergehende integrierte Bewirt- schaftung bis 1993
Düngung	Organische Düngung (Gründüngung, Stroh)	Mineralische und organische Düngung (Kalkammonsalpeter/ Schweinegülle)
Grundbodenbearbeitung	3 Bearbeitungsvarianten, getrennt, im Sommer jeweils vor Grünbrache oder Zwischenfrucht	wendende und nicht wendende Grundbodenbearbeitung nach Einschätzung, i. d. R. im Herbst
Fruchtfolge	60% Getreide, 40% Leguminosen (Grünbrache) und Zwischenfrüchte	80% Getreide und 20% Hackfrucht, ohne Zwischenfrüchte (Zeitraum: 1990-1993)
Unkrautregulierung	Striegel, Zwischenfrüchte	Chemische Unkrautregulierung
Einsatz von Bioziden	nein	ja
Düngung mit tierischen Exkrementen	nein	ja (Schweinegülle)

(Quelle: HAMPL 1996b und KUSSEL 1999)

Innerhalb des Versuchsansatzes 2 wurden jeweils in den Jahren 1996, 1997 und 1998 die Parzellen unter Grünbrache und Roggen (zwei Wiederholungen, je drei Grundbodenbearbeitungsvarianten) beprobt, wobei mit den Früchten jährlich von Parzelle zu Parzelle rotiert wurde. Die Bodenverhältnisse waren daher entsprechend der PÖB-Versuchsfläche teilweise (v.a. im Unterboden) wechselnd (vgl. Abb. 9).

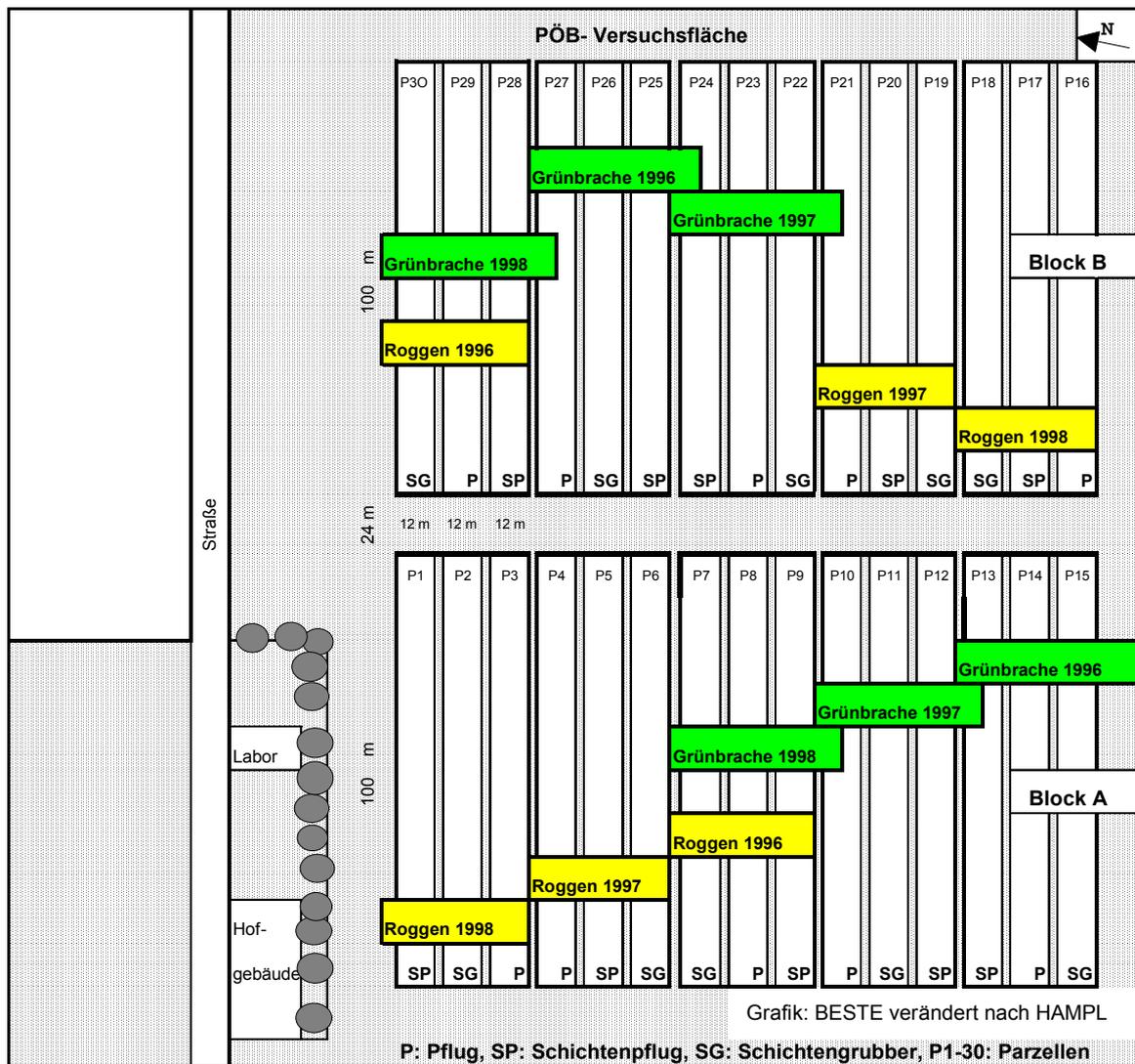


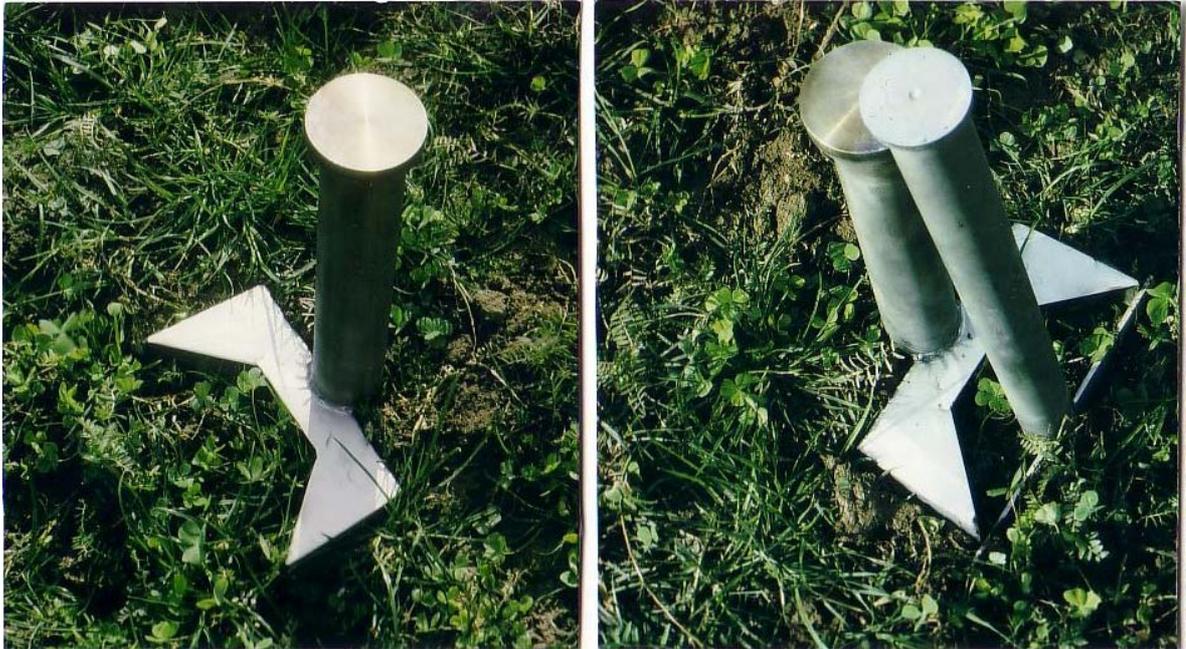
Abb. 9: Versuchsflächen des Versuchsansatzes 2

3.3 Gefügeuntersuchung und Probenahme

In Kapitel 2 wurde auf Grundlage des wissenschaftlichen Kontextes und eigener Arbeiten eine grundsätzliche Einschätzung der Eignung der innerhalb der ESD zum Einsatz kommenden Teilmethoden für eine Gefügebeurteilung gegeben. Als Ergebnis von Vorarbeiten (BESTE 1996) wurden die Gründe für Änderungen an einzelnen Teilmethoden der ESD erläutert. Nachfolgend wird eine Beschreibung der in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz gekommenen Version der Teilmethoden der ESD gegeben.

Zur Probenahme der ESD wurde der Profilspaten nach HAMPL/KUSSEL verwendet, der die Entnahme vergleichbarer Bodenziegel bis 40 cm Tiefe ermöglicht. Für die vorliegende Arbeit wurde jede Parzelle an vier Punkten in den Horizonten Oberfläche (0-1 cm), Oberkrume (0-15 cm), Unterkrume (15-30 cm) und Unterboden (30-40 cm) bonitiert und beprobt.

An einer Stelle, die für den Zustand der zu untersuchenden Parzelle in Bezug auf Bewuchs und Oberfläche repräsentativ ist, wurde der Profilspaten senkrecht in den Boden geschlagen. Vor dessen offene Seite trieb man den Flachspaten in den Boden (vgl. Abb. 10).



(Foto: HAMPL)

Abb. 10: Profil- und Flachspaten im Boden



(Foto: HAMPL)

Abb. 11: Bodenprofil auf den Diagnoseständern, Abheben des Profilspatens

Vor dem Flachspaten wird eine kleine Grube ausgehoben und das von Profil- und Flachspaten gehaltene Bodenprofil herausgenommen. Mit dem Flachspaten als Unterlage kann das Profil auf zwei Diagnoseständern platziert werden. Der Profilspaten wird vorsichtig abgehoben (vgl. Abb. 11).

Die seitlich gestörten Bereiche werden mit Hilfe eines speziellen, grob zinkigen „Bodenkamms“ vorsichtig vom Bodenklotz gelöst, so dass ein möglichst natürliches Abbröckeln erreicht wird. Die am „Bodenkamm“ angebrachte Zentimetermarkierung erleichtert bei Auflegen auf den Klotz die Orientierung im Profil (vgl. Abb. 12).



(Foto: BESTE)

Abb. 12: Bodenprofil mit „Bodenkamm“

Am Bodenprofil wird nun die Durchwurzelungsintensität in 40 cm Tiefe mittels Wurzelzählung ermittelt und eine Gefügeböschung vorgenommen. Nach der Gefügeböschung werden die Aggregatproben für die Untersuchungen der Aggregate vorsichtig aus den einzelnen Horizonten herauspräpariert und in Schraubgläser gegeben. Die Stechzylinderproben für die Ermittlung von Bodenfeuchte, Porenvolumen und Lagerungsdichte werden in den Horizonten Oberkrume, Unterkrume und Unterboden der Grubenwand entnommen. Alle Beurteilungen, Messungen und Probenahmen werden im Feldprotokoll der ESD notiert (vgl. Abb. 13).

Datum:		Parzellen-Nr.:		Bodenbearbeitung:	
Bearbeitung:		Wh.Nr.:		Bewuchs:	
Horizont	Gef.-Note	Agg-Test Glas Nr.	Por.Vol.-Bodenf. Do-Nr.	Abscherwiderstand 1	Abscherwiderstand 2
Oberfläche		Glas.Nr:			
Oberkrume		Glas.Nr:		Nm	Nm
Unterkrume		Glas.Nr:		Nm	Nm
Unterboden		Glas.Nr:		Nm	Nm

W D /10cm ² :				
W D /50cm ² :				
W D /cm ² :				

Abb. 13: Feldprotokoll der ESD

3.3.1 Gefügeböden

Tab. 5: Gefügeböden für lehmige Böden

Horizont	Erscheinungsbild	Gefübenote
	Oberfläche rau, Einzelaggregate erkennbar, nicht plattig, Wurmkot, keine Verschlammung, keine Krusten	5
	- Übergangsbereich -	4
Oberfläche 0-1 cm	Aggregate verschlammte, plattig, kaum Wurmkot, beginnende Krustenbildung (Risse)	3
	- Übergangsbereich -	2
	Plattige Aggregate, Krusten, Risse, Verschlammung, Versiegelung	1
	Über 80% Krümelgefüge, bei hohem Tongehalt auch <u>kleine</u> Polyeder, locker, wenig Bröckel	5
	- Übergangsbereich -	4
Oberkrume 0-15 cm	Mischgefüge aus oder nach leichtem Druck Zerfall in Krümel (kl. Polyeder) und Bröckel	3
	- Übergangsbereich -	2
	Bröckel und scharfkantige Fragmente/Klumpen mit glatter Oberfläche oder ungegliedertes Gefüge, kaum Krümel	1
	Mischgefüge aus oder nach leichtem Druck Zerfall in Krümel (kl. Polyeder) und Bröckel	5
	- Übergangsbereich -	4
Unterkrume 15-30 cm	Bröckel und dichte, größere Fragmente/Klumpen mit teilw. glatten Oberflächen, unter leichtem Druck noch Zerfall	3
	- Übergangsbereich -	2
	Über 80% scharfkantige Fragmente/Klumpen, größere deutl. glatte Oberflächen, Kohärentgefüge	1
	Gut durchportetes Gefüge (auch Kohärent- bzw. ungestörtes Lößgefüge) mit rauhen Oberflächen, mittelgr. Fragmente, Zerfall in Subpolyeder	5
	- Übergangsbereich -	4
Unterboden 30-40 cm	Wenig durchportetes Gefüge, Fragmente mit größeren, deutl. glatten Flächen oder scharfkantige große Klumpen, erst bei starkem Druck Zerfall	3
	- Übergangsbereich -	2
	Große, dichte Klumpen, Plattengefüge oder kaum durchportetes Kohärentgefüge	1

Die Gefügebeurteilung erfolgte nach der 1996 veränderten Version (vgl. Tab. 5).

Die Einteilung der Bodenaggregate (Krümel, Polyeder, Fragmente, Bröckel und Klumpen) lehnt sich an HASINGER (1993) an, wobei der Begriff „Fragment“ als solcher nicht „kantigen Gebilden“ zugeordnet, sondern als Oberbegriff verstanden und in der Beschreibung näher spezifiziert wurde (vgl. Tab. 6).

Tab. 6: Merkmalseinteilung der Bodenaggregate

Bezeichnung	Durchmesser	Oberfläche	Form	Entstehung
Krümel	einige Millimeter	raue Oberfläche	rundlich	überw. biolog. Aufbau- gefüge
Polyeder	einige Milimeter	glatte Oberfläche	kantig	Quellung/Schrumpfung, mechanische Bearbei- tung
Fragmente	Oberbegriff für Aggregate im Zentimeter- und Dezimeterbereich			
Bröckel	Zentimeter - nicht über 5	rauh, abgerun- dete Kanten Bruchflächen rauh	rundlich	Aufbauegefüge
Klumpen	große Fragmente (Dezimeter)	rauh oder glatt	eher kantig, sehr kompakt	Quellung/Schrumpfung, mechanische Bearbei- tung

Bei der Gefügebonitur geht es um die Beobachtung der Bodenstruktur im Gesamtzusammenhang. Die Beschreibung von Einzelaggregaten steht nicht im Vordergrund und ist daher weniger detailliert als bei der zusätzlich durchgeführten besonders detailliert gehaltenen Bonitur der Morphologie der Einzelaggregate (vgl. Kapitel 3.3.2), die unter dem Binokular vorgenommen wurde. Der dort verwendete Merkmalscode wurde nur für diese besondere Untersuchung zusammengestellt. Die Begriffe in der Merkmalsbeschreibung der Morphologie der Einzelaggregate stimmen zum Teil nicht mit der Gefügebonitur überein.

3.3.2 Bonitur der Mesomorphologie abgeseibter Aggregate

Wie in Kapitel 2.2 ausgeführt wurde, kann über eine differenzierte Bewertung der Aggregierungsform die biologische Aktivität von Böden als Ursache der Aggregation (Einschränkung: Sandböden und Skelettböden) besser berücksichtigt werden. Dem Aggregatstabilitätstest wurde daher speziell eine für diese Forschungsarbeit entwickelte Bonitur der Aggregatmorphologie unter dem Binokular bei achtfacher Vergrößerung vorangestellt (vgl. Tab. 6). Sie sollte zur Klärung der an der Stabilisierung von Aggregaten beteiligten Faktoren beitragen und bei guter Aussagekraft vereinfacht in die Methodik der ESD übernommen werden.

Tab. 7: Boniturschlüssel zur Untersuchung der Mesomorphologie unter dem Binokular

Form:	Code F	Oberfläche:	Code O	Poren:	Code P
Polyeder	1	glatt	1	keine erkennbar	0
plattig	2	rau	2	vereinzelt	1
Subpolyeder	3			viele	2
Krümel	4				
Innere Struktur:	Code S	Hinweis auf biolog. Verbauung:	Code B		
kohärent (einheitl. Matrix)	1	kein Hinweis	0		
aggregiert (deutl. zusammengesetzt)	2	org. Material, Schleim o. Wurzeln (sichtbar mitverbaut)	1		

3.3.3 Aggregatstabilitätstest auf Wasserstabilität

Für die Untersuchungen an den Aggregaten werden aus dem ausgegrabenen Profilblock Proben aus den Horizonten Oberfläche, Oberkrume, Unterkrume und Unterboden entnommen. Für die Oberfläche werden Aggregate > 2 mm und < 3 mm und für die anderen Horizonte Aggregate > 3 mm und < 5 mm ausgesiebt. Je Probe werden 40 Aggregate bonitiert und auf Wasserstabilität getestet. Dies geschieht aus den in Kapitel 2.2 genannten Gründen bei aktueller Bodenfeuchte. Sie werden mit einer Federstahl-Pinzette in zwei Schälchen mit je 20 Vertiefungen gegeben und vorsichtig mit Hilfe einer Pipette mit Regenwasser (wahlweise destilliertem Wasser, vgl. Kapitel 2.2) überstaut. Nach einer Einwirkungsdauer von einer Minute werden die entstandenen Aggregatbruchstücke durch kurzes Klopfen an das Schälchen verteilt. Der Test auf Aggregatstabilität wurde durch die Entwicklung einer Zerfallsbonitur mit sieben Zerfallsbildern standardisiert (BESTE 1997). Die Hauptzerfallsstufen 0, 1 und 2 behalten dabei ihre

Bedeutung (vgl. Abb. 14). Mit Hilfe der Noten lässt sich dann die erreichbare Stabilität in Prozent errechnen (vgl. Kapitel 3.4).

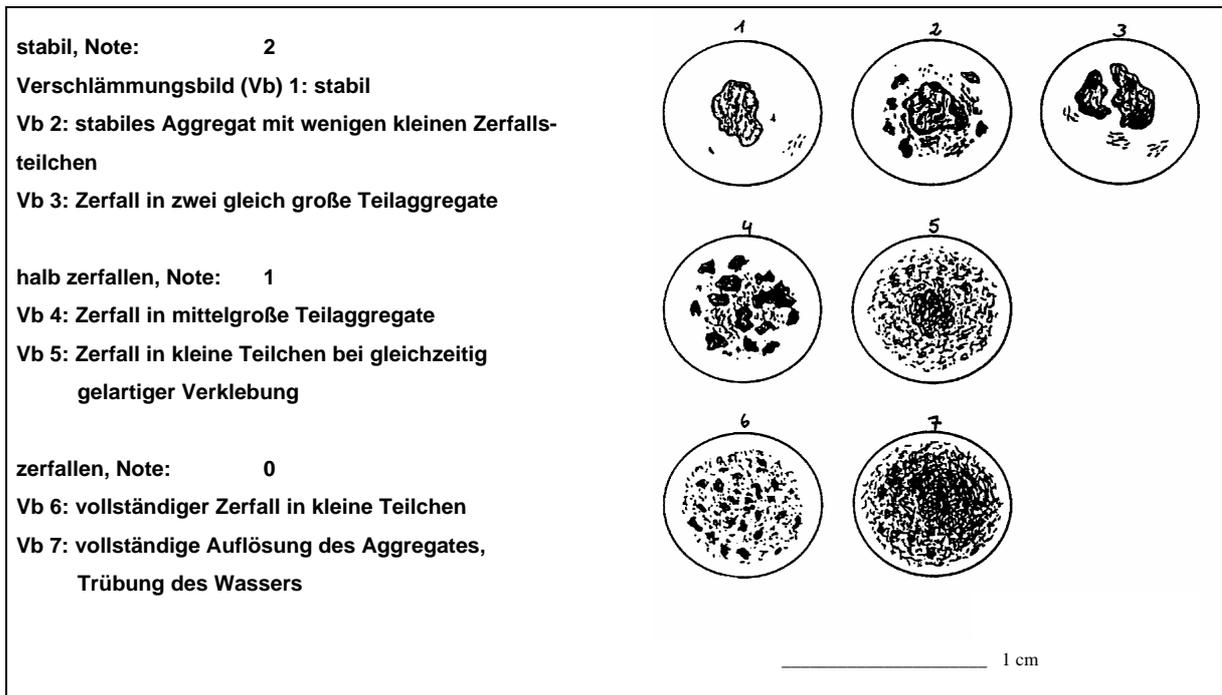


Abb. 14: Zerfallsbonitur des Aggregatstabilitätstests

3.3.4 Wurzelichte

An der Unterseite des frisch ausgehobenen Bodenziegels wird die Durchwurzelungsintensität mittels Wurzelzählung ermittelt (vgl. Abb. 15).

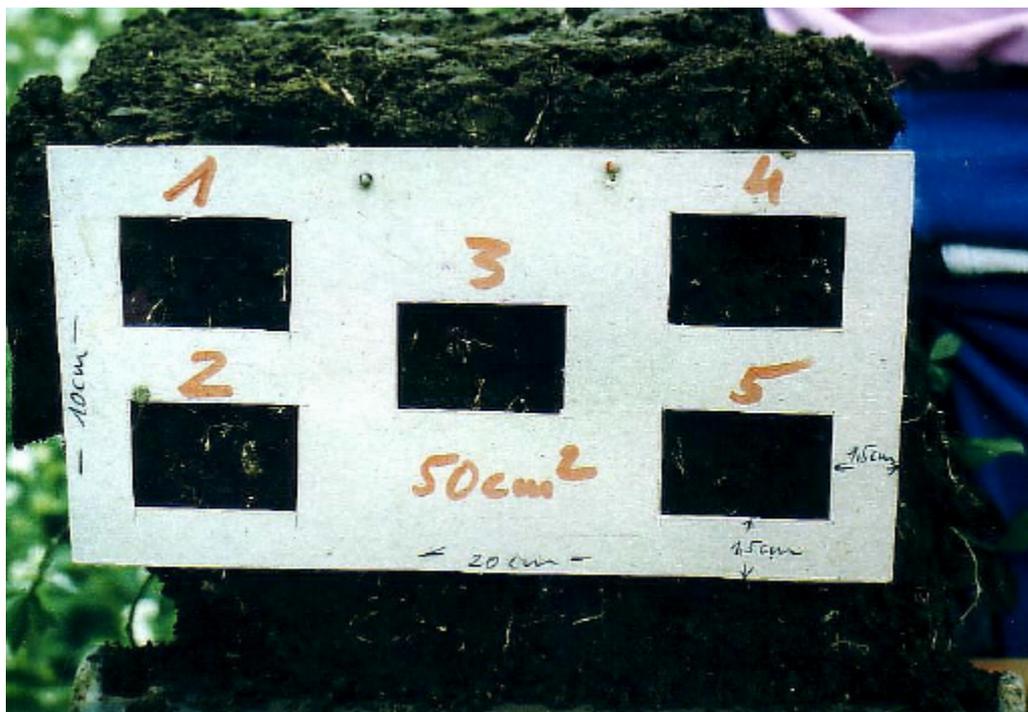


Abb. 15: Wurzelzählung mit Schablone

(Foto: HAMPL)

Für die Wurzelzählung wird auf die untere Abbruchkante des Bodenriegels in 40 cm Tiefe (Unterboden) eine Schablone mit fünf Fenstern à 10 cm² gelegt. Innerhalb der Fenster wird mit der Lupe die Anzahl der austretenden Wurzeln gezählt und die Summe dann auf eine Flächeneinheit von 1 cm² umgerechnet.

3.3.5 Bodenfeuchte, Porenvolumen und Lagerungsdichte (Rohdichte)

Aus den für die ESD ausgehobenen Bodengruben werden je Horizont, das heißt in 7 cm Tiefe für die Oberkrume, in 22 cm Tiefe für die Unterkrume und in 35 cm Tiefe für den Unterboden, drei ungestörte Bodenproben entnommen. Stechzylinder mit einem Volumen von 20 cm³ werden horizontal in den Boden gedrückt und dann vorsichtig herauspräpariert. Das Frischgewicht wird noch am gleichen Tag ermittelt, um die Verdunstungsverluste möglichst gering zu halten. Die Bodenfeuchte wird mit der gravimetrischen Wassergehaltsbestimmung ermittelt, bei der über den Gewichtsverlust, nach Trocknung der Bodenprobe bekannten Volumens bei 105 °C, die ausgetriebene Wassermenge beziehungsweise das Wasservolumen bestimmt wird. Das Porenvolumen wird aus dem Verhältnis zwischen der Lagerungsdichte (hier Dichte des Bodens d_B -bodenkundlich: Rohdichte) und der Dichte der festen Bodensubstanz, unter Bezugnahme auf das Gesamtvolumen errechnet (HARTGE u. HORN 1992, S. 50 ff.):

Dichte des Bodens (d_B) in g cm⁻³ =

$$\frac{\text{Gew. Gesamtprobe} - \text{Gew. Wasser}}{\text{Vol. Stechzylinder}}$$

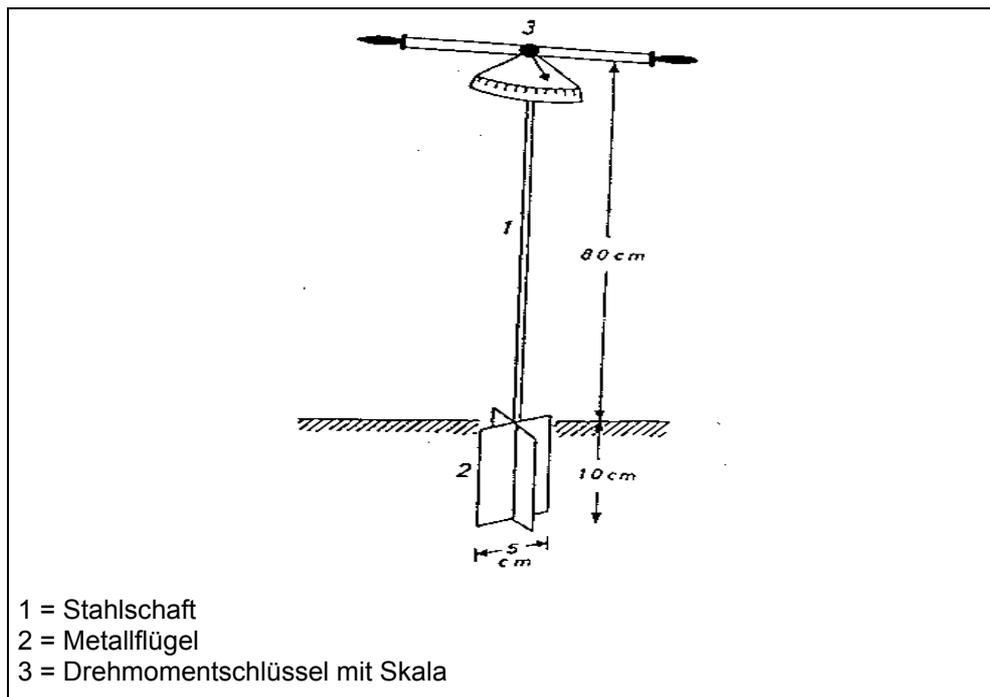
Porenvolumen in % =

$$1 - \frac{d_B}{2,65} \times 100 \%$$

In der ESD werden die ungestörten Proben für die Ermittlung der Bodenfeuchte, Porenvolumen und Lagerungsdichte mittels 20 cm³ -Stechzylindern entnommen, anstatt wie üblich mit 100 cm³ -Stechzylindern, um den Probenahmeaufwand zu reduzieren. Vergleichsuntersuchungen mit 100 cm³ -Stechzylindern ergaben keine Unterschiede in den Ergebnissen (BESTE 1996).

3.3.6 Abscherwiderstand

In unmittelbarer Nähe zur Bodengrube der ESD wird mit einem Flügelbohrer, der in den Boden jeweils bis zur gewünschten Horizonttiefe eingetrieben wird, zweimal der Abscherwiderstand gemessen (vgl. Abb. 16).



(Quelle: SCHAFFER 1960)

Abb. 16: Abscherwiderstandsmesser

Mittels eines aufsetzbaren Drehmomentschlüssels mit Meßskala wird das maximale Drehmoment ermittelt, welches zur Überwindung des Scherwiderstandes nötig ist. Es wird in Newton-Meter angegeben.

3.4 Statistik

Die Stichprobenanzahl und Anzahl an Einzelwerten je beprobter Parzelle für die unterschiedlichen Parameter sind Tabelle 7 zu entnehmen. Die Wiederholungsanzahl beträgt zwei (Block A und B).

Tab. 8: Messpunkte und Stichproben pro Parzelle

<i>Parameter</i>	<i>Messpunkte pro Parzelle</i>	<i>Bonitur/Proben/Messungen pro Horizont</i>	<i>n je Horizont pro Parzelle</i>
Gefügenote	4	1	4
Aggregatstabilität u. -morphologie	4	40 Aggregate	160
Wurzeldichte	4	1 (nur Unterboden)	4
Bodenfeuchte, Porenvolumen, Lagerungsdichte	4	Versuchsansatz 1: 1 gestörte Probe (nur Bodenfeuchte)	4
		Versuchsansatz A2: 3 Stechzylinder	12
Abscherwiderstand	8	1	8

Die Vergleiche der Mittelwerte wurden in Form einfaktorieller (Bodentiefe, Kapitel 4.2.1) bzw. multifaktorieller Varianzanalysen (ANOVAS) mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS für WINDOWS und einer Gruppensortierung nach DUNCAN (bei mehr als zwei Faktorstufen) vorgenommen. Der Vergleich des Ausgangssubstrates (Kapitel 4.2.2) erfolgte mit einem einfachen t-Test. Die jeweilige Anzahl der in die statistischen Berechnungen eingehenden Fälle in Abhängigkeit der Faktorenkombination und den Faktorstufen sowie die statistischen Details der Varianzanalysen und t-Tests sind im Anhang für jede Analyse aufgelistet.

Untersuchte Faktorvarianten für Versuchsansatz 1 und 2:

1. Frucht (Versuchsansatz 1: 3 Fruchtwechsel = Jahr, gleiche Parzellen; Versuchsansatz 2: 2 Fruchtarten, jedes Jahr, Parzellenwechsel)
2. Bodenbearbeitung (3: Pflug, Schichtenpflug, Schichtengrubber)
3. Bodenfeuchteklassen (3: <15%, 15-20%, >20% Bodenfeuchte)
4. Block (2: Blöcke A und B)

Die Bodenfeuchte liefert in der klassifizierten Form Faktorstufen und kann daher ebenfalls als Einflussfaktor in die Analyse eingehen (HOFFMANN 2000). Das Signifikanzniveau beträgt jeweils $p < 0,05$. Signifikant unterschiedliche Mittelwerte der untersuchten Gruppen sind in Tabellen (jeweils Zeilenweise) mit unterschiedlichen Buchstaben (a, b, c) gekennzeichnet.

Von den in jeder Vergleichsgruppe vergebenen Gefügenoten werden einfache Mittelwerte gebildet.

Der Wert der Aggregatstabilität in Prozent für jede Stichprobe bezieht sich jeweils auf das Ergebnis der 40 je Horizont und je Stichprobe getesteten Einzelaggregate. Der maximal erreichbare Stabilitätswert einer Stichprobe mit der Höchstbonitur "2" für jedes getestete Aggregat beträgt demnach 80. Dieser Wert steht für 100% Stabilität. Die darunter erreichten Stabilitätswerte wurden dazu in Prozent gesetzt.

Die Aggregatmorphologie wird mittels der Mesostrukturvariable "AGGRUPP3" verglichen. Diese Variable hat eine Spannweite von 1-3. Der Wert 1 steht dabei für polyedrige, dichte Aggregate, der Wert 2 für Aggregate des Subpolyedertyps und der Wert 3 für krümelige Aggregate, entsprechend der Klassifikation der Aggregate in Kapitel 4.1 (vgl. auch Abb. 18-21). Je höher der Mittelwert der Variable "AGGRUPP3" für eine untersuchte Gruppe an 3 heranreicht

ist, desto höher ist der Anteil krümeliger Aggregate in den Stichproben; je näher der Wert sich gegen 1 bewegt, desto höher ist der Anteil polyedrischer, dichter Aggregate.

Für die zwei unterschiedlichsten der drei gebildeten Typengruppen der Aggregate, den Polyeder- und den Krümeltyp, (vgl. Kapitel 4.1), wurde für die untersuchten Einflussfaktoren die Wasserstabilität getrennt erfasst. Mit der Bezeichnung Wasserstabilität ist die Bonitur des Wasserverschlammungstests (vgl. Abb. 14, Kapitel 3.3) für jedes einzelne Aggregat (jeweils "0" oder "1" oder "2") bezeichnet. Der Mittelwert liegt für eine untersuchte Gruppe demnach zwischen 0 und 2. Je höher er ist, desto mehr Aggregate waren stabil, je niedriger er ist, desto mehr der untersuchten Aggregate waren instabil. Krümeltyp und vor allem Polyedertyp stellen nur relativ geringe Anteile des Stichprobensatzes (vgl. Abb. 21). Vor allem bei der Erhebung der Stabilität des Polyedertyps kam es daher bei der Mittelwertbildung für die untersuchten Gruppen zu zum Teil geringeren n -Werten, wenn zuwenig Polyeder in den zur Mittelwertbildung herangezogenen Stichprobensätzen vorhanden waren. Dies bedingt die teilweise von der Gesamtberechnungs-Grundgesamtheit abweichenden n -Werte für die Berechnungen der Wasserstabilität der Krümel und der Wasserstabilität der Polyeder (vgl. Tabelle 14).

Die Lagerungsdichte wird mit dem jeweiligen Mittelwert in g/cm^3 angegeben; entsprechend der Abscherwiderstand in Newton Meter (Nm).

Für die Wurzelichte wird der Mittelwert in „Anzahl der Wurzeln pro cm^2 “ angegeben.

Aufgrund der Datenmenge wurde auf eine Darstellung der Ergebnisse für die Oberfläche verzichtet. Die Gefügeeigenschaften der Oberfläche werden in der Regel stark durch die Einwirkung von Niederschlag und Temperatur beeinflusst, während die biologische Aktivität - um deren indirekte Erfassung es in dieser Arbeit geht - eine geringere Rolle spielt. Aufgrund der Bodenbedeckung waren unter Grünbrache die Werte der Aggregatstabilität in der Regel höher als unter Roggen (BESTE 1997 b-1999), was SIEGRIST (1995) ähnlich feststellen konnte.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Klassifikation der Aggregate in Typengruppen und Test auf Stabilität

Die Bonitur der Aggregatmorphologie unter dem Binokular ergab bestimmte sich wiederholende Merkmalskombinationen. Nach der Häufigkeit ihres Erscheinens sowie nach strukturellen und ökologischen Gesichtspunkten wurden daher die über 44.000 auf ihre Morphologie hin untersuchten Einzelaggregate aus den Versuchsansätzen 1 und 2 zunächst in acht morphologisch unterscheidbare Aggregattypengruppen zusammengefasst, die sich aus der Beobachtung ergaben. Mit den Merkmalen „Form“, „Oberflächenbeschaffenheit“ und „Poren“ ließ sich der Stichprobensatz gut in unterschiedliche Merkmalstypen gliedern (vgl. Abb. 17). Wie aus der Korrelationsmatrix (vgl. Tab. 9) hervorgeht, wird das Merkmal „Innere Struktur“ mittels der drei oben genannten Merkmale ausreichend erfasst. Das Merkmal „Hinweis auf biologische Verbauung“ stimmte wiederum weitestgehend mit der Ausprägung „viele“ des Merkmals „Poren“ und der Ausprägung „aggregiert“ des Merkmals „Innere Struktur“ überein.

Tab. 9: Korrelationsmatrix für die Merkmale der Aggregatmorphologie

	<i>Form</i>	<i>Oberfläche</i>	<i>Poren</i>	<i>Struktur</i>
Form				
Oberfläche	0,40**			
Poren	0,62**	0,31**		
Struktur	0,62**	0,23**	0,80**	
Hinw. auf biolog. Verbauung	0,18**	0,10**	0,24**	0,22**

Aggregate der Horizonte Oberkrume, Unterkrume und Unterboden, n = 43348

** Signifikanzniveau von 0,01 (2-seitig)

Hauptkriterium der aufsteigenden Einteilung der acht Gruppen waren neben diesen Überschneidungen der Merkmale morphologische Zeichen für biologische Aktivität. Beispielsweise lässt eine raue Oberfläche aufgrund der vergrößerten Fläche eine höhere Intensität an Stoffwechselfvorgängen zu. Und je mehr Poren ein Aggregat besitzt (je deutlicher zusammengesetzt, d.h. aggregiert es ist), desto mehr Mikrohabitate weist es für Kleinorganismen auf. Regenwurm Kot stellt als deutliches Produkt biologischer Aktivität hier eine morphologische Ausnahme dar. Regenwurm Kot besitzt in der Regel eine glatte Oberfläche und wenig bis keine Po-

ren, ist jedoch ein strukturphysiologisch positives Zeichen für biologische Aktivität. Er erhielt daher einen Sondercode und wurde bei der Zusammenfassung den Krümeln zugeordnet.

Merkmalsbeschreibung der acht Typengruppen:

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Polyeder, glatt, keine Poren | 5. Subpolyeder, rauh, wenig Poren |
| 2. Polyeder, glatt, wenig Poren | 6. Subpolyeder, rauh, viele Poren |
| 3. Subpolyeder, glatt, keine Poren | 7. Regenwurm Kot |
| 4. Subpolyeder, glatt, wenig Poren | 8. Krümel, rauh, viele Poren |

Durch diese Gruppeneinteilung werden 96 Prozent aller Fälle erfasst (vgl. Abb. 17).

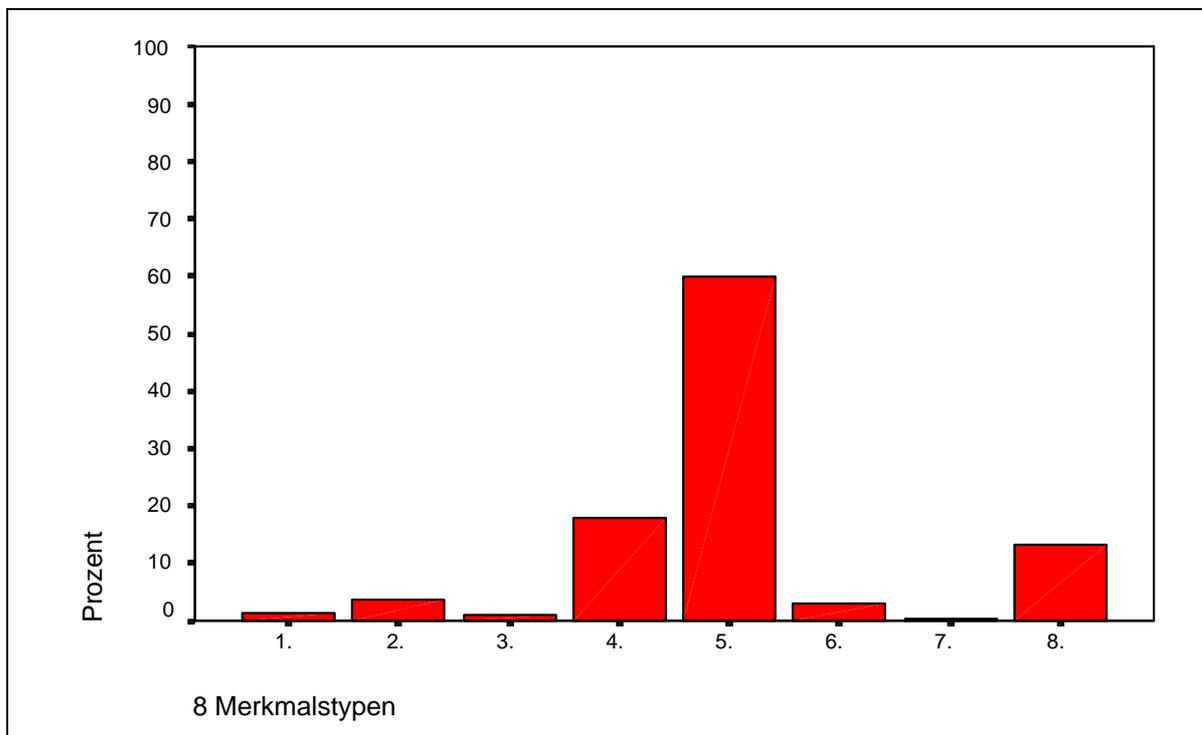


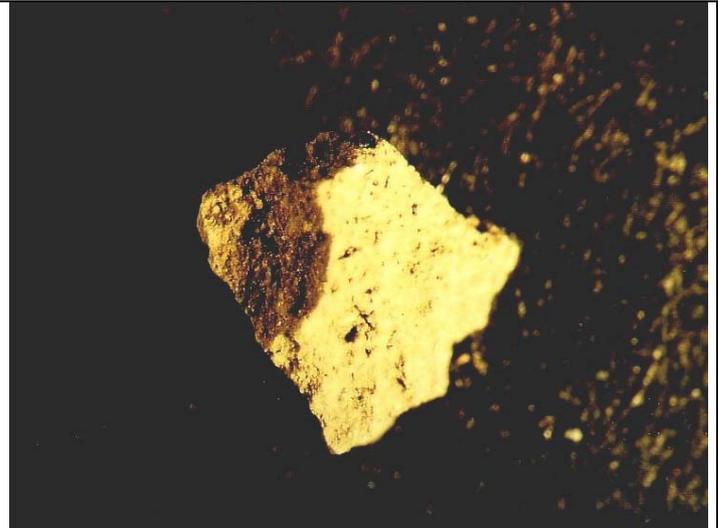
Abb. 17: Häufigkeit der acht Aggregattypengruppen

Um die funktionsökologisch wichtigen Unterschiede in der Mesomorphologie prägnanter erfassen und übersichtlicher darstellen zu können, wurden die acht Merkmalstypen nochmals in drei Typengruppen, “Polyedertyp”, “Subpolyedertyp” und “Krümeltyp” zusammengefasst. Die folgende Aufstellung beinhaltet die Zusammenfassung der acht Typengruppen in drei Typengruppen. Die Abbildungen 19-21 zeigen charakteristische Beispiele von Aggregaten jeder Gruppe.

Polyedertyp

1. Polyeder, glatt, keine Poren
2. Polyeder, glatt, wenig Poren

Abb. 18: Beispiel: Polyeder, glatt, keine Poren (Ø 4 cm)



Subpolyedertyp

3. Subpolyeder, glatt, keine Poren
4. Subpolyeder, glatt, wenig Poren
5. Subpolyeder, rau, wenig Poren

Abb. 19: Beispiel: Subpolyeder, glatt, wenig Poren (Ø 4 cm)



Krümeltyp

6. Subpolyeder, rau, viele Poren
7. Regenwurmkot
8. Krümel, rau, viele Poren

Abb. 20: Beispiel: Krümel, rau, viele Poren (Ø 4 cm)



Abbildung 21 zeigt die Gruppengrößen der drei Gruppen Polyeder- Subpolyeder- und Krümeltyp.

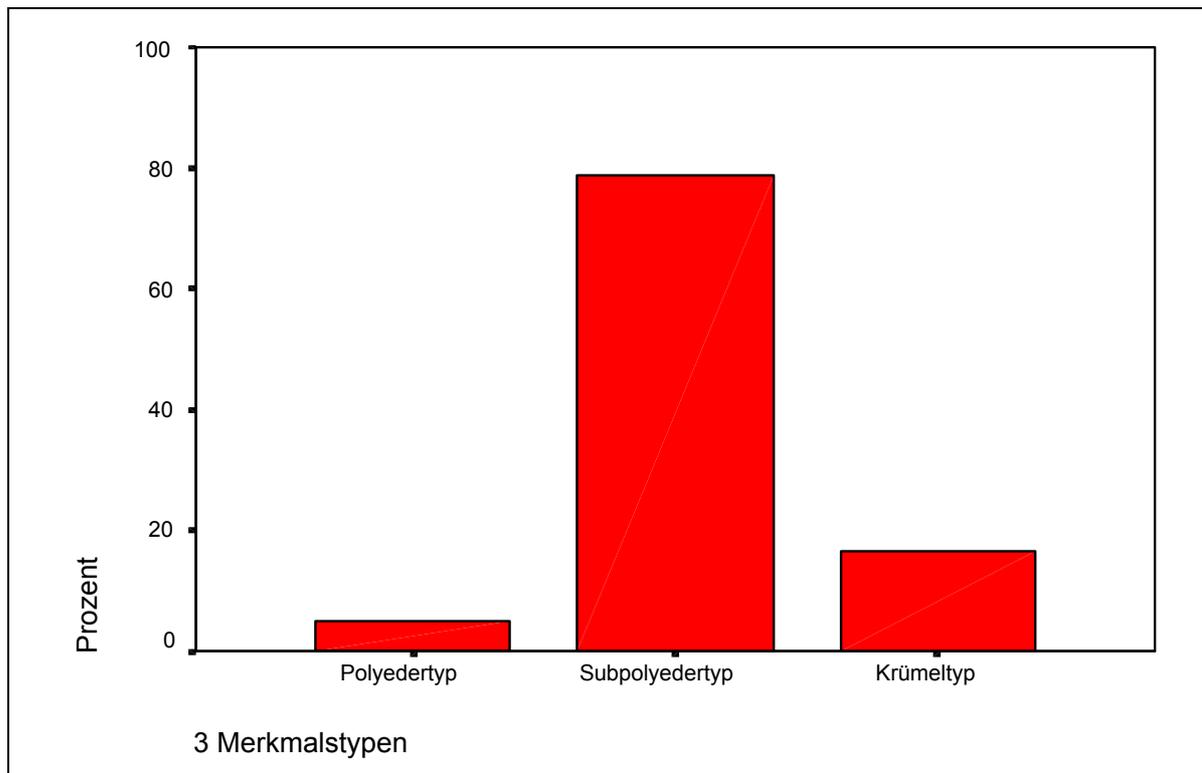


Abb. 21: Häufigkeitsverteilung der zusammengefassten drei Aggregattypengruppen

Während in der Klassifizierung der drei genannten Gruppen (Variable „AGGRUP 3“) der mengenmäßig vorherrschende Anteil an Aggregaten der Subpolyeder-Typengruppe (Merkmalscode 2) angehört, stellen Krümel- (Merkmalscode 3) und Polyedertyp (Merkmalscode 1) geringere Anteile an der Gesamtstichprobe. Dies lässt sich zum großen Teil mit der größeren morphologischen Bandbreite an Merkmalen für den Subpolyedertyp erklären. Während der Polyedertyp mit der Definition „glatt“ und „scharfkantig“ und der Krümeltyp mit der Definition „rauh“, „aggregiert“ und „viele Poren“ sehr eindeutig festgelegt wird, lässt die Subpolyedertypengruppe schon unter dem Begriff Subpolyeder für „Form“ mehrere unterschiedliche Einordnungen zu und vereinigt darüber hinaus mehrere Stufen der Merkmale Oberfläche („glatt“ und „rauh“) und Poren („keine“ bis „wenig“) auf sich. Dies führt dazu, dass diese Gruppe als Pool für relativ (im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen) heterogene Aggregattypen fungiert. Mit dem Mittelwert der Variable „AGGRUP 3“ als Strukturindikator lässt sich ein Vorherrschen von Aggregaten des Krümeltyps oder des Polyedertyps relativ zueinander charakterisieren, da eine Veränderung des Mittelwertes gut mit dem Verhältnis Krümeltypanteil zu Polyedertypanteil übereinstimmt.

Um zu klären, ob die morphologischen Typengruppen grundsätzlich unterschiedliche Stabilität aufweisen, wurden die Aggregate (getrennt nach den Versuchsansätzen 1 und 2) nach Typengruppen auf ihre Stabilitätseigenschaften getestet (vgl. Tab. 10). Versuchsansatz 1 mit Jahresdynamik und Fruchtwechsel sowie Versuchsansatz 2 ohne jahreszeitliche Dynamik und Fruchtwechsel, dafür mit Flächenwechsel (vgl. Abb. 8 und 9, Kapitel 3.2) weisen die gleichen Unterschiede in der Wasserstabilität der Typengruppen untereinander auf. Die Stabilitätseigenschaften verhalten sich vom Polyedertyp über den Subpolyedertyp zum Krümeltyp abfallend, wobei die Unterschiede zwischen den Gruppen jeweils signifikant sind.

Tab. 10: Wasserstabilität (Bonitur 0-2*) der Typengruppen, Versuchsansätze 1 und 2^a

	Polyedertyp	Subpolyedertyp	Krümeltyp
Versuchsansatz 1, n = 24815	1,4 a	1,3 b	1,1 c
Versuchsansatz 2, n = 16118	1,4 a	1,2 b	0,9 c

* wie in Kapitel 3.3.3, Tab. 6 und Abb. 14 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 2 u. 3

4.2 Einfluss differenzierter Beobachtungs- bzw. Standortbedingungen auf die mit der ESD erfassten Parameter

Um den Einfluss der Bewirtschaftungsfaktoren auf die Parameter der ESD besser beurteilen zu können, soll im folgenden zunächst der Einfluss der Beobachtungs- und Standortbedingungen Bodentiefe, Ausgangssubstrat und Bodenfeuchte auf die Parameter der ESD näher betrachtet werden. Die Ergebnisse werden aufgrund der unterschiedlichen Parzellenlage zu den Bodeneinheiten bei Versuchsansatz 2 und den unterschiedlichen Probenahmeterminen bei Versuchsansatz 1 (Bodenfeuchte) getrennt nach Versuchsansätzen dargestellt (vgl. Abb. 8 und 9, Kapitel 3.2). In Kapitel 4.4 folgt dann die Darstellung der Ergebnisse für die Einflussfaktoren der Bewirtschaftung (Fruchtfolgesequenz, Fruchtartenvergleich, differenzierte Grundbodenbearbeitung).

4.2.1 Bodentiefe

Der Vergleich der Mittelwerte für die verschiedenen Bodenhorizonte erfolgte mit Hilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse. Hierfür gingen sämtliche Faktorvarianten und Probenahmetermine beider Versuchsansätze in die Berechnungen ein (vgl. Anhang, Tabellen 4-7).

GEFÜGENOTE

Hinsichtlich der Bodentiefe erreicht der Unterboden den oberen Bereich des Gefügebewertungsmassstabs (Durchschnittsnote 3,9). Die Mittelwerte für Ober- und Unterkrume bewegen sich im mittleren Bewertungsbereich (Durchschnittsnote 3,4 - 3,6, vgl. Tab. 10). Aufgrund der unterschiedlichen Bewertungsmassstäbe der Horizonte ist ein Test auf Signifikanz nicht angebracht. Bleibt für beide Versuchsansätze festzuhalten, dass der Unterboden einem optimalen Gefügezustand näher kommt als Ober- und Unterkrume (Tab. 11).

Tab. 11: Gefügenote (1-5*) in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansätze 1 und 2^a

	<i>Oberkrume</i>	<i>Unterkrume</i>	<i>Unterboden</i>
Versuchsansatz 1, n = 162	3,6	3,4	3,9
Versuchsansatz 2, n = 108	3,3	3,3	3,7

* wie in Kapitel 3.3.1, Tab. 5 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 4 u.5

AGGREGATSTABILITÄT

Die Aggregatstabilität ist in Versuchsansatz 1 und 2 in den beiden oberen Horizonten im Mittel signifikant höher als im Unterboden (Tab. 12).

Tab. 12: Aggregatstabilität (in % *) in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansätze 1 und 2^a

	<i>Oberkrume</i>	<i>Unterkrume</i>	<i>Unterboden</i>
Versuchsansatz 1, n = 162	72,5 a	70,3 a	47,6 b
Versuchsansatz 2, n = 108	67,8 a	62,9 a	49,1 b

* % der max. erreichbaren Aggregatstabilität, wie in Kapitel 3.3.3, Abb. 14 und Kapitel 3.4 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 4 u. 5

AGGREGATMORPHOLOGIE

Die Mittelwerte der Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“, in der die drei Gruppen der Aggregatmorphologie (Polyeder - 1, Subpolyeder - 2 und Krümel - 3) zusammengefasst sind, zeigen für Versuchsansatz 1 signifikant in Ober- und Unterkrume einen höheren Anteil an krümeligen Aggregaten (je näher der Wert an 1 liegt, desto mehr Polyeder; je näher er an 3 liegt, desto mehr Krümel wurden bonitiert, vgl. Kapitel 3.4 und 4.1) (Tab. 13).

Tab. 13: Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“ (1-3*) in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansätze 1 und 2^a

	<i>Oberkrume</i>	<i>Unterkrume</i>	<i>Unterboden</i>
Versuchsansatz 1, n = 163	2,18 a	2,17 a	2,07 b
Versuchsansatz 2, n = 110	2,13	2,12	2,07

* wie in Kapitel 3.4 und 4.1 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 6 u. 7

WASSERSTABILITÄT POLYEDER UND KRÜMEL

Die Wasserstabilität (je näher der Wert an 0 liegt, desto mehr zerfallene Aggregate; je näher er an 2 liegt, desto mehr stabile Aggregate wurden bonitiert) der beiden Typengruppen ist entsprechend der Gesamttaggregatstabilität (vgl. Tab. 12) im Unterboden signifikant geringer. Die Gruppe der Krümel ist dabei insgesamt weniger stabil (Tab. 14).

Tab. 14: Wasserstabilität (Bonitur 0-2*) der Typengruppen in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansätze 1 und 2^a

<i>Versuchs- ansatz 1</i>	<i>Ober- krume</i>	<i>Unter- krume</i>	<i>Unter- boden</i>	<i>Versuchs- ansatz 2</i>	<i>Ober- krume</i>	<i>Unter- krume</i>	<i>Unter- boden</i>
P, n = 140	1,71 a	1,59 a	1,25 b	P, n = 104	1,65 a	1,52 a	1,31 b
K, n = 162	1,24 a	1,16 a	0,81 b	K, n = 107	1,11 a	0,96 a	0,70 b

P = Polyedertyp, K = Krümeltyp

* wie in Kapitel 3.3.3, Tab. 7 und Abb. 14 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 6 u. 7

LAGERUNGSDICHTE, ABSCHERWIDERSTAND UND WURZELDICHTE

Die nur in Versuchsansatz 2 erhobenen Parameter Lagerungsdichte und Abscherwiderstand zeigen mit zunehmender Bodentiefe signifikant ansteigende Werte (Tab. 15).

Tab. 15: Lagerungsdichte und Abscherwiderstand in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Versuchsansatz 2^a

<i>n = 108</i>	<i>Oberkrume</i>	<i>Unterkrume</i>	<i>Unterboden</i>
Lagerungsdichte in g·cm ⁻³	1,28 a	1,32 b	1,39 c
Abscherwiderstand in Nm	32 a	67 b	118 c

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 5

Die Wurzelldichte wurde nur im Unterboden gezählt und kann daher hier nicht differenziert betrachtet werden.

4.2.2 Ausgangssubstrat

Um den Einfluss des Ausgangssubstrats auf die Parameter untersuchen zu können, wurden die Stichproben in zwei Gruppen von Bodeneinheiten zusammengefasst. Gruppe 1 vereint Proben von Standorten auf Löss und Löss über Mergel und Gruppe 2 Proben von Standorten auf Kalk- und Tonmergel. Beim Vergleich der Ausgangssubstrate wurden alle Stichproben einer Gruppe (alle Faktorvarianten und Probenahmetermine) als Wiederholung verrechnet. Während bei Versuchsansatz 1 beide Gruppen mit der gleichen Stichprobenanzahl vertreten sind (die in jedem Jahr gleichen untersuchten Parzellen des Versuchsansatzes 1 der Blöcke A und B erstrecken sich jeweils zur Hälfte auf beide Bodeneinheiten, vgl. Abb. 6 und 8, Kapitel 3), variiert der Anteil an Stichproben der ersten und zweiten Bodeneinheit bei Versuchsansatz 2 stärker (die beprobten Parzellen und damit die Probenahmestandorte rotierten mit den Jahren über die Versuchsfläche), d.h. die Stichproben sind bezüglich des Ausgangssubstrates (in Versuchsansatz 2) ungleich groß (vgl. Abb. 6 und 9, Kapitel 3). Für Versuchsansatz 2 zeigten sich bei

keinem der Parameter der ESD (Gefügenote, Aggregatstabilität, Lagerungsdichte und Abscherwiderstand) signifikante Unterschiede abhängig vom Ausgangssubstrat. Der Vergleich der detaillierten Strukturuntersuchung (Mesostruktur und Stabilität der Typengruppen Polyeder und Krümel) lieferte schwach ausgeprägte Unterschiede bezüglich des Ausgangssubstrates mit gleichen Tendenzen wie in Versuchsansatz 1. Die Ergebnisse für Versuchsansatz 2 sind im Anhang in den Tabellen 9 und 11 zu finden.

GEFÜGENOTE

Die Gruppe „Kalk- und Tonmergel“ zeigt in Versuchsansatz 1 in der Unterkrume signifikant und in den übrigen Horizonten tendenziell etwas höhere Gefügenoten als die Gruppe „Löss und Löss ü. Mergel“ (Tab. 16).

Tab. 16: Gefügenote (0-5*) in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat, Versuchsansatz 1^a

<i>n = 108</i>	<i>Löss und Löss ü. Mergel</i>	<i>Kalk- und Tonmergel</i>
Oberkrume	3,5	3,7
Unterkrume	3,2 a	3,5 b
Unterboden	3,8	3,9

* wie in Kapitel 3.3.1, Tab. 5 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 8

AGGREGATSTABILITÄT

Bei der Aggregatstabilität in Prozent ist der Unterschied zwischen den beiden Ausgangssubstraten am deutlichsten. Die Gruppe „Kalk- und Tonmergel“ hat in Versuchsansatz 1 signifikant höhere Prozentwerte der Aggregatstabilität als die Gruppe „Löss und Löss ü. Mergel“ (Tab. 17).

Tab. 17: Aggregatstabilität (in %*) in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat, Versuchsansatz 1^a

<i>n = 108</i>	<i>Löss und Löss ü. Mergel</i>	<i>Kalk- und Tonmergel</i>
Oberkrume	69,2 a	75,9 b
Unterkrume	65,3 a	75,5 b
Unterboden	41,4 a	53,8 b

* % der max. erreichbaren Aggregatstabilität, wie in Kapitel 3.3.3, Abb. 14 und Kapitel 3.4 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 8

AGGREGATMORPHOLOGIE

In der Ausprägung der Mesostruktur gibt es in Versuchsansatz 1 und 2 keine Unterschiede abhängig vom Ausgangssubstrat (vgl. Anhang, Tabellen 10 u. 11). Dies bedeutet, keines der beiden Ausgangssubstrate zeigt eine Mesostruktur mit höherem Krümelgehalt.

WASSERSTABILITÄT POLYEDER UND KRÜMEL

Bei den Kalk- und Tonmergelproben zeigen Polyeder und Krümel tendenziell (Signifikanzen sind bei den zum Teil geringen Unterschieden in der Aussagekraft mit Vorbehalt zu betrachten) höhere Mittelwerte der Wasserstabilität. Diese Beobachtung ist (auch unabhängig von Signifikanzen bei grösserer n) beim Krümeltyp deutlicher ausgeprägt als beim Polyedertyp. Letzterer zeigt eine schwächere Beeinflussung der Wasserstabilität durch die Ausgangssubstrate (Tab. 18).

Tab. 18: Wasserstabilität (0-2*) der Typengruppen in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat, Versuchsansatz 1^a

		<i>Löss und Löss ü. Mergel</i>	<i>Kalk- und Ton- mergel</i>
Oberkrume	Polyedertyp, $n = 432$	1,68	1,69
	Krümeltyp, $n = 1907$	1,10 a	1,23 b
Unterkrume	Polyedertyp, $n = 277$	1,55	1,50
	Krümeltyp, $n = 1660$	0,94 a	1,26 b
Unterboden	Polyedertyp, $n = 288$	0,77 a	1,05 b
	Krümeltyp, $n = 827$	0,75 a	0,91 b

* wie in Kapitel 3.3.3, Tab. 7 und Abb. 14 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 10

4.2.3 Bodenfeuchte

Trotz vergleichbarer Spannweiten und Mittelwerte (Tab. 19) zeigen die Bodenfeuchtwerte in Versuchsansatz 1 je nach Probenahmetermin, also jahreszeitlich, sehr unterschiedliche Spektren (vgl. Anhang, Tab. 12).

Tab. 19: Spannweiten und Mittelwerte der Bodenfeuchte, Versuchsansätze 1 und 2

	<i>Minimum</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Maximum</i>
Versuchsansatz 1	7,8	17,2	29,9
Versuchsansatz 2	10,0	17,0	25,2

Für Versuchsansatz 2 wurden alle Termine und Faktorvarianten in die mehrfaktorielle Varianzanalyse einbezogen.

Um bei Versuchsansatz 1 den Einfluss des gesamten Bodenfeuchtespektrums auf die untersuchten Parameter beurteilen zu können, wurden die Probenahmen der Jahre 1997 und 1998 in einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse verrechnet, da hier die drei Probenahmetermine März, Mai und Juli für zwei Jahre vertreten sind (beim Septembertermin ist keine Jahreswiederholung vorhanden, daher blieb er außen vor). In beiden Jahren liegt eine vergleichbare Niederschlagsmenge und -verteilung vor. Die Früchte Grünbrache (1997) und Winterweizen (1998) unterscheiden sich in der mittleren Bodenfeuchte in der Oberkrume nicht, in Unterkrume und Unterboden zeigt der Boden unter Winterweizen etwas trockenere Werte (vgl. Anhang, Tab. 42).

Bei der Untersuchung des Einflusses der Bodenfeuchte auf die Parameter der ESD und die Mesomorphologie im Durchschnitt der zwei Jahre 1997 und 1998 insgesamt lassen sich so für Versuchsansatz 1 jahreszeitliche Effekte (jahreszeitlich bedingt unterschiedliche Bodenfeuchte, Pflanzenwachstum, Wurzelwachstum, jahreszeitliche Dynamik der biologischen Aktivität etc.) jedoch nicht vom Effekt unterschiedlicher Bodenfeuchte trennen. Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der unterschiedlichen Bodenfeuchte der einzelnen Stichproben und deren Bewertung bzw. Messung in den Parametern zu klären, wurden für den Versuchsansatz 1 zusätzlich Korrelationen der Bodenfeuchte mit den untersuchten Parametern der ESD für die einzelnen jahreszeitlich unterschiedlichen Probenahmetermine (im Durchschnitt der zwei Jahre) gerechnet.

Für die varianzanalytische Berechnung der Beeinflussung der Parameter der ESD durch die Bodenfeuchte waren Bodenfeuchteklassen zu bilden. Für eine Erfassung der Verteilung der Bodenfeuchtwerte von Versuchsansatz 1 und 2 erwies sich eine Einteilung in drei Klassen als sinnvoll: Klasse 1: < 15%, Klasse 2: 15-20% und Klasse 3: > 20%. Für eine größere (differenziertere) Gruppenbildung (beispielsweise fünf Gruppen), streute die Verteilung der Werte zu eng um den Mittelwert, was bei fünf Gruppen zu sehr ungleichen Gruppengrößen geführt hätte. So konnten für die nach Jahreszeiten getrennte Überprüfung des Zusammenhangs Bodenfeuchte der Stichproben und Parameterergebnis für Versuchsansatz 1 diese Bodenfeuchteklassen nicht in einer Varianzanalyse verrechnet werden, da für verschiedene Termine ein oder zwei Klassen nicht genügend Fälle aufweisen (in der Oberkrume zeigen die Werte für die Märzprobenahmen im Durchschnitt der zwei Jahre eine Spannweite von 19,6 bis 29,9% Bodenfeuchte; für die Juliprobenahmen dagegen nur eine von 12,4 bis 17,9% Bodenfeuchte).

Daher wurden Korrelationen mit dem gesamten Bodenfeuchtespektrum des jeweiligen Termins (für 1997-1998) für alle Stichproben gerechnet. Die Ergebnisse finden sich im Anhang unter Tabelle 14 und 15.

GEFÜGENOTE

Versuchsansatz 1 zeigt in Ober- und Unterkrume einen deutlichen Anstieg der Gefügenoten in Bodenfeuchtekategorie 3, über 20%. Das heißt, bei hoher Bodenfeuchte sind für Ober- und Unterkrume bessere Gefügenoten vergeben worden. Der Unterboden zeigt keine unterschiedlichen Gefügenoten abhängig von der Bodenfeuchte.

Die mittleren Gefügenoten des Versuchsansatzes 2 sind insgesamt niedriger und zeigen eine deutlich geringere Abhängigkeit von der Bodenfeuchte. Die Tendenz zu höheren Gefügenoten bei Bodenfeuchtwerten über 20% wiederholt sich allerdings bei den Proben der Oberkrume. In Unterkrume und Unterboden besteht in Versuchsansatz 2 kein Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Gefügenote (Tab. 20).

Tab. 20: Gefügenote (1-5*) der Horizonte in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, Versuchsansätze 1 und 2^a

<i>Versuchsansatz 1, n = 108</i>	<15%	15-20%	>20%
Oberkrume	3,48 a	3,21 a	4,53 b
Unterkrume	3,20 a	3,32 a	3,65 b
Unterboden	3,92	3,80	3,85
<i>Versuchsansatz 2, n = 108</i>	<15%	15-20%	>20%
Oberkrume	3,30 a	3,03 a	3,95 b
Unterkrume	zu wenig Fälle	3,29	3,15
Unterboden	3,33	3,67	zu wenig Fälle

* wie in Kapitel 3.3.1, Tab. 5 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 13 u. 16

Die Berechnung der Korrelationen für die einzelnen Stichproben ergab in Einzelfällen einen Zusammenhang von Bodenfeuchte und Gefügenote innerhalb der Jahreszeiten, jedoch keine deutlichen Tendenzen (vgl. Anhang, Tabellen 14 und 15).

Abbildung 24 ist zu entnehmen, dass in Versuchsansatz 1 in der Oberkrume der Zusammenhang hohe Bodenfeuchte - hohe Gefügenote deutlich mit dem Verlauf der Jahresdynamik verbunden ist. Das gesamte Bodenfeuchtespektrum liegt im Mittel im März über 20%. Die höchsten mittleren Bodenfeuchtwerte fallen im März 1997 und März 1998 mit den höchsten mittleren Gefügenoten zusammen.

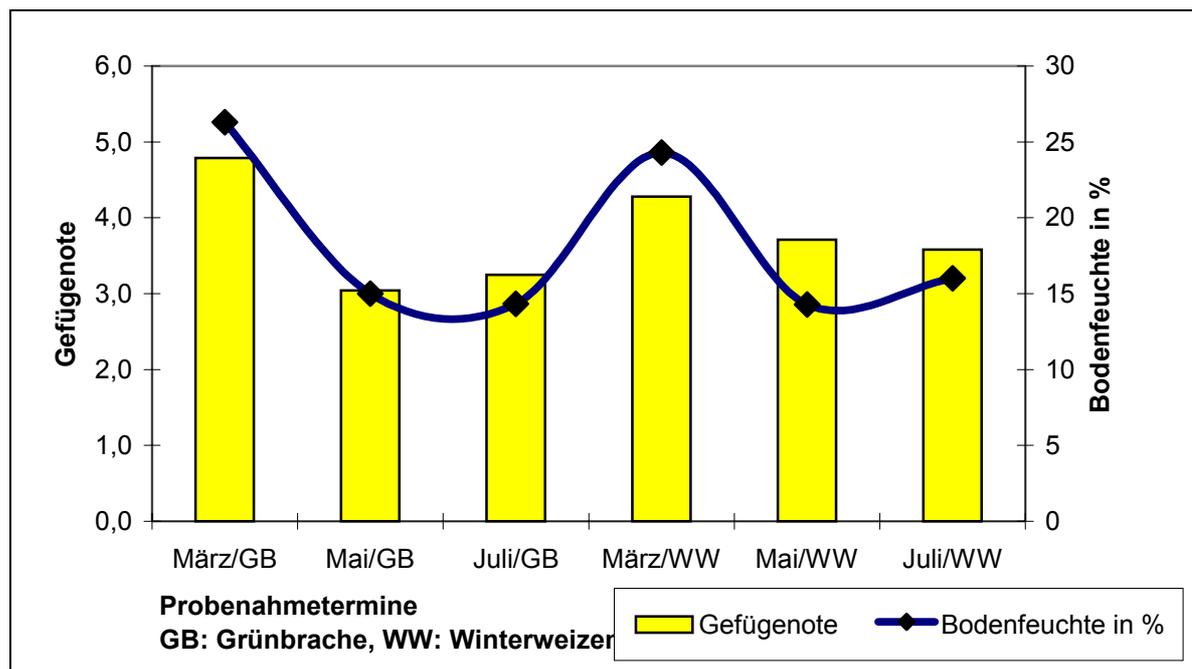


Abb. 22: Bodenfeuchte und Gefügenreue in der Oberkrume für die verrechneten Probenahmetermine 1997 und 1998, Versuchsansatz 1

AGGREGATSTABILITÄT

In Versuchsansatz 1 zeigt sich ein signifikanter Abfall der Aggregatstabilität bei Werten über 20% Bodenfeuchte in der Ober- und Unterkrume. In Versuchsansatz 2 sind die Tendenzen gleich, aber nicht signifikant absicherbar (Tab. 21).

Tab. 21: Aggregatstabilität (in % *) der Horizonte in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, Versuchsansätze 1 und 2^a

Versuchsansatz 1, n = 108	<15%	15-20%	>20%
Oberkrume	82,4 a	83,7 a	57,0 b
Unterkrume	77,5 a	78,9 a	65,1 b
Unterboden	41,7	52,2	53,6
Versuchsansatz 2, n = 108	<15%	15-20%	>20%
Oberkrume	70,7	69,8	66,5
Unterkrume	zuwenig Fälle	65,0	55,6
Unterboden	46,0	49,4	zuwenig Fälle

* % der max. erreichbaren Aggregatstabilität, wie in Kapitel 3.3.3, Abb. 14 und Kapitel 3.4 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 17 u. 18

Die Berechnung der Korrelationen zwischen dem Bodenfeuchtespektrum innerhalb einer Jahreszeit und den Stichproben für die Aggregatstabilität ergab wiederum nur in Einzelfällen einen Zusammenhang (vgl. Anhang, Tabelle 14).

Bei Betrachtung der Jahresdynamik für die Oberkrume ist auffällig, dass niedrige Werte der Aggregatstabilität in Versuchsansatz 1 wiederum mit den Probenahmeterminen mit höchster Bodenfeuchte im Frühjahr (März) zusammenfallen (Abb. 23). Dies ist bei der Unterkrume ebenfalls (schwächer) zu beobachten, beim Unterboden nicht (beide nicht abgebildet).

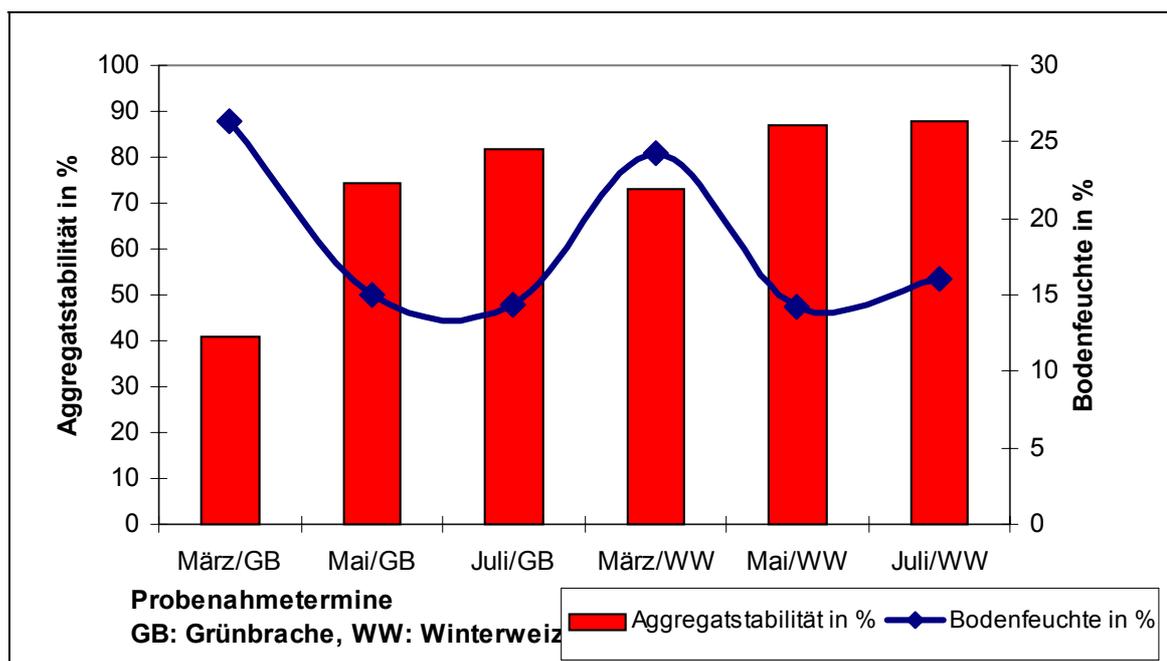


Abb. 23: Bodenfeuchte und Aggregatstabilität (in %) in der Oberkrume für die verrechneten Probenahmetermine 1997 und 1998, Versuchsansatz 1

Dies bedeutet, es besteht in den biologisch aktiven Horizonten ein stärkerer Zusammenhang zwischen jahreszeitlicher Gesamtsituation im Boden (feuchterer Gesamtzustand - das heißt den im Jahresverlauf sich ändernden Mittelwerten der Bodenfeuchte) und der Aggregatstabilität (bei sehr feuchtem Zustand niedriger) als zwischen feuchteren oder trockeneren Stichproben eines bestimmten Probenahmetermins und ihrer Aggregatstabilität.

AGGREGATMORPHOLOGIE

In beiden Versuchsansätzen ist in den beiden oberen Horizonten eine Tendenz (Signifikanzen mit Vorbehalt) zu einem erhöhten Anteil an krümeligen Aggregaten bei Bodenfeuchtwerten über 20% zu beobachten (Tab. 22).

Tab. 22: Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“ (1-3*) der Horizonte in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, Versuchsansätze 1 und 2^a

<i>Versuchsansatz 1, n = 108</i>	<15%	15-20%	>20%
Oberkrume	2,11 a	2,09 a	2,30 b
Unterkrume	2,12a	2,10 ab	2,20 b
Unterboden	2,05	2,06	2,11
<i>Versuchsansatz 2, n = 110</i>	<15%	15-20%	>20%
Oberkrume	2,02 a	2,08 a	2,31 b
Unterkrume	zuwenig Fälle	2,06 a	2,52 b
Unterboden	2,0	2,0	zuwenig Fälle

* wie in Kapitel 3.4 und 4.1 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 19 u. 20

Bei Berechnung der Korrelationen ergibt sich nur für März in der Oberkrume ein Zusammenhang (Korrelationskoeffizient nach Pearson: 0,16, für $n = 1863$, vgl. Tabelle 15, Anhang) zwischen Mesostrukturvariable und Bodenfeuchte. Der stark von der Jahreszeit abhängige Zusammenhang in der Oberkrume wird wiederum in der Abbildung des Jahresgangs von Bodenfeuchte und Mesostrukturvariable besonders deutlich (vgl. Abb. 24).

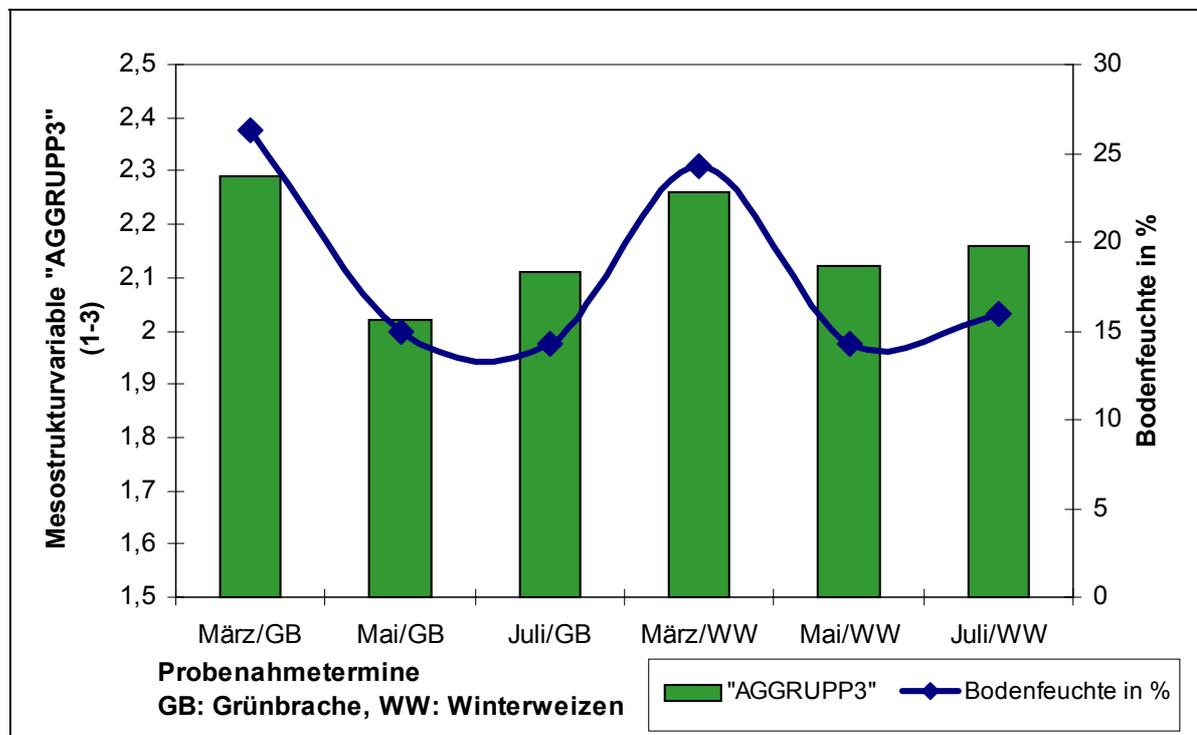


Abb. 24: Bodenfeuchte und Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ in der Oberkrume für die verrechneten Probenahmeterminen 1997 und 1998, Versuchsansatz 1

WASSERSTABILITÄT POLYEDER UND KRÜMEL

Krümel- und Polyedertyp reagieren in der Oberkrume auf Bodenfeuchtwerte über 20% mit signifikant nachlassender Wasserstabilität. Beim Krümeltyp ist diese Tendenz auch in der Unterkrume deutlich. Der Polyedertyp zeigt in der Unterkrume keinen Zusammenhang. Im Unterboden ist eine Umkehrung der Tendenz schwach ausgeprägt zu beobachten (vgl. Tab. 23).

Tab. 23: Wasserstabilität (0-2*) der Typengruppen in den Horizonten in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, Versuchsansatz 1^a

		<15%	15-20%	>20%
Oberkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 34	1,91 a	1,86 a	1,40 b
	Krümeltyp <i>n</i> = 36	1,39 a	1,45 a	0,96 b
Unterkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 30	1,74	1,74	1,73
	Krümeltyp <i>n</i> = 36	1,35	1,31	1,04
Unterboden	Polyedertyp <i>n</i> = 22	1,40	1,42	1,65
	Krümeltyp <i>n</i> = 35	0,83	0,86	0,94

* wie in Kapitel 3.3.3, Tab. 7 und Abb. 14 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 21 u.23

Die stärkere Abhängigkeit der Wasserstabilität des Krümeltyps von der Bodenfeuchte zeigt sich auch in den Korrelationswerten (Tab. 23), während die Wasserstabilität des Polyedertyps keinen Zusammenhang mit den nach Jahreszeiten getrennten Bodenfeuchtwerten der Stichproben zeigt (vgl. Anhang, Tab. 21 u. 23). Im März liegt das Spektrum der Bodenfeuchtwerte überwiegend über 20%, was in Ober- und Unterkrume zu negativen Korrelationskoeffizienten führt (je höher die Bodenfeuchte desto niedriger die Krümelstabilität). Im Unterboden zeigt sich, wie bei der Varianzanalyse schon beobachtet, eine gegenläufige Tendenz (hier sind Krümel bei Bodenfeuchtwerten > 20% stabiler). Die positive Korrelation in der Unterkrume im Juli bezieht sich auf ein Spektrum von Bodenfeuchtwerten unter 18%. In Ober- und Unterkrume besteht also die Tendenz zu geringerer Wasserstabilität, wenn die Bodenfeuchte über 20% liegt und zu ansteigender Wasserstabilität mit zunehmender Bodenfeuchte bei Werten unter 20%. Im Unterboden ist ein Anstieg der Wasserstabilität bei Bodenfeuchtwerten über 20% als Tendenz festzuhalten. Die Tendenzen des Zusammenhangs von Krümelstabilität und Bodenfeuchte sind demnach stark von der Jahreszeit abhängig (vgl. Tab. 25 und Abb. 25).

Tab. 24: Korrelation zwischen Bodenfeuchte und Krümelstabilität in den Horizonten nach Jahreszeiten getrennt, Versuchsansatz 1

<i>n</i> = 1920	<i>März</i>	<i>Mai</i>	<i>Juli</i>
Oberkrume	-0,11	/	/
Unterkrume	-0,30	/	+0,23
Unterboden	+0,25	/	/

Für Versuchsansatz 2 - ohne jahreszeitliche Effekte - ist kein Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und der Wasserstabilität der Typengruppen zu beobachten (Tab. 25).

Tab. 25: Wasserstabilität (0-2*) der Typengruppen in den Horizonten in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, Versuchsansatz 2^a

		<15%	15-20%	>20%
Oberkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 37	1,83	1,64	1,63
	Krümeltyp <i>n</i> = 38	1,10	1,10	1,18
Unterkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 35	zu wenig Fälle	1,5	1,7
	Krümeltyp <i>n</i> = 35	zu wenig Fälle	0,99	0,85
Unterboden	Polyedertyp <i>n</i> = 32	1,23	1,33	zu wenig Fälle
	Krümeltyp <i>n</i> = 34	0,57	0,71	zu wenig Fälle

* wie in Kapitel 3.3.3, Tab. 7 und Abb. 14 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 22 u. 24

Die Wasserstabilität des Polyedertyps zeigt in Versuchsansatz 1 in der Oberkrume nur im März 1997 niedrigere Stabilität bei hoher Bodenfeuchte, dann ist während des Untersuchungszeitraums ein unter Grünbrache stärkerer und dann nachlassender Anstieg der Stabilität zu verzeichnen (vgl. Kapitel 4.4.1). Der Krümeltyp zeigt zu beiden Terminen hoher Bodenfeuchte (März 1997 und März 1998) Depressionen der Stabilität (vgl. Abb. 25).

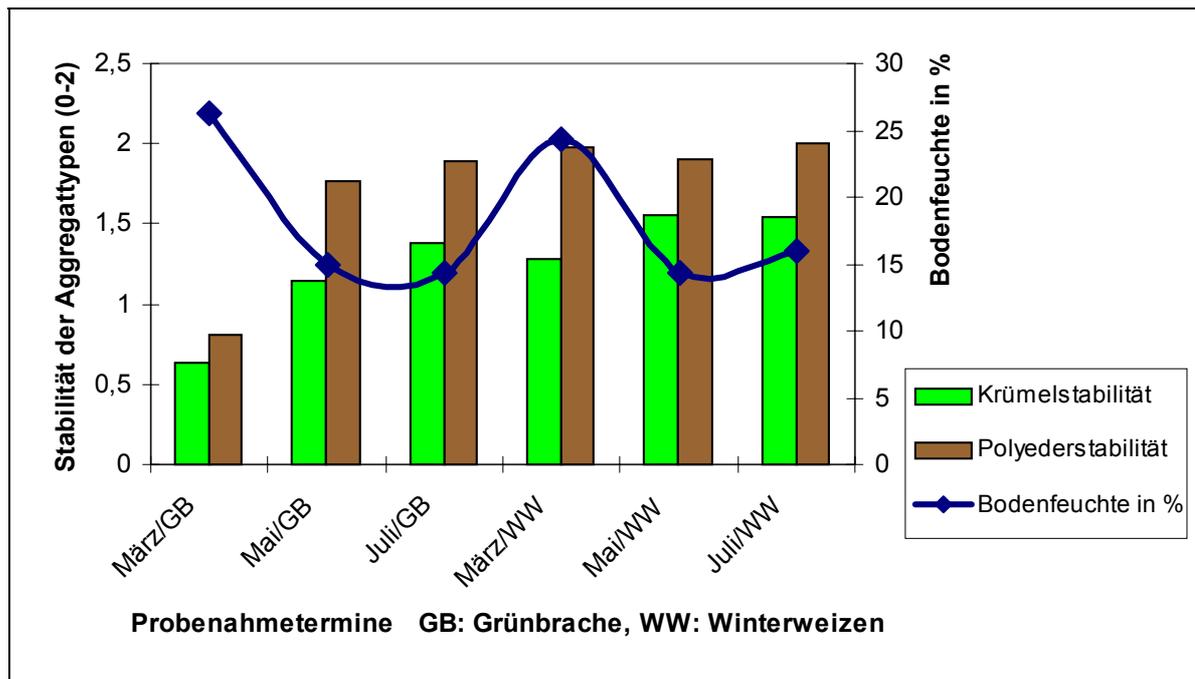


Abb. 25: Bodenfeuchte und Wasserstabilität der Typengruppen in der Oberkrume für die verrechneten Probenahmeterminale 1997 und 1998, Versuchsansatz 1

LAGERUNGSDICHTE, ABSCHERWIDERSTAND UND WURZELDICHTE

Lagerungsdichte und Abscherwiderstand (nur in Versuchsansatz 2 beprobt) zeigen hier keinen Zusammenhang mit der Bodenfeuchte (vgl. Anhang, Tabellen 25 u. 26).

Die Wurzelndichte zeigt signifikant unterschiedliche Werte in den Bodenfeuchtebereichen kleiner 15% und 15-20%. Im Bereich höherer Bodenfeuchte (15-20%) liegt dabei der Mittelwert geringer (vgl. Tab. 26).

Tab. 26: Wurzelndichte in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, Versuchsansatz 2

<i>n</i> = 24	<15%	15-20%	>20%
Wurzelndichte pro cm ²	0,70 a	0,57 b	k.W.

k.W. = keine Werte vorhanden

4.3 Diskussion

4.3.1 Bodentiefe

Mit der Bodentiefe ändern sich die Licht-, Luft- und Feuchteparameter und das Nährstoffangebot im Boden. Aufgrund der nach unten größer werdenden Auflast der Bodensäule ist das Gefüge natürlicherweise dichter, je weiter man nach unten kommt. Diesen natürlichen Milieunterschieden haben sich Bodenflora und -fauna angepasst (GISI 1997). In den oberen Horizonten (je nach Klimazone und Vegetation bis in unterschiedliche Tiefen) ist die biologische Aktivität in der Regel aufgrund des Nährstoff-, Wasser-, und Luftangebotes höher (MÜCKENHAUSEN 1993, KUNTZE ET AL. 1994, EMMERLING 1996, SCHINNER/SONNLEITNER 1996 a). Bei landwirtschaftlich genutzten Böden besteht zusätzlich ein deutlicher Unterschied zwischen bearbeiteter Krume (in der Regel bis 30 cm Tiefe) und unbearbeiteter Krume (Unterboden). Darüber hinaus entstehen unterschiedliche Gefügeverhältnisse in der bearbeiteten Krume und im Unterboden durch den Einsatz wendender und nicht wendender bzw. flach- und tiefwendender Grundbodenbearbeitungstechniken (FRANKEN/LOH 1986, TEBRÜGGE 1989, BÖHM et al. 1990, KANDELER et al. 1995, STOCKFISCH et al. 1995, SCHINNER/SONNLEITNER 1996 b). Die Bodentiefe ist daher einer der größten Einflussfaktoren für die räumlichen Strukturverhältnisse und die Aggregatstabilität.

Bezüglich der Bodentiefe zeigen die Parameter Gefügenote, Aggregatstabilität und Aggregatmorphologie sowie die Stabilität der beiden morphologischen Typengruppen Polyeder und Krümel in Versuchsansatz 1 und 2 weitestgehend übereinstimmend deutliche Unterschiede für die einzelnen Bodenhorizonte:

Die Gefügenoten sind im Unterboden höher, Aggregatstabilität und Mesostrukturvariable zeigen in den beiden oberen Horizonten (Ober- und Unterkrume) höhere Werte, Polyeder- und Krümeltyp zeigen beide in den oberen Horizonten eine höhere Stabilität. Die Werte von Lagerungsdichte und Abscherwiderstand steigen mit zunehmender Bodentiefe an (vgl. Tab. 11-15).

Für den Unterboden wurden im Durchschnitt höhere **Gefügenoten** vergeben als für die beiden oberen Horizonte (vgl. Tab. 11). Dies ist zunächst erstaunlich, da besonders in den oberen Horizonten ein gutes Gefüge angestrebt wird. Aufgrund der unterschiedlichen Boniturmaßstäbe für die Notenvergabe jedes Horizonts (vgl. Tab. 5, Kapitel 3.3.1) bedeutet dies, dass die obe-

ren Horizonte von ihrem Optimum des Gefügezustands weiter entfernt sind als der Unterboden; es bedeutet nicht, dass das Gefüge in Ober- und Unterkrume schlechter ist als im Unterboden. Der Unterboden befindet sich auf den Versuchsf lächen insgesamt in einem guten Gefügezustand und zeigt keinerlei Verdichtungstendenzen (vgl. BESTE 1996). Die Qualität der Bodenstruktur wird beim Unterboden als dem Horizont, der unterhalb der Bearbeitungsgrenze der Grundbodenbearbeitung liegt, vor allem durch das Ausgangssubstrat und weniger bzw. indirekter durch die biologische Aktivität oder die Bewirtschaftung beeinflusst. Die hier vorliegenden Ausgangssubstrate Löss und Kalk- und Tonmergel entwickelten sich im vorliegenden Untersuchungsraum zu einer Parabraunerde, die als Bodentyp für vorteilhafte Gefügeeigenschaften (gute Durchporung, gute Wasserhaltekapazität, gute Krümelbildung) bekannt ist. Das ist auch bei den hier vorliegenden Versuchsf lächen der Fall. Dies zeigen die guten Noten für den Unterboden. Darüber hinaus lässt sich in den letzten Jahren unter integrierter Bewirtschaftung eine schonende Grundbodenbearbeitung (Wechsel von wendender und nicht wendender Bearbeitung) feststellen, die nicht zu Unterbodenverdichtung führte (KUSSEL 1999). Ober- und Unterkrume als die durch die Bewirtschaftung stärker beeinflussten Horizonte zeigen bei den hier vorliegenden Versuchsf lächen auch nach mehrjähriger Umstellungszeit auf ökologischen Landbau noch Entwicklungsmöglichkeiten in der Bodenstruktur. Der für den Lössboden in der Gefügebö nitur vorgegebene Optimalzustand (Soll-Zustand für die Note 5, vgl. Tab. 5, Kapitel 3.3.1) wird im Durchschnitt noch nicht erreicht. Dichtere Lagerungsverhältnisse der bearbeiteten Krume werden häufig bei der Umstellung auf nicht wendende Grundbodenbearbeitung beobachtet (SOMMER/ZACH 1992, KÖLLER 1993). Zwei Drittel der Werte der Versuchsansätze 1 und 2 stammen von Parzellen, die sich seit 1994 in Umstellung auf nicht wendende Bodenbearbeitung befinden (vgl. Abb. 8 und 9). Dies kann erklären, warum hier in Ober- und Unterkrume im Durchschnitt nur Gefügenoten im mittleren Bereich erreicht werden.

Sowohl die höhere **Aggregatstabilität** als auch die höheren Werte der **Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“** (d.h. der höhere Anteil an krümeligen Aggregaten) in den oberen Horizonten (vgl. Tab. 12 und 13) können überwiegend auf die nach unten abnehmende biologische Aktivität zurückgeführt werden (MÜCKENHAUSEN 1993, KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDTFEGER 1994, EMMERLING 1996, GISI 1997).

Der Umkehrschluss - eine größere Anzahl an Krümeln bedinge eine höhere Aggregatstabilität - ist nicht zulässig, wie an der insgesamt geringeren **Stabilität des Krümeltyps** im Vergleich mit den anderen morphologischen Aggregattypen zu erkennen ist (vgl. Tab. 10 und 14). Die höhere Aggregatstabilität in den biologisch aktiveren Horizonten betrifft alle Aggregattypen gleichermaßen (vgl. Tab. 14) und ist nur über den Faktor biologische Aktivität mit einem höheren Krümelanteil in Zusammenhang zu bringen. Dieser Faktor kann sowohl das eine (hohe Aggregatstabilität durch biologische Verbauung aller Aggregattypengruppen, vgl. CHESTERS et al. 1957, LYNCH 1983, SCHINNER/SONNLEITNER 1996 a) als auch das andere (hoher Krümelanteil durch biologisch bedingte Krümelbildung, vgl. TISDALL/OADES 1982, ANDERSON 1991, KANDELER/MURER 1993) bedingen. Ziel ist aus landwirtschaftlicher Sicht eine hohe Aggregatstabilität bei möglichst hohem Anteil an Aggregaten des Krümeltyps.

Die **Wasserstabilität der Aggregattypen** folgt der Reihe Polyeder > Subpolyeder > Krümel (vgl. Tab. 10). Nach KATSCHINSKI (1958) ist die Wasserstabilität mechanisch verdichteter Aggregate durch die große Kontaktfläche mechanischer Elemente um so höher, je größer die Verdichtung ist, was die höhere Wasserstabilität von Subpolyedern und Polyedern erklärt. Aufgrund ihrer granulären Struktur sind Krümel im Vergleich anfälliger für das Auseinandersprennen der Aggregatteilchen und Auflösen von Wassermenisken durch das in die Poren eindringende Wasser als Subpolyeder und in besonderem Masse Polyeder. Diese ermöglichen durch ihre dichtere, kohärente Struktur dem Wasser keinen vergleichbar schnellen Eintritt. Die geringere Stabilität des Krümeltyps kann zusätzlich mit dem nach KULLMANN/KOITZSCH (1956) im Falle hoher Bodenfeuchte häufigen Auftreten von Pseudokrümeln in den oberen beiden Horizonten erklärt werden. KULLMANN beschreibt Pseudokrümel als aus kleineren Aggregaten zusammengesetzte „scheinbare Krümel“, die durch Kapillarkräfte von Menisken zusammengehalten werden (1958, S.10 ff.). Dies ist nach HAINES (1930) vor allem dann der Fall, wenn der Wassergehalt des Bodens um 25% liegt. Dieser Bodenfeuchtwert wird in den beiden oberen Horizonten - vor allem in der Oberkrume - häufiger erreicht (vgl. Anhang, Tab. 27). Nach KULLMANN (1958), KATSCHINSKI (1958) und SEKERA (1984) gibt es eine permanent wirksame Dynamik zwischen Stabilisierung und Labilisierung von Krümeln, die von mehreren Faktoren (Feuchte, Temperatur, biologische Aktivität, Bewuchs, Düngung, Bodenbearbeitung) beeinflusst wird, weshalb Krümel bei gegebenen Voraussetzungen auch recht stabil sein können (vgl. Kapitel 4.4).

Die **Lagerungsdichten und Abscherwiderstände** zeigen den für Ackerböden typischen Anstieg zum nicht durch die Grundbodenbearbeitung gelockerten Unterboden (vgl. Tab. 15). Insgesamt sind die hier gemessenen Werte von Lagerungsdichte und Abscherwiderstand als niedrig einzustufen (vgl. BESTE 1996). Die Tendenz zu weniger optimalen Gefügeverhältnissen in der Unterkrume, die in den Mittelwerten der Gefügenote zum Ausdruck kommt, wird durch diese beiden gemessenen Parameter nicht abgebildet.

Die treffende Kennzeichnung der in der Literatur bekannten und in PÖB wiederholt messbaren Differenzierung der biologischen Aktivität der Krumenhorizonte (vgl. MÜCKENHAUSEN 1993, KUNTZE ET AL. 1994, EMMERLING 1996-1998, GISI 1997) mit den Parametern Gefügenote, Aggregatstabilität und Aggregatmorphologie ist mit den Ergebnissen der Versuchsansätze 1 und 2 plausibel nachvollziehbar. Auch der Anstieg der Lagerungsdichte und des Abscherwiderstandes zum Unterboden entsprechen den bekannten (vgl. GRUBER 1992 b, HARRACH/RICHTER 1992, EHRNSBERGER 1993, MÜCKENHAUSEN 1993, KUNTZE ET AL. 1994, MUNKHOLM 1998) und in PÖB zusätzlich zum Abscherwiderstand auch mit Hilfe des Eindringwiderstandes (vgl. HAMPL 1997) dokumentierten typischen Verhältnissen in der Ackerkrume.

4.3.2 Ausgangssubstrat

Auf den Versuchsflächen liegen Inhomogenitäten bezüglich des Ausgangssubstrats vor. Die beprobten Flächen liegen teils im Bereich von Löss, teils im Bereich von Kalk- und Tonmergel im Untergrund. Beide Ausgangssubstrate zeigen keine großen Unterschiede in Korngrößenverteilung und Chemismus (vgl. Anhang, Tab. 29). Dennoch können leichte Unterschiede in Ton- und Kalkanteil unterschiedliche Voraussetzungen z.B. für die Stabilisierung von Aggregaten bedingen (CHESTERS et al. 1957, MÜCKENHAUSEN 1993).

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die unterschiedlichen Ausgangssubstrate „Löss und Löss ü. Mergel“ und „Kalk- und Tonmergel“ nur beim Parameter Aggregatstabilität einen nennenswerten Einfluss haben, während die anderen Parameter überwiegend nicht signifikant beeinflusst werden (vgl. Tab. 16-18).

Die besseren **Gefügenoten** der Gruppe „Kalk- und Tonmergel“ (nur in der Unterkrume signifikant) sind vermutlich auf den höheren Skelettanteil beim Ausgangssubstrat Kalk- und Tonmergel zurückzuführen, der zu einem lockereren Gefüge beiträgt (vgl. Tab. 16).

Die **Mesomorphologie** zeigt bei unterschiedlichen Ausgangssubstraten keine Unterschiede, das heißt, keines der beiden Ausgangssubstrate bedingt einen höheren Krümelanteil (vgl. Anhang, Tab. 10 u. 11).

Die höhere **Aggregatstabilität** der „Kalk- und Tonmergel“-Proben hängt mit dem höheren Kalkgehalt, kombiniert mit einem leicht höherem Tongehalt zusammen (vgl. Tab. 16 und Anhang, Tab. 8). Eine Förderung der Aggregatstabilität durch höhere Kalk- oder Tongehalte wurde wiederholt in der Literatur dokumentiert (CHESTERS et al. 1957, CZERATZKI 1957, SCHACHTSCHABEL/HARTGE 1958, DUTZLER-FRANZ 1977, MULLA et al. 1992, ROTH 1996).

Die geringere Beeinflussung der **Wasserstabilität des Polyedertyps** durch die unterschiedlichen Ausgangssubstrate (vgl. Tab. 18) bestätigt wiederum die These von KATSCHINSKY (1959), dass Polyeder aufgrund ihrer morphologischen Dichte schon äußerst stabil und daher weniger vom Ausgangssubstrat beeinflusst sind. Nach MÜCKENHAUSEN (1993) und AG BODEN (1994) bilden sich allerdings bei höherem Tongehalt häufiger Polyeder, was hier an der Ausprägung der Mesostrukturvariable nicht nachvollzogen werden konnte. Sie hätte bei

einem höherem Polyederanteil der Kalk-Tonmergelproben dort niedriger (Polyeder/Krümel Verhältnis höher) ausfallen müssen als bei den Löss- und Löss auf Mergel-Proben).

Die in Relation zum Polyedertyp generell geringere **Wasserstabilität der Krümel** (vgl. Tab. 10) ist durch die oben beschriebenen Unterschiede im Kalk- und Tongehalt der Ausgangssubstrate stärker beeinflussbar, wie an der höheren Wasserstabilität der Krümel in der „Kalk- und Tonmergel“-Gruppe beobachtet werden konnte (vgl. Tab. 18).

Beim Einflussfaktor Ausgangssubstrat reagiert der dynamische Parameter Aggregatstabilität empfindlicher auf die (chemisch-physikalischen) Unterschiede als die bodenphysikalischen Messungen von **Lagerungsdichte und Abscherwiderstand**, deren Mittelwerte hier keine Unterschiede erkennen lassen (vgl. Anhang Tab. 9).

4.3.3 Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte ist ein wesentlicher Einflussfaktor sowohl für physikalische als auch für biologische Bodenbeurteilungsparameter. Physikalisch nimmt sie über Quellungs- und Schrumpfungseffekte, Bildung von Wassermenisken und Herabsetzen des Reibungswiderstandes und biologisch über die Veränderung der Habitatbedingungen für das Bodenleben und seine Aktivität Einfluss auf die hier erhobenen Parameter Gefügenote, Aggregatstabilität, Aggregatmorphologie, Stabilität der Typengruppen, Lagerungsdichte und Abscherwiderstand. Die Bodenfeuchte selbst ist wiederum von Niederschlag und Temperatur und damit von den Jahreszeiten - aber auch vom Bewuchs - abhängig. Die Spannweite der Bodenfeuchte bei den aus Versuchsansatz 1 (März, Mai und Juli) und Versuchsansatz 2 (Mai) vorliegenden Proben reicht von knapp 8% bis knapp 30% Bodenfeuchte in Versuchsansatz 1 und von 10% bis 25% Bodenfeuchte in Versuchsansatz 2. Bei den drei unterschiedlichen Probenahmeterminen des Versuchsansatzes 1 liegen aber im Dreijahresdurchschnitt jeweils sehr unterschiedliche Spektren der Bodenfeuchte vor (Beispiel: Dreijahresdurchschnitt Oberkrume März: 19,6-29,9% Bodenfeuchte; Juli: 12,4-17,9% Bodenfeuchte).

Bei Bodenfeuchtwerten über 20% liegen höhere Gefügenoten, niedrigere Aggregatstabilität und eine deutlich krümeligere Mesostruktur vor (überwiegend nur in Versuchsansatz 1 signifikant). Abscherwiderstand und Lagerungsdichte zeigen keine unterschiedlichen Werte abhängig von der Bodenfeuchte. Die Wurzeldichte ist bei geringerer Bodenfeuchte höher (vgl. Tab. 20-26).

Die Beobachtungen der höheren **Gefügenoten** (vgl. Tab. 20), niedrigeren **Aggregatstabilität** (vgl. Tab. 21) und deutlich höheren **Mesostrukturwerte** (vgl. Tab. 22) bei Bodenfeuchtwerten über 20% können mit einem sprunghaften Anstieg des Anteils von Pseudokrümeln jeweils zum besonders feuchten Frühjahrstermin (März, Bodenfeuchtespektrum >20%, vgl. Anhang Tab. 12 u. 27) erklärt werden (vgl. HAINES 1930, KULLMANN/KOITZSCH 1956, KULLMANN 1958). Aufgrund der hohen Bodenfeuchte bilden sich über Menisken, wie unter 4.2.4.1 beschrieben, krümelartige Aggregatverbände, die zu einer porösen, das heißt guten räumlichen Struktur (hohe Gefügenote, vgl. Tab. 20) beitragen. Die Meniskenspannung ist dabei im Fall hoher Bodenfeuchte allerdings sehr schwach (HARTGE 1987) und die biologische Aktivität und damit Stabilisierung der Aggregate gleichzeitig im März noch auf einem Niedrigstand (SCHINNER/SONNLEITNER 1996 a). Die Aggregate können durchaus als

Krümel angesprochen werden, befinden sich aber in einem höchst labilen Zustand. Das bedingt zwar eine hohe Gefügenote, da das Gefüge sehr locker, gut durchport und krümelig ist und gute Voraussetzungen für biologische Prozesse bietet, sowie einen höheren Wert für die Mesostruktur. Allerdings sind diese „Pseudokrümel“ äußerst anfällig gegenüber Verschlammung - daher die niedrige Aggregatstabilität gegenüber Wasser (und Druckbelastung, was der Praktiker von frühjahrsfeuchten Böden kennt). Bei reiner Frostgare (in biologisch wenig aktiven Böden) wären zum Vergleich größere Anteile von polyedrischen Aggregaten vorhanden (MÜCKENHAUSEN 1993). Das Gefüge ist dann weniger porös, aber relativ gesehen gegenüber Wassereinwirkung stabiler, da Polyeder bei relativ hoher Bodenfeuchte noch verschlammungsstabil sind (in der Tendenz in Tab. 23 und 25 bestätigt). In diesem Fall liegt im März der umgekehrte Zustand vor. Das Gefüge ist zwar krümelig und daher räumlich positiv zu beurteilen, jedoch gegenüber Wasserverschlammung und Druckbelastung sehr anfällig.

Bei den Ergebnissen des Versuchsansatzes 1 ist der Einfluss der Bodenfeuchte auf die Parameter nicht von der Jahresdynamik zu trennen. Es sind vor allem jahreszeitliche Effekte des Feuchtehaushalts und des Bodenökosystems insgesamt, die zu unterschiedlichen Werten der Parameter bei unterschiedlicher Bodenfeuchte führen. Mit Korrelationen von Stichproben und Bodenfeuchte innerhalb einer Jahreszeit bestehen nur bei der Stabilität der Gruppe der Krümel (vgl. Anhang Tabelle 15) und fast nur im März, da hier das Bodenfeuchtespektrum insgesamt über 20% Bodenfeuchte liegt (vgl. Tab. 24 und Anhang Tab. 12) und der Faktor biologische Aktivität im Vergleich zu den anderen beiden Terminen (Mai und Juli) noch geringere Wirkung hat (SCHINNER/SONNLEITNER 1996 a).

Versuchsansatz 2 zeigt eine sehr viel geringere Beeinflussung der Parameter durch die Bodenfeuchte, da hier die Jahresdynamik ausgeklammert ist. Die Beobachtungen aus Versuchsansatz 1 treffen aber für die Oberkrume gleichermaßen zu:

Bodenfeuchtwerte über 20% gehen auch hier mit besseren **Gefügenoten** (vgl. Tab. 20), tendenziell nachlassender **Aggregatstabilität** (vgl. Tab. 21) und einer krümeligeren **Mesostruktur** (vgl. Tab. 22) einher.

Bei **Lagerungsdichte und Abscherwiderstand** (nur in Versuchsansatz 2 erhoben, vgl. Anhang, Tab. 25 u. 26) ist keine statistisch absicherbare Beeinflussung durch Bodenfeuchtwerte über 20% zu beobachten.

Beim Parameter **Wurzeldichte** wurde ein höherer Wert der Wurzeldichte parallel zu geringeren Bodenfeuchtegehalten (<15%) beobachtet (vgl. Tab. 26). KÖNEKAMP und ZIMMER

(1954) konnten diesen Effekt ebenfalls beobachten und führten ihn auf eine Art „Wassersuche“ bei trockeneren Bodenverhältnissen zurück.

Bleibt festzuhalten, dass bei Bodenfeuchtwerten über 20% mit einer deutlichen Veränderung des Gefügestandes sowohl optisch-räumlich (Eindruck eines krümeligen Aggregatverbandes bei lockerem Gefüge) als auch hinsichtlich der Stabilitätseigenschaften gegenüber Wasserverschlämmung (sehr leichte Verschlammbarkeit) gerechnet werden muss. Aus der Praxis ist die schlechte Befahrbarkeit von Böden mit hoher Frühjahrsbodenfeuchte bekannt. Für die Probenahme zur Gefügebeurteilung muss dieser Zustand als Extremzustand berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei lehmigen Böden bei zunehmender Bodenfeuchte besonders in der Oberkrume von einer Zunahme krümeliger Aggregate ausgegangen werden kann.

Wechselwirkungen der Bodenfeuchte mit den Früchten Grünbrache und Winterweizen beziehungsweise Grünbrache und Roggen werden in Versuchsansatz 1 zwar in den Varianzanalysen (vgl. Anhang, Tab. 13, 17 und 23) für die Oberkrume bei den Parametern Gefügenote, Aggregatstabilität sowie Wasserstabilität der Polyeder und in Versuchsansatz 2 für den Parameter Aggregatmorphologie (vgl. Anhang Tab. 20) ebenfalls für die Oberkrume ausgewiesen, sind aber bei näherer Überprüfung nicht durch die vorhandenen Werte belegbar. Mittelwerte und Spektrum der Bodenfeuchteklassen sind unter beiden Früchten in der Oberkrume nahezu übereinstimmend (vgl. Anhang, Tab. 42) und können so nicht für eine gegenläufige oder verstärkende Tendenz bezüglich der Parameter verantwortlich sein. Beide Faktoren tragen aber insofern gemeinsam einen Anteil an der Erklärung der Varianz, als sie in der hier und unter 4.5.1 und 4.5.2 diskutierten Weise signifikanten oder tendenziellen Einfluss auf diese Parameter haben.

4.4 Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die mit der ESD erfassten Parameter

4.4.1 Fruchtfolgesequenz Sommergerste, Grünbrache, Winterweizen

Die Berechnung der Fruchtfolgeeffekte Sommergerste in 1996, Grünbrache in 1997 und Winterweizen in 1998 erfolgte mit den Daten der Probenahmetermine Mai und Juli für die drei Jahre. Hierdurch wird zum einen der stark durch die Bodenfeuchte beeinflusste Probenahmetermin März ausgeklammert. Zum anderen stehen nur die Probenahmetermine Mai und Juli für alle drei Früchte zur Verfügung. Die Berechnung erfolgte in einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse. Außer dem Faktor Frucht gingen die Faktoren Grundbodenbearbeitung (vgl. Kapitel 4.4.3) und Bodenfeuchte in die Berechnung ein.

GEFÜGENOTE

In der Oberkrume steigt die Gefügenote von Sommergerste über die darauffolgende Grünbrache bis unter Winterweizen gleichmäßig an. Die Unterkrume verhält sich tendenziell gleich, zeigt aber keine signifikante Veränderung. Im Unterboden ist ein leichter Abfall von Sommergerste zur Grünbrache und bis unter Winterweizen wiederum ein Anstieg festzuhalten (vgl. Tab. 27).

Tab. 27: Gefügenoten (1-5*) der Horizonte in der Fruchtfolgesequenz^a

<i>n</i> = 108	<i>Sommergerste 1996</i>	<i>Grünbrache 1997</i>	<i>Winterweizen 1998</i>
Oberkrume	2,60 a	3,15 b	3,64 c
Unterkrume	3,09	3,25	3,33
Unterboden	3,90 a	3,70 ab	4,00 b

* wie in Kapitel 3.3.1, Tab. 5 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 30

AGGREGATSTABILITÄT

Die Aggregatstabilität steigt in den Horizonten Ober- und Unterkrume hoch signifikant über die Fruchtfolge hin an. Dabei ist der Anstieg von Sommergerste zu Grünbrache deutlich höher als der von Grünbrache zu Winterweizen. Im Unterboden ist nur unter Grünbrache ein Anstieg zu beobachten, unter Winterweizen fällt der Wert wieder ab (vgl. Tab. 28).

Tab. 28: Aggregatstabilität (in %*) der Horizonte in der Fruchtfolgesequenz^a

<i>n = 108</i>	<i>Sommergerste 1996</i>	<i>Grünbrache 1997</i>	<i>Winterweizen 1998</i>
Oberkrume	61,4 a	78,2 b	87,4 c
Unterkrume	55,1 a	73,5 b	83,8 c
Unterboden	34,3 a	54,8 b	43,5 ab

* % der max. erreichbaren Aggregatstabilität, wie in Kapitel 3.3.3, Abb. 14 und Kapitel 3.4 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 31

AGGREGATMORPHOLOGIE

Die Werte der Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ sind in der Oberkrume unter Sommergerste recht hoch und liegen unter Grünbrache im Jahr darauf am niedrigsten. Danach ist ein signifikanter Anstieg unter Winterweizen zu verzeichnen. In der Unterkrume ist der Wert unter Grünbrache ebenfalls niedriger als unter Sommergerste, er verändert sich unter Winterweizen dann nicht mehr signifikant. Im Unterboden ist nach einem Anstieg unter Grünbrache nach Sommergerste ein Abfallen auf das Ausgangsniveau unter Winterweizen zu beobachten (Tab. 29).

Tab. 29: Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ (1-3*) der Horizonte in der Fruchtfolgesequenz^a

<i>n = 108</i>	<i>Sommergerste 1996</i>	<i>Grünbrache 1997</i>	<i>Winterweizen 1998</i>
Oberkrume	2,25 a	2,07 b	2,14 c
Unterkrume	2,26 a	2,10 b	2,11 b
Unterboden	2,10 a	2,26 b	2,11 a

* wie in Kapitel 3.4 und 4.1 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 32

Der niedrige Wert der Mesostrukturvariable in Ober- und Unterkrume unter Grünbrache entspricht zunächst nicht den Erwartungen einer Struktur mit höherem Krümelanteil unter der Regenerationsfrucht Grünbrache. Mit der Aufschlüsselung der Werte in die für die Analyse der Fruchtfolgesequenz in die Berechnungen eingegangenen 6 Probenahmeterminen wird die Dynamik der Mesostruktur differenzierter interpretierbar. Nach hohen Werten im Juli 1996 unter Sommergerste ist in Ober- und Unterkrume im Mai 1997 unter Grünbrache eine starke Depression des Mittelwerts zu beobachten. Danach ist ein Anstieg in beiden Horizonten unter Grünbrache zu verzeichnen, der sich in der Oberkrume bis unter Winterweizen fortsetzt und wieder das Niveau von Mai 1996 erreicht. In der Unterkrume ist nach dem Anstieg unter Grünbrache nach einem gleichbleibenden Wert unter Winterweizen im Mai dann bis Juli ein Abfall des Wertes zu beobachten (vgl. Abb. 26 und 27).

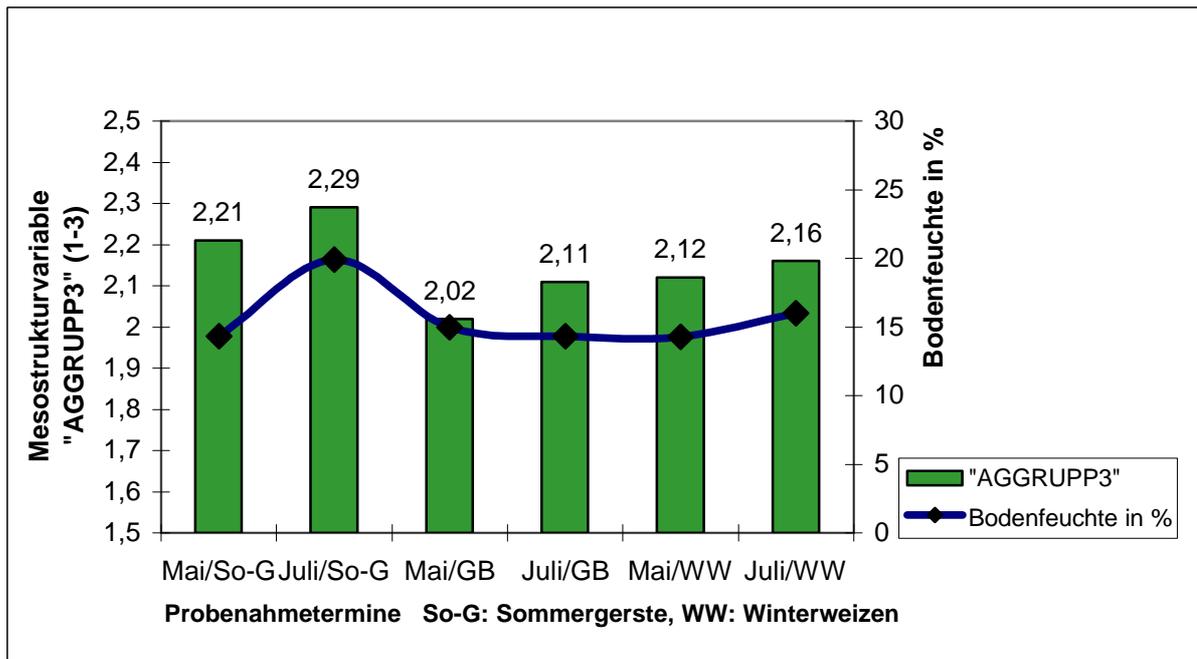


Abb. 26: Bodenfeuchte und Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ an den 6 Probenahmeterminen der Fruchtfolgesequenz in der Oberkrume

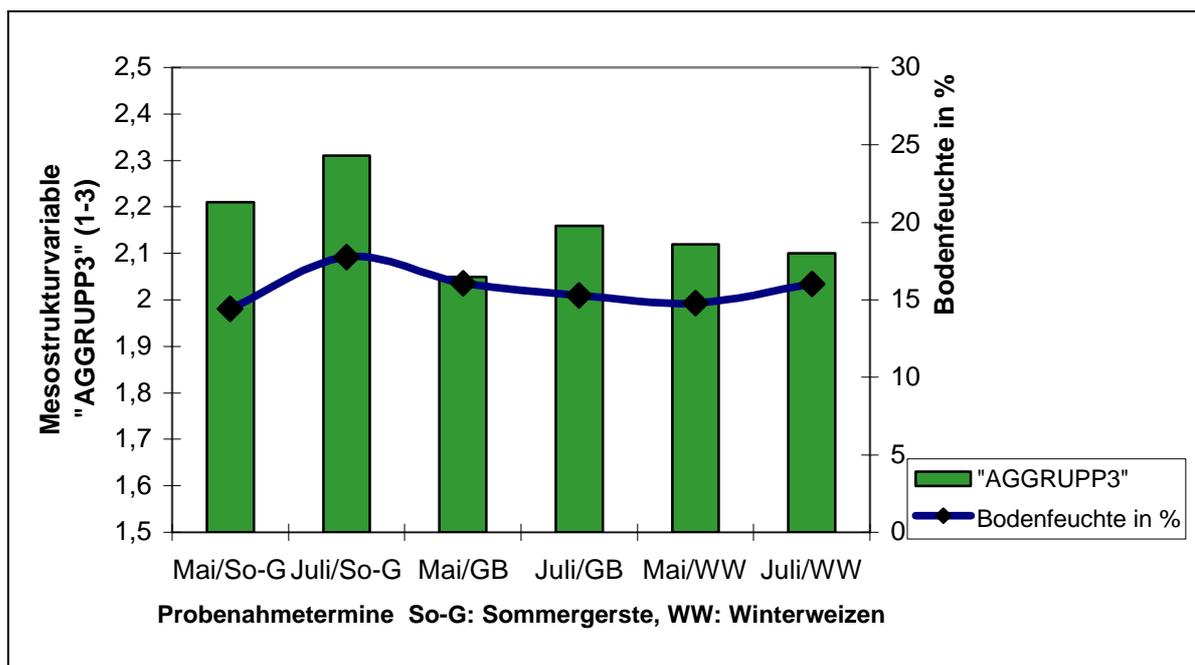


Abb. 27: Bodenfeuchte und Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ an den 6 Probenahmeterminen der Fruchtfolgesequenz in der Unterkrume

Im Vergleich mit dem Verlauf der Bodenfeuchte zu den gleichen Terminen wird deutlich, dass der Piek des Mittelwertes der Mesostrukturvariable im Juli 1996 unter Sommergerste mit einem Piek in der Bodenfeuchte zusammenfällt, der sich zu den anderen beiden Juli-Terminen 1997 unter Grünbrache und 1998 unter Winterweizen nicht wiederholt. Der Tiefstand der Mesostrukturvariable im Mai 1997 unter Grünbrache wird vermutlich neben einer geringeren Bo-

denfeuchte auch durch die im August 1996 vorausgegangene Grundbodenbearbeitung verursacht, die innerhalb des Untersuchungszeitraums auf den Parzellen des Versuchsansatzes 1 nur zu diesem Termin vorgenommen wurde. Weitere Einflüsse spielen mit Sicherheit eine Rolle, sind hier aber aus der Datenlage nicht zu entschlüsseln.

WASSERSTABILITÄT DER TYPENGRUPPEN

Die Stabilität der einzelnen Typengruppen ist jeweils unter Grünbrache signifikant höher als unter Sommergerste. Der Krümeltyp zeigt darüber hinaus in Ober- und Unterkrume auch unter Winterweizen noch einen signifikanten Anstieg der Wasserstabilität. Die Gruppe der Polyeder zeigt nach dem Anstieg des Wertes unter Grünbrache unter Winterweizen keinen signifikant höheren Wert mehr (Tab. 30).

Tab. 30: Wasserstabilität (0-2*) der Typengruppen in den Horizonten für die Fruchtfolgesequenz^a

		<i>Sommergerste</i> <i>1996</i>	<i>Grünbrache</i> <i>1997</i>	<i>Winterweizen</i> <i>1998</i>
Oberkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 36	1,5 a	1,8 b	1,9 b
	Krümeltyp <i>n</i> = 36	1,1 a	1,3 a	1,6 b
Unterkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 34	1,1 a	1,6 b	1,9 b
	Krümeltyp <i>n</i> = 36	0,9 a	1,2 b	1,4 c
Unterboden	Polyedertyp <i>n</i> = 29	0,7 a	1,6 b	1,2 b
	Krümeltyp <i>n</i> = 35	0,6 a	1,0 b	0,7 ab

* wie in Kapitel 3.3.3, Tab. 7 und Abb. 14 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 33 u. 34

4.4.2 Fruchtartenvergleich Grünbrache und Winterroggen

Für den Vergleich der Fruchtarten Grünbrache und Winterroggen wurden die Daten des Versuchsansatzes 2 mit den Faktoren Bodenbearbeitung und Bodenfeuchte in einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse verrechnet.

GEFÜGENOTE

Die Gefügenote ist unter Grünbrache in der Unterkrume signifikant höher als unter Roggen. In den übrigen Horizonten ist die Tendenz gleich, aber nicht statistisch absicherbar (vgl. Tab. 31).

Tab. 31: Gefügenote (1-5*) in den Horizonten im Fruchtartenvergleich Winterroggen und Grünbrache^a

<i>n</i> = 108	<i>Grünbrache</i>	<i>Roggen</i>
Oberkrume	3,59	3,19
Unterkrume	3,29 a	3,08 b
Unterboden	3,63	3,59

* wie in Kapitel 3.3.1, Tab. 5 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 16

AGGREGATSTABILITÄT

Die Aggregatstabilität ist in der Unterkrume unter Grünbrache signifikant höher als unter Roggen. Die Tendenz ist wiederum in den anderen beiden Horizonten gleich, jedoch nicht signifikant absicherbar (vgl. Tab. 32).

Tab. 32: Aggregatstabilität (in %*) in den Horizonten im Fruchtartenvergleich Winterroggen und Grünbrache^a

<i>n</i> = 108	<i>Grünbrache</i>	<i>Roggen</i>
Oberkrume	72,1	63,9
Unterkrume	69,8 a	55,2 b
Unterboden	52,4	45,6

* % der max. erreichbaren Aggregatstabilität, wie in Kapitel 3.3.3, Abb. 14 und Kapitel 3.4 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 18

AGGREGATMORPHOLOGIE

Die Mesostruktur zeigt in allen Horizonten keine signifikant höhere Krümeligkeit für eine der beiden Früchte (vgl. Tab. 33).

Tab. 33: Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“ (1-3*) in den Horizonten im Fruchtartenvergleich Winterroggen und Grünbrache^a

<i>n = 108</i>	<i>Grünbrache</i>	<i>Roggen</i>
Oberkrume	2,13	2,12
Unterkrume	2,15	2,21
Unterboden	2,06	2,05

* wie in Kapitel 3.4 und 4.1 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 20

WASSERSTABILITÄT DER TYPENGRUPPEN

Die Stabilität beider Typengruppen ist unter Grünbrache tendenziell, aber nicht signifikant höher als unter Roggen (Tab. 34).

Tab. 34: Wasserstabilität (Bonitur 0-2*) der Typengruppen in den Horizonten im Fruchtartenvergleich Winterroggen und Grünbrache^a

<i>n = 108</i>		<i>Grünbrache</i>	<i>Roggen</i>
Oberkrume	Polyedertyp, <i>n = 35</i>	1,71	1,63
	Krümeltyp, <i>n = 36</i>	1,15	1,06
Unterkrume	Polyedertyp, <i>n = 35</i>	1,61	1,49
	Krümeltyp, <i>n = 35</i>	1,14	0,76
Unterboden	Polyedertyp, <i>n = 32</i>	1,41	1,20
	Krümeltyp, <i>n = 34</i>	0,76	0,62

* wie in Kapitel 3.3.3, Tab. 7 und Abb. 14 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 22 u. 24

LAGERUNGSDICHTE, ABSCHERWIDERSTAND UND WURZELDICHTE

Lagerungsdichte und Abscherwiderstand sind unter Grünbrache in allen Horizonten tendenziell, aber nicht signifikant niedriger als unter Roggen. Die Wurzel­dichte zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen Grünbrache und Roggen (Tab. 35).

Tab. 35: Lagerungsdichte, Abscherwiderstand und Wurzel­dichte in den Horizonten im Fruchtartenvergleich Winterroggen und Grünbrache^a

<i>n = 108</i>	<i>Grünbrache</i>	<i>Roggen</i>
Lagerungsdichte in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, Oberkrume	1,25	1,31
Lagerungsdichte in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, Unterkrume	1,31	1,36
Lagerungsdichte in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, Unterboden	1,38	1,41
Abscherwiderstand in Nm, Oberkrume	26,1	37,8
Abscherwiderstand in Nm, Unterkrume	61,7	74,8
Abscherwiderstand in Nm, Unterboden	116,5	119,7
Wurzel­dichte pro cm^2 im Unterboden, <i>n = 24</i>	0,63	0,56

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 25, 26 u. 28

4.4.3 Effekte der differenzierten Intensität der Grundbodenbearbeitung

Für den Vergleich der Grundbodenbearbeitungsvarianten wurden für beide Versuchsansätze sämtliche Probenahmeterminale der drei Jahre 1996-1998 (Versuchsansatz 1: insgesamt 9 und Versuchsansatz 2: insgesamt 3) in zwei mehrfaktoriellen Analysen verrechnet¹. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt wiederum nach den Versuchsansätzen 1 und 2 getrennt.

GEFÜGENOTE

Die Gefügenoten zeigen für die drei Grundbodenbearbeitungsvarianten in Versuchsansatz 1 und 2 in allen Horizonten keine statistisch absicherbaren Unterschiede (Tab. 36).

Tab. 36: Gefügenote (1-5*) in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansätze 1 und 2^a

<i>Versuchsansatz 1, n = 162</i>	<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Oberkrume	3,5	3,8	3,5
Unterkrume	3,3	3,4	3,4
Unterboden	3,9	3,9	3,8
<i>Versuchsansatz 2, n = 108</i>	<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Oberkrume	3,4	3,4	3,2
Unterkrume	3,3	3,2	3,3
Unterboden	3,7	3,7	3,6

* wie in Kapitel 3.3.1, Tab. 5 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 16 u. 36

AGGREGATSTABILITÄT

Die Aggregatstabilität zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Grundbodenbearbeitungsvarianten. Die Werte der nicht wendenden (Schichtengrubber) und flach wendenden (Schichtenpflug) Variante fallen in der Ober- und Unterkrume (für Versuchsansatz 1 signifikant) höher aus als die der krumentief wendenden Variante (Pflug). Im Unterboden dreht sich dieses Verhältnis in beiden Versuchsansätzen um. Diese Beobachtung ist allerdings nicht statistisch absicherbar (Tab. 37).

¹ Der Faktor Frucht wurde zwar in die Varianzanalyse mit hereingenommen, ist aber aufgrund der unterschiedlichen Probenahmeterminale für jede Frucht und demnach aufgrund verschiedener Gruppengrößen für Wechselwirkungen hier nicht interpretierbar.

Tab. 37: Aggregatstabilität (in %*) in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansätze 1 und 2^a

<i>Versuchsansatz 1, n = 162</i>	<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Oberkrume	78,2 a	73,1 b	66,2 c
Unterkrume	74,9 a	71,1 a	65,0 b
Unterboden	46,2	47,6	49,0
<i>Versuchsansatz 2, n = 108</i>	<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Oberkrume	72,6	68,8	62,1
Unterkrume	65,1	65,1	58,8
Unterboden	45,0	49,7	52,5

* % der max. erreichbaren Aggregatstabilität, wie in Kapitel 3.3.3, Abb. 14 und Kapitel 3.4 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 18 u. 37

AGGREGATMORPHOLOGIE

In der Oberkrume zeigen die Grundbodenbearbeitungsvarianten in beiden Versuchsansätzen keine Unterschiede in der Mesostruktur. Die Mesostrukturvariable zeigt in Versuchsansatz 1 für Pflug in der Unterkrume einen signifikant höheren Wert im Vergleich zum Schichtenpflug. Im Unterboden und in Versuchsansatz 2 sind keine Unterschiede festzustellen (Tab. 38).

Tab. 38: Mesostrukturvariable „AGGRUPP 3“ (1-3*) in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansätze 1 und 2^a

<i>Versuchsansatz 1, n = 162</i>	<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Oberkrume	2,18	2,17	2,18
Unterkrume	2,17 ab	2,12 a	2,22 b
Unterboden	2,04	2,08	2,09
<i>Versuchsansatz 2, n = 108</i>	<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Oberkrume	2,12	2,14	2,10
Unterkrume	2,14	2,10	2,13
Unterboden	2,07	2,08	2,06

* wie in Kapitel 3.4 und 4.1 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 20 u. 38

WASSERSTABILITÄT DER TYPENGRUPPEN

Die Wasserstabilität der Typengruppen weist in beiden Versuchsansätzen analog zur Gesamttaggregatstabilität in den Horizonten überwiegend für beide Typengruppen die (zum Teil signifikante) Tendenz zu niedrigeren Werten der wendenden Variante (Pflug) gegenüber der nicht wendenden (Schichtengrubber) oder flach wendenden Variante (Schichtenpflug) auf (vgl. Tab. 39).

Tab. 39: Wasserstabilität (0-2*) der Typengruppen in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansatz 1 und 2^a

<i>V1</i>		<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Oberkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 52	1,68 a	1,82 b	1,61 a
	Krümeltyp <i>n</i> = 54	1,42	1,18	1,13
Unterkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 48	1,66	1,63	1,48
	Krümeltyp <i>n</i> = 54	1,26	1,16	1,07
Unterboden	Polyedertyp <i>n</i> = 39	1,22	1,37	1,21
	Krümeltyp <i>n</i> = 53	0,86	0,79	0,84
<i>V2</i>		<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Oberkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 35	1,60	1,76	1,62
	Krümeltyp <i>n</i> = 36	1,22 a	1,11 ab	0,93 b
Unterkrume	Polyedertyp <i>n</i> = 35	1,63	1,48	1,45
	Krümeltyp <i>n</i> = 35	0,98	1,03	0,87
Unterboden	Polyedertyp <i>n</i> = 32	1,18	1,48	1,28
	Krümeltyp <i>n</i> = 34	0,78	0,65	0,68

V1 = Versuchsansatz 1, V2 = Versuchsansatz 2

* wie in Kapitel 3.3.3, Tab. 7 und Abb. 14 beschrieben

^a Berechnung vgl. Anhang, Tab. 22, 24, 39 und 40

LAGERUNGSDICHTE, ABSCHERWIDERSTAND UND WURZELDICHTE

Die Lagerungsdichte zeigt in den Horizonten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Grundbodenbearbeitungsvarianten (vgl. Tab. 40).

Tab. 40: Lagerungsdichte, Abscherwiderstand und Wurzeldichte in den Horizonten in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten, Versuchsansatz 2

<i>n</i> = 108	<i>Schichtengrubber</i>	<i>Schichtenpflug</i>	<i>Pflug</i>
Lagerungsdichte in g·cm ³ , Oberkrume	1,27	1,25	1,30
Lagerungsdichte in g·cm ³ , Unterkrume	1,34	1,31	1,32
Lagerungsdichte in g·cm ³ , Unterboden	1,43	1,34	1,39
Abscherwiderstand in Nm, Oberkrume	31,1	33,5	32,1
Abscherwiderstand in Nm, Unterkrume	76,2	67,7	58,5
Abscherwiderstand in Nm, Unterboden	117,1	114,8	120,6
Wurzeldichte in cm ² im Unterboden, <i>n</i> = 24	0,61	0,60	0,59

Bei den Abscherwiderständen sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Grundbodenbearbeitungsvarianten zu beobachten. Die krumentief wendende Variante (Pflug) zeigt in der Unterkrume einen niedrigeren Wert als die nicht wendende (Schichtengrubber) und flach wendende Variante (Schichtenpflug). Beim Übergang Unterkrume zum Unterboden ist beim Pflug ein für Pflugbearbeitung typischer extremerer Anstieg des Abscherwiderstands zu bemerken, während der Übergang zum Unterboden bei den anderen beiden Grundbodenbearbeitungsvarianten weniger extrem ausfällt.

Die Wurzelichte im Unterboden zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten.

4.5 Diskussion

4.5.1 Fruchtfolgesequenz Sommergerste, Grünbrache, Winterweizen

Die Grünbrache erfüllt innerhalb einer ökologischen Fruchtfolge mehrere Aufgaben, die sowohl direkt als auch indirekt die Entwicklung der Bodenstruktur fördern (vgl. HAMPL 1995 c, SCHNEIDER/EMMERLING/SCHRÖDER 1995). Sie sorgt für eine Erhöhung der Artenvielfalt im System und als Gründüngung für die Versorgung mit Nährstoffen (v.a. C und N). Durch den Lebendverbau der Bodenstruktur mit Wurzeln wird der technisch gelockerte Zustand direkt stabilisiert. Unter Grünbrache wurde daher innerhalb der in Versuchsansatz 1 beprobten Fruchtfolge (vgl. Abb. 8, Kapitel 3.2) bei gleichem Ausgangssubstrat ein verbesserter Strukturzustand der Ackerkrume erwartet.

Der Fruchtfolgeeffekt der Grünbrache auf Gefügenote, Aggregatstabilität und Wasserstabilität der Typengruppen ist deutlich und überwiegend hoch signifikant:

Nach Sommergerste ist unter Grünbrache eine höhere Gefügenote und ein Anstieg der Aggregatstabilität bis unter Winterweizen zu beobachten, während die Mesostrukturvariable unter Grünbrache die niedrigsten Werte - und damit einen geringeren Anteil an Krümeln - zeigt. Auf ihre Stabilität getestet zeigen Aggregate des Krümeltyps unter Grünbrache einen signifikanten Stabilitätsanstieg, ebenfalls bis unter Winterweizen. Aggregate des Polyedertyps zeigen nur unter Grünbrache einen Anstieg der Stabilität. Diese bleibt dann unter Winterweizen gleich hoch (vgl. Tab. 27-30).

Mit der Erhöhung der **Gefügenote** unter Grünbrache (vgl. Tab. 27) lässt sich die Lebendverbauung der vorangegangenen Lockerung (Grundbodenbearbeitung) durch die vielfältige Durchwurzelung nachvollziehen (vgl. HAMPL 1995 c).

Die **Aggregatstabilität** steigt unter Grünbrache ebenfalls deutlich an. Dieser Effekt setzt sich noch bis unter die Folgefrucht Winterweizen fort (vgl. Tab. 28). Auch HÖVELMANN/FRANKEN (1993) konnten nach Klee gras einen Anstieg der Aggregatstabilität bis unter die Folgefrucht Zuckerrüben beobachten. Durch Wurzelausscheidungen und -abbau des leguminosenbetonten Gemenges werden Bodenorganismen stimuliert (vgl. AICHINGER 1995 et al., HÖFLICH 1996) und die mikrobielle Aktivität wird erhöht (vgl. KANDELER et al. 1995). Dies sorgt für den Aufbau und die Stabilisierung von Aggregaten (vgl. VASILU 1958, KANDELER/MURER 1993, AICHINGER et al. 1995, SCHNEIDER/EMMERLING/SCHRÖDER 1995).

Die Werte der **Mesomorphologie** zeigen zunächst einmal unerwartet unter Grünbrache niedrigere Werte (vgl. Tab. 29). Wie schon in Kapitel 4.3.3 ausgeführt, ergibt sich eine ausgeprägte jahreszeitliche Dynamik des Auf- und Abbaus krümeliger, poröser Aggregate im Zusammenhang mit der Bodenfeuchte - vor allem in der Oberkrume. Beim Auseinanderziehen der jahreszeitlichen Probenahmefolge wird deutlich, dass der Piek der Mesostrukturvariable „AGGRUPP3“ im Juli 1996 unter Sommergerste, vor Einsetzen des Grünbracheeffektes, in Ober- und Unterkrume mit einem zeitgleichen starken Piek in der Bodenfeuchte zusammenfällt und daher mit großer Wahrscheinlichkeit auf die schon erwähnte starke Bildung von Pseudokrümeln bei hoher Bodenfeuchte (über 20%) zurückzuführen ist (vgl. Abb. 26 und 27). Auch sprechen die im Vergleich niedrigeren Werte der Mesostrukturvariable in Juli 1997 und Juli 1998 ohne Bodenfeuchtepiek dafür. Dieser Effekt erhöht den hohen Durchschnittswert der Mesostrukturvariable unter Sommergerste zusätzlich. Die starke Ausprägung der Depression der Mesostrukturvariable im Mai 1997 unter Grünbrache dürfte, neben bekannten biologischen Aggregatabbau- und Destabilisierungsprozessen während des Winters (Verringerung Anteil Krümeltyp, vgl. SLATER/HOPP 1951, ZACHARTSCHENKO 1956, CZERATZKI 1957, SCHACHTSCHABEL/HARTGE 1958, HÖVELMANN/FRANKEN 1993) bei gleichzeitiger Frostgarebildung (Zunahme Anteil Polyedertyp, vgl. MÜCKENHAUSEN 1993) und der niedrigeren Bodenfeuchte unter Grünbrache im Vergleich zur Bodenfeuchte im gleichen Zeitraum unter Gerste (vgl. Anhang, Tab. 41) in diesem Fall auch auf die im August 1996 vorausgegangene Grundbodenbearbeitung und damit Zerstörung vorhandener Krümel zurückzuführen sein (vgl. VASILIU 1958). Die Überprüfung der Wechselwirkungen zwischen Fruchtfolge und Bodenbearbeitung ergab einen Rückgang der Mesostrukturvariable nach der Grundbodenbearbeitung. Dieser war besonders stark bei Pflugbearbeitung (vgl. Anhang, Tab. 35). Im Mai 1998 - ohne Störung durch eine Grundbodenbearbeitung - ist unter Winterweizen in der Oberkrume statt einer Depression ein Gleichstand zum Juli 1997 (Grünbrache) zu beobachten und in der Unterkrume fällt die Depression im Mai 1998 ebenfalls schwächer aus als im Jahr zuvor (vgl. Abb. 26 und 27). Von Mai bis Juli 1997 ist unter Grünbrache mit der Erhöhung der Werte der Mesostrukturvariable in Ober- und Unterkrume ein Aufbau an krümeligen Aggregaten zu verzeichnen, der in der Unterkrume im Juli 1997 das Niveau von Mai 1996 (hier aber vor allem aufgrund hoher Bodenfeuchte) fast wieder erreicht. Unter Grünbrache 1997 allerdings bei gleichzeitig deutlich höherer Aggregatstabilität, was auf biologisch bedingten Krümelaufbau und -stabilisierung schließen lässt.

Die **Wasserstabilität der Typengruppen** zeigt, wie Gefügenreue und Gesamtaggregatestabilität, deutlich höhere Werte unter Grünbrache, wobei der Anstieg der Wasserstabilität des Krümeltyps noch bis unter die Folgefrucht anhält (vgl. Tab. 30). Hier kann vorsichtig vermutet werden, dass der Grünbracheeffekt nicht nur zu einer vermehrten Krümelbildung, sondern auch zu einer relativ dauerhaften Krümelstabilisierung beiträgt.

Die Betrachtung der Stabilisierung der Aggregate und der nach der Grundbodenbearbeitung verspätet einsetzenden Krümelbildung unter Grünbrache in der Fruchtfolgefolge bis unter die Folgefrucht unterstreicht die Notwendigkeit, den Eingriff der Grundbodenbearbeitung mit gefügeregenerierenden Zwischenfrüchten oder Grünbrache zu kombinieren (vgl. HAMPL 1995 c).

Wechselwirkungen zwischen Bodenbearbeitung und Bodenfeuchte in der Oberkrume für den Parameter Aggregatmorphologie, die aus der hier verwendeten Berechnung zum Hauptfaktor Fruchtfolge (Anhang, Tab. 32) zu entnehmen sind, lassen sich durch eine Überprüfung der Bodenfeuchte für die Bodenbearbeitungsvarianten nicht erklären. Zwar ist die Oberkrume bei Schichtengrubberbearbeitung etwas feuchter gegenüber Pflugbearbeitung (vgl. Tab. 44, Anhang), dies geht jedoch weder mit signifikant höheren noch niedrigeren Werten der Mesostrukturvariable bei Schichtengrubber gegenüber Pflug im DUNCAN-Test (Tab. 45, Anhang) zur oben genannten Varianzanalyse (vgl. Anhang, Tab. 32) einher. Ein gleichläufiger oder gegenläufiger Zusammenhang ist hier nicht ersichtlich.

4.5.2 Fruchtartenvergleich Grünbrache und Winterroggen

Während bei der Fruchtfolge Sommergerste, Grünbrache, Winterweizen die Effekte der Grünbrache nicht unter gleichen Jahresbedingungen mit den beiden anderen Früchten verglichen werden können, sind beim Vergleich Grünbrache und Roggen in Versuchsansatz 2 (vgl. Abb. 9, Kapitel 3.2) gleiche Jahresbedingungen gegeben. Allerdings liegt in Versuchsansatz 2 eine Beeinflussung durch inhomogenes Ausgangssubstrat und den jährlich stattfindenden Flächenwechsel vor. In Versuchsansatz 2 wird keine dynamische Entwicklung des Gefügestands beurteilt, sondern der Zustand unter zwei unterschiedlichen Früchten zu gleichen Terminen. Im Vergleich zu Roggen lässt sich die angenommene Stimulierung der biologischen Aktivität unter Grünbrache mit den verwendeten Parametern nachvollziehen.

Die höhere Aggregatstabilität ist begleitet von einem deutlich besseren Gefügestand (Gefügenote) in der Unterkrume. Die übrigen Werte zeigen ebenfalls vor allem in der Unterkrume tendenziell einen besseren und stabileren Strukturzustand unter Grünbrache im Vergleich zu Roggen: Tendenz zu höherer Mesostrukturvariable, höherer Stabilität der Typengruppen sowie niedrigerer Lagerungsdichte und geringerem Abscherwiderstand (vgl. Tab. 31-35).

Vergleichbare Ergebnisse beschrieben für Aggregatstabilität und Gefüge auch VASILIU (1958), KANDELER/MURER (1993), AICHINGER et al. (1995), SCHNEIDER/EMMERLING/SCHRÖDER (1995) und neben diesen für Abscherwiderstand und Lagerungsdichte BESTE (1996) und HAMPL (1995 b).

Die Unterschiede fallen jedoch geringer aus als erwartet. Die Ergebnisse des Kapitel 4.2.3 zeigen einen häufigen Zusammenhang zwischen erhöhtem Mittelwert der Mesostrukturvariable und hoher Bodenfeuchte vor allem im jahreszeitlichen Bodenfeuchteverlauf. Dieser kommt beim Vergleich der Fruchtarten Grünbrache und Roggen (Versuchsansatz 2, Probenahme jeweils nur im Mai 1996-1998) jedoch nicht zum tragen. Zudem wirkt sich eine witterungsbedingt unterschiedliche Bodenfeuchte des jeweiligen Jahres bei Versuchsansatz 2 gleichzeitig auf beide Früchte aus. Einen Beitrag zur Erklärung der insgesamt niedriger als erwartet ausfallenden Werte der Aggregatstabilität und der Mesostrukturvariable unter Grünbrache kann wiederum der zeitliche Abstand zur jeweils im August vor Grünbrache vorausgegangenen Grundbodenbearbeitung liefern. Der Abstand zur letzten Grundbodenbearbeitung ist unter Grünbrache sehr viel kürzer (9 Monate) als unter Roggen (21 Monate). Auch VASILIU (1958) konnte

beobachten, dass sich dieser technisch intensive Eingriff zunächst destabilisierend auf die natürlich gebildeten, mechanisch relativ locker zusammenhängenden Krümel-Aggregate auswirkt. Zusätzlich werden künstliche Aggregate des Polyedertyps (im strengen Sinne Segregate) durch die Zerschlagung von größeren Einheiten bei der Bodenbearbeitung gebildet - wie in 4.3.3.1 ausgeführt - bei Pflugbearbeitung stärker.

Die beprobten Grünbracheparzellen sind 1997 in Versuchsansatz 1 und 2 jeweils dieselben. Die Diagramme der Probenahmetermine der Mesostrukturvariable in Kapitel 4.4.1 (Abb. 26 und 27) zeigen eine starke Depression im Mai 1997 unter Grünbrache nach der Grundbodenbearbeitung (diese erfolgte im August 1996), auf die direkt noch unter Grünbrache bis zum Juli 1997 eine Erhöhung des Wertes folgt.

Abschließend betrachtet, ist ein Vergleich des Bodenzustands unter Grünbrache und Roggen ausschließlich im Mai zu isoliert, um bei ungleichem Abstand zu einer vorausgegangenen Grundbodenbearbeitung und den durch den Flächenwechsel verstärkten Inhomogenitäten der Probenahmestandorte die deutlichen Auswirkungen der Grünbrache auf die Bodenregeneration zu zeigen. Diese werden in der Betrachtung der Fruchtfolgesequenz (Versuchsansatz 1) mit einheitlicheren Bodenverhältnissen und höherer Zahl an Probenahmeterminen in ihrer zeitlichen Entwicklung besser aufgezeigt (vgl. Kapitel 4.4.1).

Beim direkten, zeitgleichen Vergleich des Bodenzustands unter Grünbrache und Roggen muss festgehalten werden, dass ein besserer Strukturzustand unter Grünbrache tendenziell gegeben, aber nicht deutlich ausgeprägt ist.

4.5.3 Effekte der differenzierten Intensität der Grundbodenbearbeitung

Die Grundbodenbearbeitung stellt einen stark störenden Eingriff in das Ökosystem Boden dar. Bei krumentiefer Wendung wurde wiederholt eine stärkere Störung der Bodenbiozöosen beobachtet als bei nicht wendender Bearbeitung (vgl. FRIEBE 1995, HAMPL 1995 b).

Die Bodenbearbeitungsvarianten zeigen im zweiten bis vierten Jahr der Versuchszeit des Projektes Ökologische Bodenbewirtschaftung wenig bis kaum statistisch absicherbare Unterschiede:

Gefügenreife, Aggregatmorphologie, Stabilität der Typengruppen sowie Lagerungsdichte und Abscherwiderstand zeigen kaum signifikante Unterschiede in Abhängigkeit von den Grundbodenbearbeitungsvarianten. Allein die Aggregatstabilität zeigt für die nicht wendende Variante (Schichtengrubber) in Ober- und Unterkrume einen signifikant höheren Wert als für die krumentief wendende Variante (Pflug) (vgl. Tab. 36-40).

Die unterschiedliche Wendintensität zeigte sich durch die unterschiedliche Verlagerung organischen Materials und die unterschiedlich starke Störung biologischer Faktoren in der **Aggregatstabilität**, die mit der Intensität der Wendung in Ober- und Unterkrume signifikant abnimmt (vgl. Tab. 37), was mit der stärkeren Störung biologischer Prozesse bei zunehmender Wendintensität erklärt werden kann (vgl. HÖVELMANN/FRANKEN 1993, KÖLLER 1993). Im Unterboden dreht sich dieses Verhältnis tendenziell um. Dieser Effekt könnte mit der Verlagerung organischen Materials in größere Bodentiefen bei wendender Bearbeitung zusammenhängen. Die Werte von EMMERLING (1997 u. 1998) und SEITZ (1997) für C_{org} -Gehalt und mikrobiologische Parameter der hier vorliegenden Versuchsflächen zeigen, dass der Mischeffekt durch Pflugbearbeitung zu jeweils ausgeglicheneren (C_{org}) oder auch zum Teil umgekehrten Verhältnissen (mikrobielle Biomasse, biologische Aktivität) der Ober- und Unterkrumenwerte auf jeweils niedrigerem Niveau für Pflug im Vergleich zu Schichtengrubber führt. Dies wurde für den Vergleich wendender mit nicht wendender Bodenbearbeitung vielfach dokumentiert (FRANKEN/LOH 1986, TEBRÜGGE 1989, BÖHM et al. 1990, KANDELER et al. 1995, STOCKFISCH et al. 1995).

Möglicherweise führt dieser Mischungseffekt in der Pflugvariante auch zu stärkerer Krümelverlagerung in die Unterkrume, was den dort höheren Wert der **Mesostrukturvariable** bei Pflug im Vergleich zu den anderen beiden Varianten erklären könnte (vgl. Tab. 38).

Aufgrund der Störung der Biozöosen bei der Wendung ist dieser Effekt aber offensichtlich nicht mit einer Erhöhung der **Stabilität der Krümel** in der Unterkrume verbunden. Diese und die **Stabilität der Polyeder** ist in der Variante Pflug entsprechend der Gesamtaggregatstabilität in Ober- und Unterkrume tendenziell geringer als in der Variante Schichtengrubber - und weniger deutlich Schichtenpflug (vgl. Tab. 39). Im nicht direkt von der Bearbeitung betroffenen Unterboden kann sich die Verlagerung organischen Materials bis in größere Tiefen (30 cm) durch den Pflug unter Umständen aggregat- und krümelstabilisierend auswirken (vgl. EMMERLING 1997 und 1998), was die Umkehrung der Werte im Unterboden erklären könnte. Die Tendenzen sind allerdings zu schwach und zu uneinheitlich, um diese These zu stützen. Als Wechselwirkung der Bodenbearbeitungsvarianten mit den Fruchtarten (Anhang, Tab. 34) lässt sich für die Polyederstabilität in Versuchsansatz 1 festhalten, dass sie unter Grünbrache und bei Schichtenpflugbearbeitung im Unterboden tendenziell höher liegt (s. Tab. 30 und 39). Die Gründe für eine hohe Stabilität aller Aggregate unter Grünbrache, die sich auch auf die Polyeder auswirkt, sind unter 4.3.3.1 diskutiert. Der Schichtenpflug mag aufgrund seiner Wendung organisches Material in tiefere Bodenschichten verlagern und aufgrund seiner schonenderen Lockerung in der Unterkrume (Lockerungsschar statt schichtenanhebende Grubberflügel) das Bodenleben weniger stören, was auch im Unterboden zu tendenziell höherer Stabilität der Aggregate führen kann. Bei den Krümeln ist dies nicht zu beobachten - hier sind die Werte der Gruppen Polyeder und Krümel untereinander aber aufgrund verschiedener Gruppengrößen nicht vergleichbar. Beide Wirkungen im Falle von Schichtenpflugbearbeitung unter Grünbrache bewirken jedenfalls einen Summeneffekt für die Stabilität der Polyeder.

Die **Lagerungsdichte** zeigt keine statistisch absicherbaren Unterschiede zwischen den Grundbodenbearbeitungsvarianten (vgl. Tab. 40). Beim **Abscherwiderstand** (vgl. Tab. 40) ist der häufig beschriebene abrupte Wechsel von lockerer Krume zu dichtem Unterboden bei Pflug und gleichmäßigerem Anstieg der Dichte bei Schichtengrubber zu beobachten (vgl. EITZINGER/KLAGHOFER 1995, BESTE 1996). Häufig bedingt dieser Effekt eine schlechtere Durchwurzelbarkeit des Unterbodens, wenn bei wendender Bearbeitung (Pflug) Plugsohlenverdichtung vorliegt.

Dies wird von den hier vorliegenden Daten nicht bestätigt. Die **Wurzeldichte** zeigt keine Unterschiede in Abhängigkeit der Grundbodenbearbeitungsvarianten (vgl. Tab. 40).

Wechselwirkungen der Bodenbearbeitung mit dem Faktor Bodenfeuchte für den Parameter Aggregatmorphologie in der Unterkrume in Versuchsansatz 2, die Tabelle 20 im Anhang zu

entnehmen sind, lassen sich auf einen signifikant höheren Wert der Mesostrukturvariable bei der höchsten Feuchtestufe ($> 20\%$, vgl. Tab. 22 Kapitel 4.2.3) und einen tendenziell höheren Wert der Mesostrukturvariable bei der geringsten Wendeintensitätsstufe (Schichtengrubber, vgl. Tab. 38 Kapitel 4.4.3) zurückführen. Dieser Zusammenhang geht allerdings nicht auf einen höheren Wert der Bodenfeuchte in der Unterkrume bei Bearbeitung mit dem Schichtengrubber zurück, wie Tabelle 43 im Anhang entnommen werden kann, und muss daher durch hier nicht darstellbare Faktoren begründet sein.

Wechselwirkungen, die für die Faktoren Fruchtart und Bodenfeuchte bei dem hier berechneten Hauptfaktor Bodenbearbeitung laut Anhang, Tabelle 37 und 40 für Versuchsansatz 1 bei den Parametern Aggregatstabilität und Stabilität der Polyeder bestehen, gründen auf der hier zur Berechnung des Hauptfaktors Bodenbearbeitung verwendete Terminauswahl (alle Probenahmeterminale). Dies bedingt unterschiedliche Probenahmeterminale für jede Frucht, weshalb bei der Berechnung des Hauptfaktors Frucht (vgl. 4.4.3) eine andere Terminauswahl herangezogen wurde (vgl. auch Fußnote 1, S. 72). Die Wechselwirkung ist hier also durch ungleiche Feuchtespektren (nicht für jede Frucht wurde jede Jahreszeit beprobt) bedingt. In der Berechnung des Hauptfaktors Frucht (Anhang, Tabelle 31 und 34) ist diese Wechselwirkung denn auch, entsprechend der für jede Frucht ausgeglichenen Terminauswahl, nicht zu beobachten.

5 Umfassende Diskussion und Schlussfolgerungen

Um laut den in Kapitel 1.2 formulierten Forschungszielen die Erweiterte Spatendiagnose (ESD) auf ihre Aussagekraft hin überprüfen sowie gegebenenfalls verbessern und weiterentwickeln zu können, wurden in Kapitel 1.2 die Hypothesen I-III aufgestellt. Die in den Hypothesen formulierten Annahmen entsprechen dem heutigen Kenntnisstand der Beeinflussung des Bodengefüges durch unterschiedliche Bewirtschaftungsmaßnahmen. Die Möglichkeit, die in den Hypothesen formulierten erwarteten Ergebnisse in den Versuchsansätzen 1 und 2 (vgl. Kapitel 3.2) mit Hilfe der ESD dokumentieren und nachvollziehbar bestätigen oder gegebenenfalls widerlegen zu können, ist Beurteilungskriterium für die Einschätzung der Aussagekraft der ESD über wichtige Gefügeparameter landwirtschaftlich genutzter Böden. Im folgenden werden die Hypothesen im einzelnen dahingehend überprüft, ob ihre Aussagen durch die mit Hilfe der ESD erlangten Ergebnisse nachvollzogen werden können.

5.1 Hypothesendiskussion

Zur Hypothese I:

Innerhalb der Fruchtfolge Getreide, Grünbrache, Getreide bewirkt Grünbrache aufgrund ihrer bodenregenerierenden Wirkung einen vorübergehenden Anstieg der Aggregatstabilität bei erhöhtem Krümelanteil sowie ein besseres Gefüge.

Die mit Hilfe der ESD erhobenen Daten und Ergebnisse erlauben eine Annahme der Hypothese I. Innerhalb der Fruchtfolge Getreide (Sommergerste), Grünbrache, Getreide (Winterweizen) bei ökologischer Bewirtschaftung konnte unter Grünbrache eine starke Erhöhung der Aggregatstabilität beobachtet werden, die einige Monate bis unter die Folgefrucht anhielt und dann zum Teil wieder zurückging. Der Stabilisierungseffekt war bei der Typengruppe der Krümel länger anhaltend nachzuweisen als bei der Typengruppe der Polyeder. Ob damit ein dauerhaft höheres Niveau der Aggregatstabilität auf den Versuchsflächen erreicht wird oder ob nach der Grünbrache das Stabilitätsniveau unter den nachfolgenden „Nutzfrüchten“ wieder stark abfällt, konnte in dieser Arbeit nicht geklärt werden, wäre aber von großem Interesse. Hier besteht Forschungsbedarf. Mit Hilfe von Gefügenote und Aggregatmorphologie konnte auch eine Verbesserung der Gefügeverhältnisse mit Erhöhung des Krümelanteils dokumentiert werden. Die-

ser Effekt setzte allerdings verzögert ein, was auf die vorausgegangene Grundbodenbearbeitung zurückgeführt wurde.

Leguminosenbetonte Gemenge stimulieren Bodenorganismen (AICHINGER et al. 1995, HÖFLICH 1996) und zeigen erhöhte mikrobielle Aktivität im Boden (KANDELER et al. 1995). Dies wird von vielen Autoren übereinstimmend mit dem biologisch bedingten Aufbau und der Stabilisierung von Aggregaten in Zusammenhang gebracht (VASILIU 1958, KANDELER/MURER 1993, AICHINGER et al. 1995, SCHNEIDER/EMMERLING/SCHRÖDER 1995). Die in der Literatur auch für Zwischenfrüchte und Futterpflanzen (vgl. HÖVELMANN/FRANKEN 1993) dargestellte Stimulierung der biologischen Aktivität durch leguminosenbetonte Gemenge konnte anhand der Ergebnisse der Gefügenote der Bonitur der Mesomorphologie und des Aggregatstabilitätstests gut nachvollzogen werden. Die Entwicklung war dabei im zeitlichen Verlauf der Fruchtfolgesequenz deutlicher nachzuvollziehen als im zeitlich isolierten Vergleich von Grünbrache und Roggen, wurde hier in der Interpretation allerdings auch durch die morphologische Beeinflussung der Bodenmakro- und mesostruktur durch die Bodenfeuchte erschwert. Beim Vergleich der Früchte Grünbrache und Roggen zum gleichen Zeitpunkt wurde dies vermieden. Hier waren jedoch aufgrund der damit verbundenen geringen Wiederholungsanzahl nur Tendenzen für einen besseren Strukturzustand unter Grünbrache festzustellen. Diese waren bei den Parametern Gefügenote und Aggregatstabilität deutlicher in der Ausprägung als bei den Parametern Lagerungsdichte und Abscherwiderstand.

Zur Hypothese II:

Die Bodenbearbeitung spielt hinsichtlich der Schonung des Bodenlebens eine wichtige Rolle. Der Pflug lockert das Gefüge stärker, stört jedoch das Bodenleben durch die tiefe Wendung. Bei nicht wendender oder flach wendender Bodenbearbeitung liegt im Vergleich zur krumen-tief wendenden Variante bei dichterem Gefüge eine höhere Aggregatstabilität und ein erhöhter Krümelanteil vor.

Die mit Hilfe der ESD erhobenen Daten und Ergebnisse erlauben für den Parameter Aggregatstabilität eine Annahme der Hypothese II. Bei nicht wendender Bodenbearbeitung wurde in Übereinstimmung mit HÖVELMANN/FRANKEN (1993) und KÖLLER (1993) gegenüber wendender Bodenbearbeitung eine höhere Aggregatstabilität in Ober- und Unterkrume dokumentiert. Diese wird von den genannten Autoren auf die Störung biologischer Faktoren in

Ober- und Unterkrume bei wendender Bodenbearbeitung zurückgeführt. Auch für den von FRANKEN/LOH (1986), TEBRÜGGE (1989), BÖHM et al. (1990), KANDELER et al. (1995) und STOCKFISCH et al. (1995) beobachtete Mischeffekt des Pfluges bezüglich des C_{org} - Gehaltes bzw. der mikrobiellen Biomasse, der zu ausgeglicheneren bzw. umgekehrten Verhältnissen in Ober- und Unterkrume im Vergleich mit nicht wendender Bearbeitung führt, konnten anhand der ebenfalls umgekehrten Krümelverteilung auf die beiden Horizonte Ober- und Unterkrume (bei wendender Bearbeitung in der Unterkrume höherer Wert der Mesostrukturvariable, d.h. höherer Krümelanteil) Tendenzen gefunden werden.

Die Parameter Gefügenote und Mesostruktur sowie Lagerungsdichte und Abscherwiderstand zeigen darüber hinaus für die Grundbodenbearbeitungsvarianten im Vergleich der Horizonte untereinander keine deutlichen Unterschiede. Das bedeutet, der angenommene höhere Krümelanteil bei flach wendender oder nicht wendender Bearbeitung konnte mit dem vorliegenden Datenmaterial nicht nachvollzogen werden. Für eine Entscheidung darüber, ob die Annahme falsch ist oder die Methodik zu ungenau ist, war die Beprobungszeit zu kurz. Zudem hätten deutlichere Unterschiede der Varianten in der Versuchsanlage (häufige Pflugbearbeitung verglichen mit Direktsaat) wahrscheinlich klarere Unterschiede der Ergebnisse ermöglicht. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die Messung des Bodenwiderstands liefert allerdings wichtige Informationen zur ackerbaulichen und ökologischen Beurteilung. So weist der Abscherwiderstand zwar horizontbezogen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten auf, der vertikale Anstieg des Abscherwiderstands zum Unterboden ist jedoch, wie in der Literatur oft beschrieben, bei nicht wendender Grundbodenbearbeitung gleichmäßiger und bei wendender Grundbodenbearbeitung abrupter (vgl. TEIWES 1988, HARRACH/RICHTER 1992, EITZINGER/KLAGHOFER 1995, GROß 1996). In der Regel ist dies bei nicht wendender Bearbeitung mit einer größeren Porenkontinuität und potentiell besseren Durchwurzelungsverhältnissen verbunden (ROGASIK et al. 1995, BESTE 1996). In dieser Arbeit konnte über die Ermittlung der Wurzeldichte keine entsprechende Beobachtung gemacht werden.

Die Ergebnisse sprechen aufgrund der höheren Aggregatstabilität und der Tendenzen der übrigen Ergebnisse zunächst für eine positivere Beurteilung der nicht wendenden Grundbodenbearbeitungsvariante. Häufig ist ein Übergang zu nicht wendender Bearbeitung jedoch mit dichteren Strukturverhältnissen verbunden. Eine zu dichte Lagerung kann sich langfristig negativ auf die biologische Aktivität und zum Teil auch auf wichtige ökologische Funktionen auswirken, während die Aggregatstabilität verdichtungsbedingt erhöht bleiben kann. Beim Verzicht auf

mineralische Düngung - also vor allem im System ökologischer Landbau - ist bei dichtem Gefüge der Nährstoffaustausch aufgrund der geringeren Oberfläche der Bodenteilchen außerdem für die Produktionsfunktion nicht optimal (KULLMANN 1956, SCHELLER 1994, UBA 1998). Anders betrachtet, kann eine geringe Aggregatstabilität der wendenden Variante langfristig ebenfalls zu Verdichtung führen, während die Gefügenote aufgrund der deutlichen optischen Lockerungswirkung noch ausreichend gut eingestuft wird. Der Bedarf an kombinierten Beurteilungen des statischen und dynamischen Bodenzustands wird dadurch unterstrichen.

Zur Hypothese III:

Durch die Kombination von morphologischer Bodenbeurteilung (Gefügebönetur, Bönetur der Aggregatmorphologie) und dynamischem Test (Aggregatstabilitätstest) können biologische Faktoren der Aggregatstabilisierung von kolloidchemischen und vor allem verdichtungsbedingten Faktoren besser unterschieden werden.

Das Datenmaterial lies eine Bestätigung oder Ablehnung der Hypothese III nicht zu. In erster Linie sollte die Kombination von morphologischer Bodenbeurteilung und Aggregatstabilitätstest Fälle unterscheiden können, bei denen eine hohe Aggregatstabilität gegenüber Wasser entweder durch ein dichtes Gefüge bedingt ist, oder durch die ackerbaulich und ökologisch wünschenswerte biologische Stabilisierung poröser Strukturverhältnisse. In Kapitel 4 konnte gezeigt werden, dass durch die morphologische Beschreibung des Bodenzustands und den Aggregatstabilitätstest Bewirtschaftungseffekte auf die biologische Aktivität differenzierter erfasst, beschrieben und interpretiert werden können, als dies allein mit den bodenphysikalischen Methoden Lagerungsdichte und Abscherwiderstand möglich wäre. Gute Gefügeverhältnisse (hohe Gefügenote, hoher Krümelanteil) mit gleichzeitig hoher Aggregatstabilität lassen sich nur über die Stimulierung der biologischen Aktivität erreichen (SCHINNER/SONNLEITNER 1996 a). Dies ließ sich durch die Analyse der Fruchtfolgesequenz mit Hilfe der verwendeten Methoden (Gefügebönetur, Bönetur der Aggregatmorphologie und Aggregatstabilitätstest mit feldfeuchten Aggregaten zwischen 3 und 5 Millimetern) plausibel darstellen. Wird eine hohe Aggregatstabilität gleichzeitig mit deutlich niedriger Gefügenote (unter 3) erhoben, bedeutet das also, dass eine gewisse mechanische Belastbarkeit gewährleistet ist, was für die Befahrbarkeit positiv ist. Der Zustand des Gefüges zeigt jedoch bei Gefügenoten unter 3 Verdichtungstendenzen. Verdichtungen bedeuten nach WBGU (1994) und HURNI (1996), dass die Aufrechterhaltung der ökologischen Funktionsfähigkeit (vgl. Kapitel 1.1) beeinträchtigt

tigt oder gefährdet sein kann. Die Messung der Aggregatstabilität ohne Gefügebeurteilung birgt also die Gefahr, dichte Bodenverhältnisse mit einem hohem Anteil stabiler aber verdichteter Aggregate (vgl. Kapitel 2.1 und 2.2) zu positiv zu beurteilen. Die Kombination des Aggregatstabilitätstests mit der Gefügebeurteilung stellt demnach eine gute Überprüfungsmöglichkeit dar, verdichtungsbedingte Aggregatstabilität von einer hohen Stabilität bei guten Strukturverhältnissen zu unterscheiden. Die Vergleichbarkeit ist allerdings nur bei gleichem Ausgangssubstrat gegeben. Dies bedeutet nicht, dass ein vollkommenes Krümelgefüge alleinige Voraussetzung für eine nachhaltige Form der Landwirtschaft ist. Ein hohes Maß an „garem Boden“ = Krümelanteil (abhängig vom Bodenhorizont) wird jedoch in der Literatur für die Aufrechterhaltung der Bodenfunktionen (vgl. Kapitel 1.1) vielfach als erstrebenswert beschrieben (KUBIENA 1938, LIEBEROTH 1969, TEIWES 1988, DIEZ 1991, KUNTZE ET AL. 1994, SCHELLER 1994, SCHINNER/SONNLEITNER 1996 b, UBA 1998).

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Beobachtung eines anderen interessanten Phänomens gemacht: Hohe Gefügenoten und eine Mesomorphologie mit hohem Krümelanteil bei gleichzeitig niedriger Aggregatstabilität. Für diesen bei hoher Bodenfeuchte beobachteten Effekt starker Krümeligkeit konnten durch die Kombination von Aggregatstabilitätstest und Gefügebeurteilung plausible Erklärungsansätze gefunden werden:

Die von KULLMANN/KOITSCH (1956) als „Pseudokrümel“ bezeichneten Aggregatverbände können morphologisch zunächst nicht von „echten“ Krümeln unterschieden werden. Erst mit Hilfe des Aggregatstabilitätstests werden sie als extrem kurzfristige Aggregation „entlarvt“. Die Bonitur der Aggregatmorphologie beschreibt den morphologisch aktuell vorliegenden Zustand. Er ist gekennzeichnet durch einen sehr kurzfristigen Anstieg aggregierter Bodenteilchen bei äußerst geringer Wasserstabilität. Einordnungen dieses Zustands als „falsche“ oder „echte“ Krümel sind nicht angebracht. Das Gefüge ist hier aktuell (und nur kurzfristig) krümeliger, wie an den höheren Gefügenoten bei hoher Bodenfeuchte im Frühjahr zu erkennen ist. Der Boden ist in diesem Zustand allerdings gleichzeitig höchst empfindlich gegenüber Wasserverschlammung (und, wie aus der Praxis bekannt ist, auch gegenüber Belastung durch Befahren), weshalb „krümelig“ (und daher von der Struktur her wünschenswert) in diesem Fall nicht gleich „belastbar durch Überfahren“ gesetzt werden darf. Die Auffassung, gute Gefügeverhältnisse seien zeitgleich mit hoher Stabilität verbunden und umgekehrt muss hier einem dynamischen Verständnis des Bodenzustands weichen. Dabei ist (auch unabhängig von der Jahreszeit) ein dichtes Gefüge bei hoher Aggregatstabilität ebenso möglich und dabeientwicklungsfähig, wie der umgekehrte Fall. Eine Kombination von Strukturbonitur und Stabilitätstest bietet Möglich-

keiten, diesen Zusammenhang differenzierter zu entschlüsseln und gleichzeitig die Gefahr eingrenzen, die von der (zu positiven) Beeinflussung der Gefügebontur durch feuchte Bodenzustände methodisch ausgeht. Der große Schwachpunkt der Gefügebontur, die aufgrund des beobachtenden Charakters rein optisch nicht zwischen biologisch verbauten und wasserverklebten Krümeln unterscheiden kann, wird so auch nur durch die Kombination der Methoden greifbar und für sichere Interpretationen einschätzbar. Die Kombination der neuentwickelten Methoden in der ESD zeigt demnach trotz gewisser Schwachpunkte interessante Möglichkeiten für eine qualitative Bodenbeurteilung auf, die einige neue Aussagen zu funktionsrelevanten Gefügeerscheinungsformen von Böden liefern können.

5.2 Kritik der Ergebnisse

GEFÜGEBONITUR

Die Aussagekraft der im Vergleich zur Bonitur nach HAMPL/KUSSEL (1994) verbesserten Gefügebönitur wurde durch die vorgelegten Ergebnisse in Übereinstimmung mit der Literatur bestätigt. Die Gefügebönote zeigt, wie stark der Gefügebözustand des Bodens von dem in der Gefügeböbeschreibung als Optimalzustand dargestellten Zustand oder vom Negativzustand abweicht. Die Darstellung der beschriebenen Zustandsformen basiert dabei auf aktuellen Erkenntnissen der Bodenkunde (vgl. Kapitel 2.1). Qualitativ unterschiedliche Zustände, die sich über Methoden der Einzelparameter-Messung oft nicht erfassen und ausreichend bewerten lassen, gehen in ihrer Gesamtkomplexität direkt in eine Beurteilung ein. Das Ergebnis ist eine einfache Note (Zahl), die sich statistisch einfach verrechnen lässt. Mit Hilfe dieser Zahl (oder des Mittelwerts) wird der komplexe Zustand sehr übersichtlich repräsentiert und lässt sich schnell mit anderen Parametern vergleichen.

Der Bodenzustand lässt sich mit der Gefügebönote schnell in „schlecht“, „gut“ und „mittel“ einordnen und qualitativ beurteilen. Liegen jedoch feine Unterschiede des Gefüges vor, die kurz- oder mittelfristig noch keine Einordnung als „schlecht“ oder „gut“, allenfalls als „mittel“ zulassen, dann liefern lineare Methoden, die sich auf einen Parameter beschränken wichtige Zusatzinformationen (Aggregatstabilität: Zerfall, Lagerungsdichte und Porenvolumen: Volumenverhältnis, Abscherwiderstand: Bodenwiderstand). Die Kombination der Methoden ermöglicht eine qualitativ wertende Beurteilung bei gleichzeitiger Lieferung bodenphysikalischer Kennwerte, welche Basisinformationen über die üblicherweise bekannten Parameter liefern und den Vergleich von Untersuchungen unterschiedlicher Standorte erleichtern können.

Die Methoden sind allerdings nur substratspezifisch interpretierbar.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt erwartungsgemäß eine Parallelität zwischen Gefügebönote und Mesostruktur (vgl. Abb. 23 und 25, Kapitel 4.2.3). Hohe Gefügebönoten stehen demnach für einen höheren Anteil an Aggregaten des Krümel- oder Bröckeltyps auf der Ebene der Mesomorphologie. Hierdurch wird verdeutlicht, dass die ausdrückliche Berücksichtigung des „Krümelanteils“ in der Gefügeböbonitur (vgl. Tab. 5, Kapitel 3.3.1) Veränderungen der Mesostruktur gut widerspiegelt. Nachteilig ist anzumerken, dass beide Methoden deutlich von der Bodenfeuchte beeinflusst werden. Da die Bonitur der Aggregatmorphologie darüber hinaus sehr zeitaufwendig ist, kann auf eine grundsätzliche Übernahme in die Erweiterte Spatendiagnose vor diesem Hintergrund verzichtet werden. Die Beeinflussung durch die Bodenfeuchte muss durch

den Probenahmezeitpunkt vermieden oder bei offensichtlich hoher Bodenfeuchte in der Interpretation einschränkend berücksichtigt bzw. mit dem Aggregatstabilitätstest in der Aussage differenziert werden.

Für eine wertende Einschätzung des Bodenzustandes hinsichtlich der Dringlichkeit von Maßnahmen mit Hilfe der Gefügeböschung ist darüber hinaus zu berücksichtigen, um welches landwirtschaftliche System es sich handelt. So müssen für die Beurteilung der Bodenstruktur im ökologischen Landbau in der Regel höhere Gefügenoten gefordert werden. Da hier der Nährstoffaustausch stärker durch die Oberfläche der Bodenteilchen beeinflusst wird, die bei dichtem Gefüge kleiner und daher suboptimal ist, muss verstärkt auf eine möglichst poröse Bodenstruktur geachtet werden. Hierbei ist nicht die technische Überlockerung durch „Pflugkrümelung“ gemeint (CZERATZKI 1972), sondern eine biologisch stabilisierte poröse Struktur.

Der Gefahr von Nitratauswaschungen bei krümelig-porösem Bodengefüge nach Leguminosenbruch muss gleichzeitig mit den bekannten Maßnahmen, wie direkter Nachsaat einer Winterung nach Herbstumbruch oderzeitigem Frühjahrsumbruch und Zwischenfrucht vor Sommergetreide (HESS et al. 1993) begegnet werden. Im Konventionellen Landbau ist auf eine stark bedarfsgerechte Minereraldüngung zu achten.

AGGREGATSTABILITÄT

Bis auf die verdichtungsbedingte Stabilität von Aggregaten werden poröse und dichte Aggregate durch die gleichen Faktoren beeinflusst. Sowohl Polyeder als auch Krümel werden durch erhöhten Ton- oder Kalkgehalt stabilisiert (vgl. Tab. 17, Kapitel 4.2.2). Ebenso hat die biologische Aktivität stabilisierende Auswirkungen auf sämtliche Aggregattypen (vgl. Tab. 29, Kapitel 4.4.1; Tab. 33, Kapitel 4.4.2). Die für die Produktionsfunktion sowie die Filter-, Puffer-, und Regelungsfunktionen des Bodens wichtige Bildung von Aggregaten des Krümeltyps bei gleichzeitiger Stabilisierung ist jedoch vor allem von der Wirkung einer ungestörten biologischen Aktivität abhängig (Kapitel 2.2, Abb. 27 und Tab. 27, Kapitel 4.4.1). Hohe Werte des Parameters Aggregatstabilität können demnach dann als positiv eingeordnet werden, wenn gleichzeitig ein gewisser Mindestanteil an Aggregaten des Krümeltyps vorliegt. Dies kann, wie oben dargelegt, ohne die Bonitur der Aggregatmorphologie, mit Hilfe der Gefügenote überprüft werden. Der hier angewandte Aggregatstabilitätstest mit feldfeuchten Aggregaten zwischen 3 und 5 mm (für die Krumenhorizonte) und Zerfallsbonitur entspricht mit den hier gelieferten Ergebnissen den in der Literatur aktuell vorliegenden Kenntnissen über die an der Aggregatstabilisierung beteiligten Faktoren. Darüber hinaus ist er wenig aufwendig und durch die Neuentwicklung des Boniturschemas für die Verschlammungsbonitur im Vergleich zur Methode nach HAMPL/KUSSEL (1994) weniger abhängig von der subjektiven Einschätzung des Betrachters. Der Test führte zu klaren Unterschieden der untersuchten Varianten, die sich mit den bisher in der Literatur beschriebenen und in den Hypothesen formulierten Einflussfaktoren der Aggregatstabilität decken und kann daher zur Anwendung empfohlen werden. Als Nachteil bleibt die Schwierigkeit der möglichst geringen Beeinflussung der feldfeuchten Aggregate durch das Absieben, was gerade bei hoher Bodenfeuchte zum Tragen kommt. Die Auswahl der Aggregate für den Test sollte außerdem möglichst zufällig gehalten werden.

Eine Validierung des Aggregatstabilitätstests durch den Vergleich mit einer anerkannten Methode (z.B. Perkolationmethode nach BECHER/KAINZ 1983) konnte leider nicht vollzogen werden, da eine hierfür in Auftrag gegebene wissenschaftlich Arbeit aufgrund methodischer Fehler keinen seriösen Vergleich ermöglichte. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

WURZELDICHTE

Die Aussagekraft der Wurzeldichte als „Bioindikator“ für den Gefügezustand bleibt bei der gegebenen Stichprobenanzahl vage. Es wird daher empfohlen, im Falle geringer Stichproben-

anzahl bei Durchführung der kompletten ESD die quantitative Methode der Wurzelzählung durch eine qualitative Wurzelbonitur (vgl. Tab. 42, Kapitel 5.3) zu ersetzen und im Falle von Teiluntersuchungen mit der ESD (z.B. nur Gefügeböden und Aggregatstabilität) mit erhöhter Stichprobenanzahl auf die Wurzelzählung mit Schablone zurückzugreifen.

LAGERUNGSDICHTE UND ABSCHERWIDERSTAND

Die Aussagekraft der bodenphysikalischen Kennwerte Lagerungsdichte und Abscherwiderstand wurde in Übereinstimmung mit der Literatur bestätigt. Sie sind, wie die anderen Methoden auch, nur substratspezifisch einsetzbar.

BEEINFLUSSUNG DER PARAMETER DURCH AUSGANGSSUBSTRAT UND BODENFEUCHTE

Die Beeinflussung der erhobenen Parameter durch unterschiedliches Ausgangssubstrat zeigt, dass bei Vergleichen der Bewirtschaftung folgendes beachtet werden muss:

1. Das Ausgangssubstrat sollte homogen sein
oder
2. in jeder Variante sollte eine ausreichende Menge an Stichproben bei ausreichender Anzahl an Wiederholungen (hier sind mehr als zwei Wiederholungen zu empfehlen) nach Ausgangssubstrat getrennt erfassbar sein
oder
3. der Vergleich muss auf die qualitative Aussage beschränkt werden, wie weit der untersuchte Bodenzustand von einem am betreffenden Standort möglichen Optimalzustand entfernt ist.

Vorliegende Informationen zur Bodenchemie und Bodenart sind daher sowohl zur Probenahmeplanung, wie auch zur Beurteilung der Ergebnisse der ESD wenn möglich hinzuzuziehen.

Die in der vorliegenden Arbeit erprobte Version der ESD kann so nicht auf stark tonigen Böden, sandigen Böden oder skelettreichen Böden (z.B. Schieferböden) angewandt werden.

Sowohl Gefügeböden als auch das Boniturschema zum Aggregatstabilitätstest (Zerfallsstufen) müssen an die Verhältnisse der oben genannten Böden angepasst werden. In dieser Arbeit können dafür nur Vorschläge gemacht werden, deren Eignung noch zu überprüfen ist (vgl. Tab. 40 und 41 sowie Abb. 29 und 30, Kapitel 5.3).

Für alle Parameter muss eine aus der Literatur hinlänglich bekannte Beeinflussung durch die Bodenfeuchte festgehalten werden. Die Bonitur der Aggregatmorphologie und in geringerem Masse die Gefügebönitur zeigen hier den größten Einfluss. Weitere Forschung mit unterschiedlichem Ausgangssubstrat bei unterschiedlichen Bodenfeuchtezuständen wäre wünschenswert. Dennoch kann gerade durch die Verwendung feldfeuchter Proben ein differenzierteres Bild des aktuellen Gefügezustandes und seiner Anfälligkeit gegenüber Wasserver-schlämmung gegeben werden als bei vorgetrockneten Proben; zumal die Beeinflussung der biologischen Komponente durch diese Vorbehandlung noch nicht hinreichend geklärt ist. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf. Bei einem Vergleich von Bewirtschaftungs- oder Bear-beitungsvarianten mit geringer Anzahl an Probenahmeterminen sollte die Beeinflussung durch Extremzustände der klimatischen Jahresdynamik (Bodenfeuchtegehalt, biologische Aktivität) aber möglichst ausgeschlossen werden, daher ist eine Probenahme innerhalb der Vegetationsperiode bei Bodenfeuchtegehalten deutlich unter Feldkapazität - auch aufgrund der besseren Siebfähigkeit der feldfeuchten Aggregate - dringend zu empfehlen. Auch beim Abscherwiderstand ist auf eine Bodenfeuchte unterhalb der Feldkapazität bei den Messungen zu achten. Am geringsten von der Bodenfeuchte abhängig ist die Ermittlung der Lagerungs-dichte, obwohl auch sie von Quellungs- und Schrumpfungsmechanismen des Bodensubstrates abhängt. Grundsätzlich sollte zu jedem Mess- und Probenahmetermin die Bodenfeuchte als Parameter - gegebenenfalls mit Hilfe der Schätzung nach der bodenkundlichen Kartieranlei-tung - zusätzlich erhoben werden.

Der Versuchsaufbau ist insofern kritisch zu betrachten, als eine Überprüfung der Methodik anhand extremerer Varianten der Fruchtfolge und Bodenbearbeitung oder mit Einbeziehung unterschiedlicher Bodentypen besser zur Klärung der Aussagekraft der Methodik beigetragen hätte. Im Fall dieser Arbeit waren die Bedingungen vorgegeben.

5.3 Aktuelle Version der Feldmethode Erweiterte Spatendiagnose (ESD)

Die in Kapitel 5.1 und 5.2 gemachten Schlussfolgerungen hinsichtlich der Aussagekraft der Teilmethoden der ESD finden in der im folgenden dargestellten Version der ESD ihren Niederschlag.

5.3.1 Gefügeböden

Die neu entwickelte Gefügeböden hat sich auf dem vorliegenden Untersuchungsstandort als sensibler Indikator für bewirtschaftungsbedingte Auswirkungen auf den Bodenzustand erwiesen, der eine schnelle wertende Beurteilung ermöglicht.

Bei der Durchführung der Böden ist bei Flächenvergleichen darauf zu achten, dass vergleichbare Bodenfeuchte und vergleichbares Ausgangssubstrat gegeben ist. Im folgenden wird neben der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Gefügeböden für lehmige Böden je ein Vorschlag einer Gefügeböden für sandige und tonige Böden basierend auf MÜLLER (1958), DIEZ/WEIGELT (1987), AG BODENKUNDE (1994), HARRACH (1998) und eigenen Beobachtungen gegeben (Tab. 40 und 41).

Tab. 41: Gefügebonitur für sandige Böden

Horizont	Erscheinungsbild	Gefügenote
	Sandkörner in grösseren Teilchen (> 2 mm) zusammenhängend und mit org. Material verklebt, keine Krusten	5
	- Übergangsbereich -	4
Oberfläche 0-1 cm	Sandkörner und org. Material nur zum Teil verklebt, zum Teil getrennt, viele Einzelkörner. Feucht: lose zusammenhängend, trocken: beginnende Krustenbildung oder lose Einzelkornstruktur	3
	- Übergangsbereich -	2
	Überwiegend Einzelkörner, kaum org. Material. Feucht: lose zusammenhängend, trocken: Krusten oder lose Einzelkornstruktur	1
	Sandkörner in größeren Teilchen (> 2 mm) zusammenhängend und mit org. Material verklebt oder durchwurzelt. Aggregate ohne Zerfall verformbar, keine kompakten Schollen/Bänke.	5
	- Übergangsbereich -	4
Oberkrume 0-15 cm	Sandkörner und org. Material nur zum Teil verklebt, zum Teil getrennt, viele Einzelkörner. Feucht: dichter, z.T. in größeren, scholligen Fragmenten zusammenhängend, trocken: größere, schollige Fragmente zerfallen bei Druck in lose Einzelkornstruktur	3
	- Übergangsbereich -	2
	Überwiegend Einzelkörner, kaum org. Material sichtbar. Feucht: sehr dicht, in größeren, scholligen Fragmenten zusammenhängend, trocken: größere schollige Fragmente zerfallen bei stärkerem Druck in lose Einzelkornstruktur	1
	Sandkörner und org. Material zum Teil verklebt, zum Teil getrennt, einige Aggregate ohne Zerfall verformbar. Feucht: z.T. in größeren Fragmenten zusammenhängend, trocken: größere Fragmente zerfallen bei Druck in lose Einzelkornstruktur	5
	- Übergangsbereich -	4
Unterkrume 15-30 cm	Überwiegend Einzelkörner, wenig org. Material sichtbar. Feucht: dicht, in größeren, scholligen Fragmenten zusammenhängend, trocken: größere schollige Fragmente zerfallen bei stärkerem Druck in kleinere Fragmente oder lose Einzelkornstruktur	3
	- Übergangsbereich -	2
	Einzelkörner, kaum org. Material sichtbar. Feucht: sehr dicht, fest in größeren, scholligen Fragmenten zusammenhängend, trocken: größere schollige Fragmente zerfallen bei starkem Druck in kleinere Schollen.	1
	Überwiegend Einzelkörner, wenig org. Material sichtbar. Feucht: dicht, in größeren Fragmenten zusammenhängend, trocken: größere Fragmente zerfallen bei Druck in lose Einzelkornstruktur	5
	- Übergangsbereich -	4
Unterboden 30-40 cm	Einzelkörner, kein org. Material. Feucht: dicht, in größeren, scholligen Fragmenten zusammenhängend, trocken: größere schollige Fragmente zerfallen bei Druck in kleinere Fragmente oder lose Einzelkornstruktur	3
	- Übergangsbereich -	2
	Einzelkörner, kein org. Material. Feucht: sehr dicht, fest in größeren, scholligen Fragmenten zusammenhängend, trocken: größere schollige Fragmente zerfallen bei starkem Druck in kleinere Schollen.	1

Tab. 42: Gefügebonitur für tonige Böden

Horizont	Erscheinungsbild	Gefügenote
	Rauh, Einzelaggregate erkennbar, Wurmkot, keine Verschlammung, keine Krusten	5
	- Übergangsbereich -	4
Oberfläche 0-1 cm	Aggregate verschlammte, kaum Wurmkot, beginnende Krustenbildung (Risse)	3
	- Übergangsbereich -	2
	Krusten, Risse, Verschlammung, Versiegelung	1
	Mischgefüge aus überwiegend Krümeln mit org. Material, kleinen Subpolyedern und wenigen kleinen Polyedern, locker, wenig größere Fragmente	5
	- Übergangsbereich -	4
Oberkrume 0-15 cm	Mischgefüge aus (oder nach leichtem Druck Zerfall in) Krümeln, Subpolyedern, kl. Polyedern und mittelgroßen (3-4 cm) Fragmenten	3
	- Übergangsbereich -	2
	Scharfkantige Fragmente/Klumpen mit glatter Oberfläche oder ungegliedertes Gefüge, dicht und kompakt, wenig kleine Subpolyeder und Polyeder. Trocken: sehr hart, feucht: schmierig	1
	Mischgefüge aus (oder nach leichtem Druck Zerfall in) Krümeln, Subpolyedern, kl. Polyedern und mittelgroßen (3-4 cm) Fragmenten	5
	- Übergangsbereich -	4
Unterkrume 15-30 cm	Größere Fragmente/Klumpen (> 4 cm) mit glatter Oberfläche oder ungegliedertes Gefüge, wenig kleine Subpolyeder und Polyeder. Trocken: sehr hart, feucht: schmierig	3
	- Übergangsbereich -	2
	Scharfkantige Fragmente/Klumpen (> 4 cm), evtl. plattig, mit glatter Oberfläche oder ungegliedertes Gefüge, dicht und kompakt, wenig kleine Subpolyeder und Polyeder. Trocken: sehr hart, feucht: schmierig	1
	Größere Fragmente/Klumpen (> 4 cm) mit glatter Oberfläche, bei Druck Zerfall in Subpolyeder und Polyeder oder ungegliedertes Gefüge mit einigen Grob- und vielen Feinporen.	5
	- Übergangsbereich -	4
Unterboden 30-40 cm	Wenig durchportetes Gefüge, größere Fragmente/Klumpen (> 4 cm) mit glatter Oberfläche, scharfkantig, erst bei starkem Druck Zerfall. Trocken: sehr hart, feucht: schmierig	3
	- Übergangsbereich -	2
	Kaum durchportetes Gefüge, größere Fragmente/Klumpen (> 4 cm) mit glatter Oberfläche, scharfkantig, kein Zerfall, z.T. Plattengefüge. Trocken: sehr hart, feucht: schmierig	1

5.3.2 Wurzeldichte und Wurzelbonitur

Unter der Voraussetzung, dass die Stichprobenanzahl für die zu beurteilenden Varianten über die in dieser Arbeit vorliegende Anzahl von 4 hinausgeht oder durch Zeitreihenuntersuchungen erhöht werden kann (KÖPKE 1979), ist die Ermittlung der Wurzeldichte im Unterboden mit Hilfe der Schablonen-Zählung, die mit der Bohrkernmethode nach HELLRIEGEL vergleichbar ist, weiterhin zu empfehlen, da sie wenig aufwendig ist. Zur qualitativen Erfassung der Durchwurzelungsverhältnisse in der Krume empfiehlt sich bei geringer Stichprobenzahl und ohne zeitliche Wiederholungen eine Wurzelbonitur (BÖCK 1997, NEUDECKER 1997, HARRACH 1998, vgl. Tab. 42). Eine qualitative Beurteilung der Durchwurzelung, die in der

GÖRBING'schen Spatendiagnose ja ebenfalls zur Bodenzustandserfassung herangezogen wird, kann im Zusammenhang mit der Gefügebönitur funktionsökologische Zusammenhänge zwischen Gefüge und Durchwurzelung im direkten Vergleich erfassen. Sie hat darüber hinaus den Vorteil, dass sie bei hartem und trockenem Boden oder steinigem Unterboden noch relativ gut durchgeführt werden kann, während die Zählung mit der Schablone aufgrund des Zerfalls der Unterbodenfläche des Bodenriegels Schwierigkeiten bereitet.

Aus diesem Grunde wird im folgenden ein Vorschlag für eine innerhalb der ESD alternativ zur Wurzelzählung verwendbare Wurzelbönitur gegeben. Die Entwicklung der Bönitur basiert auf den Schlussfolgerungen und Beschreibungen von KÖPKE (1979), HELAL (1991), BÖCK (1997), NEUDECKER (1997), HARRACH (1998) und eigenen Beobachtungen.

Tab. 43: Wurzelbönitur

Horizont	Erscheinungsbild	Wurzel-note
	Sehr viele Wurzeln und Feinwurzeln, stark verzweigt, sehr gleichmäßig verteilt und mit kleinen Bodenaggregaten verklebt (große Kontaktfläche der Wurzeln mit dem Boden)	5
	- Übergangsbereich -	4
Oberkrume 0-15 cm	Mäßig viele Wurzeln und Feinwurzeln, gering verzweigt, teilw. ungleichmäßig in „Büscheln“, in Grobporen durch größere Fragmente und Bröckel wachsend	3
	- Übergangsbereich -	2
	Sehr ungleichmäßige Durchwurzelung („Büschel“ und teilw. horizontaler Wurzelfilz), vor allem in Grobporen durch (oder an der Oberfläche von) größere, kantige Fragmente und Bröckel wachsend	1
	Viele Wurzeln und Feinwurzeln, stark verzweigt, sehr gleichmäßig verteilt und mit kleinen und größeren Bodenaggregaten verklebt (große Kontaktfläche der Wurzeln mit dem Boden)	5
	- Übergangsbereich -	4
Unterkrume 15-30 cm	Mäßig viele Wurzeln und wenig Feinwurzeln, gering verzweigt, teilw. mehrere Wurzeln parallel in Grobporen durch größere, kantige Fragmente und Bröckel oder an deren Oberfläche wachsend	3
	- Übergangsbereich -	2
	Sehr ungleichmäßige Durchwurzelung („Büschel“), mehrere Wurzeln parallel in Grobporen durch größere, kantige Fragmente und Bröckel oder an deren Oberfläche wachsend, zum Teil horizontal abgeknickte und platt gequetschte Wurzeln	1
	Wurzeln stark verzweigt, einige Feinwurzeln, sehr gleichmäßig verteilt und zum Teil mit kleinen und größeren Bodenaggregaten verklebt (große Kontaktfläche der Wurzeln mit dem Boden)	5
	- Übergangsbereich -	4
Unterboden 30-40 cm	Wurzeln gering verzweigt, kaum Feinwurzeln, teilw. mehrere Wurzeln parallel in Grobporen durch größere, kantige Fragmente und Bröckel oder an deren Oberfläche wachsend	3
	- Übergangsbereich -	2
	Sehr geringe und ungleichmäßige Durchwurzelung, Wurzeln parallel in Grobporen durch größere, kantige Fragmente und Bröckel oder an deren Oberfläche wachsend, häufig horizontal abgeknickt und platt gequetscht	1

5.3.3 Aggregatstabilitätstest

Der Zerfall der Aggregate unterscheidet sich bei Sand- Lehm- und Tonböden nach eigenen Beobachtungen an entsprechenden Böden leicht in der optischen Ausprägung, wobei die Zerfallsbilder der drei Ebenen stabil, halb zerfallen und zerfallen durchaus untereinander vergleichbar sind. Eine Anpassung der Zerfallsbonitur erleichtert daher vor allem die schnelle und sichere Einordnung zu den drei Ebenen. Im folgenden wird ein Vorschlag für je eine Zerfallsbonitur für sandige und tonige Böden gegeben.

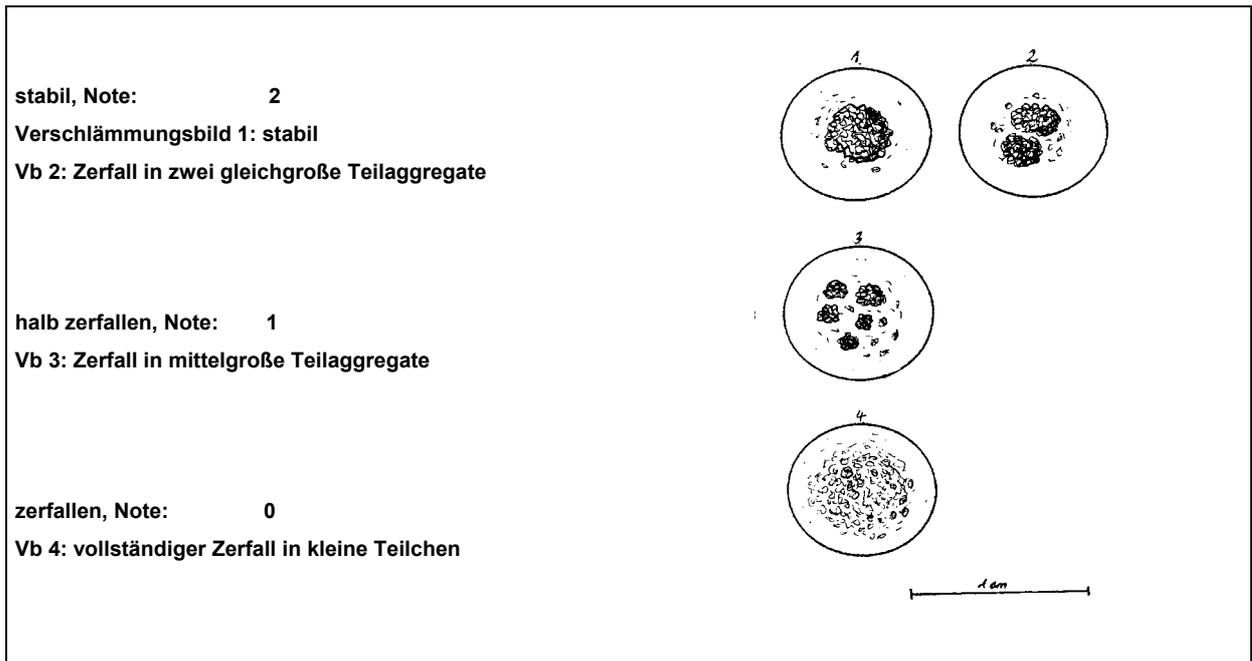


Abb. 28: Zerfallsbonitur des Aggregatstabilitätstests bei sandigen Böden

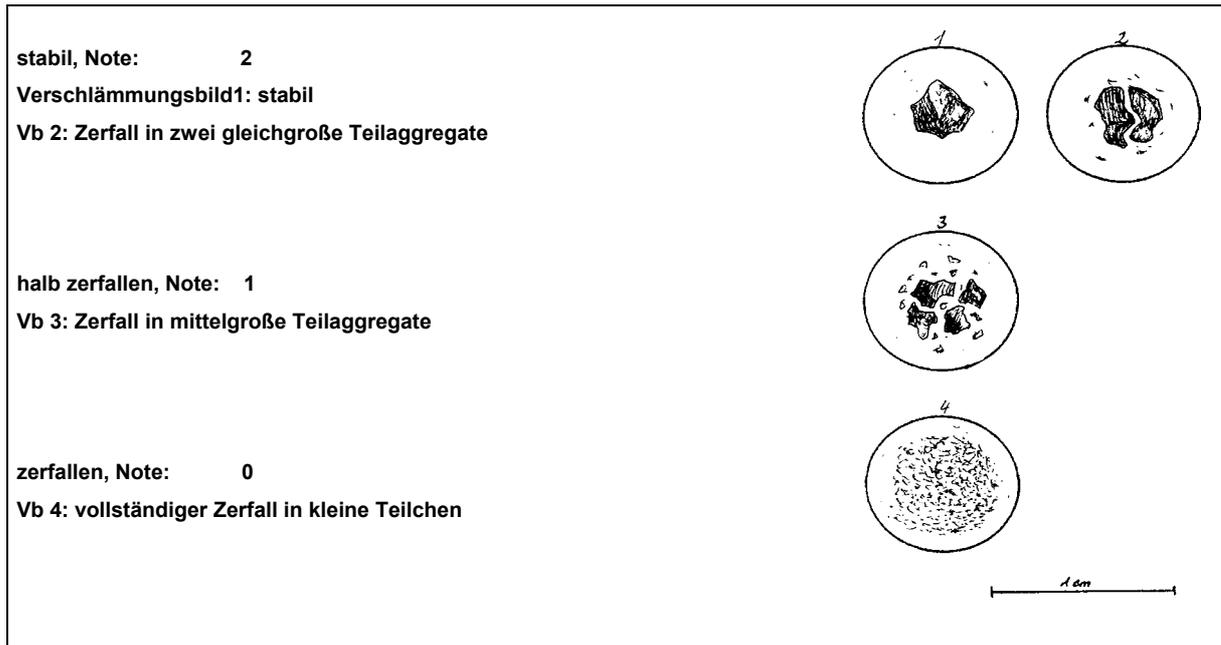


Abb. 29: Zerfallsbonitur des Aggregatstabilitätstests bei tonigen Böden

5.3.4 Bodenfeuchte, Porenvolumen, Lagerungsdichte und Abscherwiderstand

Die Standardmethoden für die Ermittlung der Kennwerte Bodenfeuchte, Porenvolumen und Lagerungsdichte können innerhalb der ESD interessante zusätzliche Messwerte zu Wasserhaushalt und Bodenphysik liefern und bleiben in der in Kapitel 3.3.5 vorgestellten Form Bestandteil der ESD. Gegenüber den differenzierten Ergebnissen von Gefügeböden und Aggregatstabilitätstest ist ihre Aussagekraft eher ergänzend zu sehen und ihr Einsatz je nach Fragestellung abzuwägen.

Die Ermittlung des Abscherwiderstands (vgl. Kapitel 3.3.6) ist in aktuellen Forschungsarbeiten vermehrt der Messung des Eindringwiderstands mit Hilfe einer Penetrometersonde gewichen. Beide Methoden sind in Ergebnis und Aussagekraft vergleichbar und bei hoher Bodenfeuchte (höher als Feldkapazität) nur eingeschränkt einsetzbar. Für eine Messung des Bodenwiderstandes innerhalb der Kombinationsmethode ESD eignen sich beide gleichermaßen, wobei aufgrund der angestrebten Vergleichbarkeit mit anderen Forschungsergebnissen dem Einsatz der Penetrometersonde der Vorzug zu geben ist.

5.4 Abschließende kritische Bemerkungen zum Versuchsaufbau

Grundsätzlich ist zur Anlage des Versuches im Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung anzumerken, dass die geringst mögliche Wiederholungsanzahl (zwei Blöcke) gewählt wurde.

Die Aussagekraft ist aufgrund der statistischen Verrechenbarkeit dadurch eingeschränkt. Bei einer ausreichenden Anzahl von Probenahmeterminen und Stichproben (Versuchsansatz 1, Fruchtfolgesequenz: 6 Termine) konnten dennoch klare Unterschiede der Faktoren berechnet werden. In diesem Zusammenhang sind auch die weniger deutlichen Unterschiede (Tendenzen) des Vergleiches von Roggen und Grünbrache zu sehen. Hier lag für jedes Jahr nur ein Probenahmetermin vor, was zur Beurteilung der Dynamik der biologischer Aktivität als zu wenig eingeschätzt werden muss.

Die geringen Unterschiede zwischen den Grundbodenbearbeitungsvarianten sind nach Auffassung der Verfasserin nicht in erster Linie durch die geringe Wiederholungsanzahl oder nivellierende Frucht- oder Substrateffekte bedingt, obwohl hier multiple Wechselwirkungen vorliegen mögen.

Schon in vorangegangenen Arbeiten konnte die Beobachtung gemacht werden, dass synergetisch wirkende System- und dabei besonders Fruchtfolgeeffekte einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Ausprägung der Bodenstruktur haben als unterschiedliche Grundbodenbearbeitungstechniken und dies speziell bei ökologischer Bewirtschaftung (FRANKEN/LOH 1986, HÖVELMANN/FRANKEN 1993, MÄDER 1993, PFIFFNER 1993, HAMPL 1995 b, SCHNEIDER/EMMERLING/SCHRÖDER 1995, SIEGRIST 1995, BESTE 1996, BESTE 1997 b bis 1999, NEUDECKER 1997).

6 Zusammenfassung

Die landwirtschaftliche Bodennutzung, die den flächenmäßig größten Anteil an der weltweiten Bodennutzung stellt, führt weltweit bei einem Drittel der genutzten Flächen zu Bodendegradation. Als Motivation der Arbeit wird der Bedarf an einfachen, kostengünstig anwendbaren Bodenuntersuchungsmethoden geringen technischen Aufwands beschrieben, um die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungssysteme und -praktiken auf die ökologischen Bodenfunktionen - Lebensraumfunktion, Regelungsfunktion und Produktionsfunktion - dokumentieren und beurteilen zu können.

Es wird der Vorschlag gemacht, das Bodengefüge aufgrund seiner nach aktuellem Forschungsstand bekannten vielfältigen Verknüpfung mit der Lebensraum-, Regelung-, und Produktionsfunktion als einen geeigneten Indikator für eine qualitative Beurteilung des Bodenzustands heranzuziehen.

Mit der Erweiterten Spatendiagnose nach HAMPL/KUSSEL (ESD) wird eine aus der GÖRBING-Spatendiagnose entwickelte, einfache, wissenschaftlich besser auswertbare Version der Gefügestandsbeurteilung mit dem Spaten vorgestellt, die sich durch leichte Vermittelbarkeit und geringen technischen Aufwand auszeichnet. Das Forschungsziel der Arbeit ist es, die Aussagekraft der in der ESD zur Anwendung kommenden Methoden hinsichtlich bewirtschaftungsbedingter Auswirkungen auf den Bodenzustand zu überprüfen.

Die ESD umfasst eine Gefügebönetur, einen einfachen Aggregatstabilitätstest, die Zählung der Wurzelichte im Unterboden mittels Schablone, die Ermittlung von Bodenfeuchte, Porenvolumen bzw. Lagerungsdichte mit Hilfe von Stechzylindern sowie die Messung des Abscherwiderstands. Böneturmethode, denen nach aktuellem Forschungsstand wünschenswerte Gefügestände als Maßstab zugrunde liegen, werden auf diese Weise (qualitativ, aber quantifizierbar) mit der Messung bodenphysikalischer Kennwerte (quantitativ) kombiniert.

Aktuell angewandte Methoden der Messung der Aggregatstabilität können nicht zwischen biologischer und verdichtungsbedingter Stabilität von Aggregaten unterscheiden. Dies kann zu fehlerhaften Schlussfolgerungen über den qualitativen Zustand des Bodengefüges führen. Mit der zusätzlichen Durchführung von Böneturen der Aggregatmorphologie der Mesostruktur soll in der vorliegenden Arbeit der Zusammenhang zwischen biologisch bedingter oder verdichtungsbedingter Aggregatstabilität, der Bildung ackerbaulich wertvoller Aggregatformen (schwammartig, porös - Krümel) und dem Gefügestand differenziert herausgearbeitet werden.

Anhand zweier Versuchsansätze wird die Empfindlichkeit der angewandten Parameter bezüglich der Beeinflussung durch Standortfaktoren und Bewirtschaftungssysteme bzw. -praktiken sowie ihre Aussagekraft hinsichtlich der Beeinflussung des Bodengefüges durch die Bewirtschaftungsfaktoren überprüft:

Versuchsansatz 1 beinhaltet die Dokumentation der Gefügedynamik in einer typischen Fruchtfolge bei ökologischer Bewirtschaftung (Sommergerste, Grünbrache, Winterweizen; mit Zwischenfrüchten) mit Hilfe der Gefügebönetur, der Bönetur der Aggregatmorphologie, dem Aggregatstabilitätstest und der Bodenfeuchte (Probenahmen im März, Mai, Juli und September). Im zweiten Versuchsansatz wird ein Vergleich der Auswirkungen von Grünbrache und Marktfrucht (Roggen) bei ökologischer Bewirtschaftung auf den Bodenzustand (Probenahme jeweils im Mai) mittels einer umfassend durchgeführten ESD und der zusätzlichen Bönetur der Aggregatmorphologie vorgenommen. Beide Versuchsansätze umfassen die Untersuchung der drei Grundbodenbearbeitungsvarianten Schichtengrubber (nicht wendend), Schichtenpflug (bis 15 cm flach wendend) und Pflug (bis 30 cm tief wendend) und wurden drei Jahre lang (1996-1998) beprobt.

Die Untersuchung der Beeinflussung der angewandten Parameter durch die Standortfaktoren Bodentiefe, Ausgangssubstrat und Bodenfeuchte kommt zu folgenden Ergebnissen:

Bodentiefe

1. Der Maßstab der Gefügebönetur ist für unterschiedliche Bodentiefen in der Bönetur unterschiedlich, das heißt, den bioökologischen Bodenhorizonten entsprechend gewählt. Die Ergebnisse der Gefügebönetur liefern eine direkte Bewertung des jeweiligen Bodenzustands (Noten 1-5) in Entfernung zum Optimalzustand (Note 5). Der bodenkundlich dokumentierte gute Gefügebönetur des Unterbodens auf den Versuchsflächen wird mit Noten deutlich über drei treffend erfasst. Die Oberkrume wird als noch entwicklungsfähig eingestuft und bei der Unterkrume werden leichte Mängel im Gefügebönetur dokumentiert. Diese wurden bei der Umstellung auf nicht wendende Grundbodenbearbeitung (hier zu zwei Dritteln der Versuchsfläche) schon häufig beobachtet.
2. Die Ergebnisse der Parameter Aggregatstabilität und Aggregatmorphologie bestätigen den aktuellen Forschungsstand über die typische Differenzierung der biologischen Aktivität in unterschiedlicher Bodentiefe. Aggregatstabilität und Häufigkeit von Krümeln nehmen mit zunehmender Bodentiefe ab.

3. Lagerungsdichte und Abscherwiderstand bestätigen entsprechende bodenphysikalische Erfahrungen mit der Ackerkrume. Beide nehmen mit der Bodentiefe zu.

Ausgangssubstrat

4. Die Beeinflussung der Parameter durch die unterschiedlichen Ausgangssubstrate „Löss und Löss ü. Mergel“ und „Kalk- und Tonmergel“ zeigen eine Beeinflussung der Gefügebeurteilung in Richtung höherer Noten bei höherem Skelettanteil des Bodens (Kalk- und Tonmergel), was funktionsökologisch nachvollziehbar ist.
5. Die bekannte Erhöhung der Aggregatstabilität durch höhere Kalk- und Tongehalte wird bestätigt.
6. Der Krümelanteil wird von keinem der hier vorliegenden Ausgangssubstrate eindeutig nachweisbar beeinflusst.
7. Lagerungsdichte und Abscherwiderstand zeigen keine Unterschiede bei den Ausgangssubstraten.

Bodenfeuchte

8. Die Bodenfeuchte zeigt vor allem in Versuchsansatz 1 (mit Jahresdynamik und stark unterschiedlichen Feuchtespektren je nach Jahreszeit) eine Beeinflussung der Parameter. Diese wird in Versuchsansatz 2 (ohne Jahresdynamik) tendenziell bestätigt. Bei Bodenfeuchtwerten über 20% werden höhere Gefügenoten gegeben. Die Aggregatstabilität ist niedriger, die Krümelanteile höher. Die deutliche Beeinflussung der Gefügenote, des Krümelanteils und der Aggregatstabilität über 20% Bodenfeuchte werden auf die Bildung von „Pseudokrümel“ (KULLMANN 1958) zurückgeführt, die - vor allem im Frühjahr bei niedriger biologischer Aktivität und Stabilisierung - zur Ausprägung einer guten, aber gegenüber Wassereinwirkung sehr instabilen Bodenstruktur führt. Darüber hinaus werden detaillierte Beobachtungen über das Verhalten von dichten (Polyedern), wenig porösen (Subpolyedern) und krümelig-porösen Aggregaten (Krümeln) bei unterschiedlichen Feuchtezuständen und in den Jahresgängen einer dreijährigen Fruchtfolge beschrieben.
9. Lagerungsdichte und Abscherwiderstand zeigen keinen Einfluss der Bodenfeuchte. Die aus der Literatur bekannte Beeinflussung des Abscherwiderstands konnte nicht dokumentiert werden.

10. Beim Parameter Wurzeldichte wird ein umgekehrt proportionales Verhältnis zur Bodenfeuchte bei gleichen Probenahmeterminen beobachtet, was mit der Suche der Wurzeln nach Wasser im Boden erklärt wird (KÖNEKAMP/ZIMMER 1954).

Die empfindliche Erfassung der Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen mit Hilfe der angewandten Parameter wird durch folgende Ergebnisse dokumentiert:

Auswirkungen der Grünbrache innerhalb der Fruchtfolge sowie im Vergleich zu Roggen:

1. Erhöhung der Gefügenote.
2. Erhöhung der Aggregatstabilität bis unter die Folgefrucht.
3. Verstärkte Krümelbildung und -stabilisierung.
4. Die bodenphysikalischen Kennwerte zeigen eine Tendenz zu geringeren Abscherwiderständen und Lagerungsdichten unter Grünbrache.

Vergleich der Grundbodenbearbeitungsvarianten:

1. Keine statistisch absicherbare Unterschiede in der Gefügenote.
2. Deutlich höhere Aggregatstabilität in Ober- und Unterkrume bei nicht wendender Bearbeitung (Schichtengrubber).
3. Keine statistisch absicherbaren Unterschiede im Krümelanteil.
4. Höhere Stabilität der Krümel in der Oberkrume bei nicht wendender Bearbeitung (Schichtengrubber).
5. Keine Unterschiede in der Lagerungsdichte, gleichmäßigerer Anstieg des Abscherwiderstands im Bodenprofil bei nicht wendender Bearbeitung (Schichtengrubber).
6. Keine Unterschiede in der Wurzeldichte.

Aussagekraft der Methoden

Die Aussagekraft der im Vergleich zur Bonitur nach HAMPL/KUSSEL (1994) verbesserten Gefügebönotur wird durch die vorgelegten Ergebnisse in Übereinstimmung mit der Literatur bestätigt. Die Gefügebönotur zeigt, wie stark der Gefügebözustand des Bodens vom Optimalzustand oder Negativzustand abweicht. Qualitativ unterschiedliche Zustände, die sich über Methoden der Einzelparameter-Messung oft nicht erfassen und ausreichend bewerten lassen, gehen in ihrer Gesamtkomplexität direkt in eine Beurteilung ein. Das Ergebnis ist eine einfache Note

(Zahl), die sich statistisch einfach verrechnen lässt. Mit Hilfe dieser Zahl (oder des Mittelwerts) wird der komplexe Zustand sehr übersichtlich repräsentiert und lässt sich schnell mit anderen Parametern vergleichen. Die Gefügeböndigkeit ist nur Substratspezifisch interpretierbar. Aufgrund der Beeinflussung durch die Bodenfeuchte sollte die Probenahme bei extremen Feuchteverhältnissen vermieden werden.

Der hier angewandte Aggregatstabilitätstest mit feldfeuchten Aggregaten zwischen 3 und 5 mm (für die Krümenhorizonte) und Zerfallsböndigkeit entspricht in seiner Aussagekraft den in der Literatur aktuell vorliegenden Kenntnissen über die an der Aggregatstabilisierung beteiligten Faktoren. Darüber hinaus ist er wenig aufwendig und durch die Neuentwicklung eines Bönditurschemas für die Verschlümmungsböndigkeit im Vergleich zur Methode nach HAMPL/KUSSEL (1994) weniger abhängig von der subjektiven Einschätzung des Betrachters. Der Test führte zu klaren Unterschieden der untersuchten Varianten. Auch der Aggregatstabilitätstest ist nur substratspezifisch interpretierbar.

Eine Validierung des Aggregatstabilitätstests durch den Vergleich mit einer anerkannten Methode konnte leider nicht vollzogen werden, da eine hierfür in Auftrag gegebene wissenschaftlich Arbeit aufgrund methodischer Fehler keine seriösen Vergleich ermöglichte. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

Die Aussagekraft der Wurzelhäufigkeit als „Bioindikator“ für den Gefügestand bleibt bei niedriger Stichprobenanzahl vage. Es wird daher empfohlen, im Falle geringer Stichprobenanzahl bei Durchführung der kompletten ESD die quantitative Methode der Wurzelhäufigkeit durch eine qualitative Wurzelböndigkeit zu ersetzen und im Falle von Teiluntersuchungen mit der ESD mit erhöhter Stichprobenanzahl auf die Wurzelhäufigkeit mit Schablone zurückzugreifen.

Die Aussagekraft der bodenphysikalischen Kennwerte Lagerungsdichte und Abscherwiderstand wurde in Übereinstimmung mit der Literatur bestätigt.

Die in der ESD verwendeten Parameter und Methoden zeigen, wie die überwiegende Anzahl an Bodenbeurteilungsmethoden, eine Beeinflussung durch unterschiedliche Bodensubstrate und unterschiedliche Bodenfeuchten. Dieser Erkenntnis wurde, soweit möglich, in Empfehlungen zum Einsatz der aktuellen Version der ESD Rechnung getragen. Darüber hinaus wurden Vorschläge für die Berücksichtigung unterschiedlicher Böden (Lehm-, Sand- und Tonböden) bei Gefügeböndigkeit und Aggregatstabilitätstest entwickelt und präsentiert.

Die ESD kann in ihrer weiterentwickelten und erstmals erprobten Version über eine differenzierte Beurteilung des Gefüges einen Beitrag dazu leisten, wissenschaftlich und dennoch praxisnah Entscheidungsfindungen bezüglich ressourcenschonender Bewirtschaftungssysteme und -maßnahmen zu erleichtern. Sie bietet besondere Vorteile in Regionen und Projekten, wo Untersuchungen mit hohem technologischem Aufwand nicht finanzierbar oder nicht durchführbar sind. Hierin bietet sie Vorteile für Bodenbeurteilungen in sogenannten Entwicklungsländern.

7 Summary

The soil, like water, air, and energy, is one of our most important resources. A serious endangerment of ecological soil vitality caused by the effects of pollution and high external input management systems in agriculture, can be confirmed at a global level. Agricultural soil use with the highest expense in soil management leads in one third of areas to soil degradation. The rapid decrease of soilbiota - biological degradation - and, amplified by this, the high susceptibility of soils for compaction and erosion - physical degradation, represent two syndromes which have been termed frequently as a serious threat for the global resources of food production.

To document the effects of soil and land management systems on ecological soil functions, sensitive indicators and simple suitable scientific methods have to be defined respectively developed, which are able to show the influence of management systems on soil vitality.

In this research paper the proposal is made to use soil structure as indicator for sound soil functions because of its close connections to water circulation, soil life activity and transformation capacity.

With the Extended Spade Diagnosis (ESD) - a combination of soil investigation-methods - a methodology is presented, which shows advantages especially in a low technical expenditure and a simple communicability. The objective of research in this paper is to test the evidence of the soil investigation methods applied in the ESD with regard to an evaluation of soil structure quality. ESD contains a new developed structure evaluation, a new developed simple test of aggregate stability, the count of root density in the subsoil with a stencil, measurement of soil moisture, pore volume, bulk density with short core samplers and the measurement of shearing resistance. Thus ESD combines structure evaluation schemes developed on current knowledge about sound soil structure conditions (qualitative data, but countable) and measurement of common soil structure parameters (quantitative data).

Current tests of aggregate stability are not able to show if the aggregate stability is caused by biological stabilisation (which is important for the soil functions) or by physical compaction (which has stated to be a sign of functional degradation). This can lead to incorrect evaluations about functional structure conditions. Therefore apart from ESD there has been also implemented an evaluation of aggregate morphology in this experimentation trial. With that a distinct investigation of the connections between aggregate stability caused by biological stabilisa-

tion or by physical compaction, the building up of agricultural desirable crumbly and porous aggregates and the actual structure conditions has been intended.

The sensitivity of the parameters applicated in ESD to the influence of site factors and management systems or techniques and their evidence for the ecological affection of soil functions through management factors has been tested with two designs of investigation:

The first design was drawn to document the influence of a typical crop rotation in an organic management system (Summer-Barley, Green Manure, Winter-Wheat - with intercrops) on soil conditions. Investigation parameters were soil structure evaluation, evaluation of aggregate morphology, test of aggregate stability and soil moisture. Samples were taken in March, May, July and September.

The second design was drawn to compare the soil conditions under Winter-Rye and Green Manure. In this design a complete ESD was implemented, so the parameters were structure evaluation, test of aggregate stability, count of root density in the subsoil, measurement of soil moisture, pore volume, bulk density with short core samplers and the measurement of shearing resistance as mentioned above. In addition to that the evaluation of aggregate morphology was implemented too.

Both designs of investigation contained the separate survey of three different tillage techniques:

Layer-Cultivator (conservation tillage, non inverting, loosening to 30 cm depth),

Two-Layer Plough (reduced tillage, inverting to 15 cm depth and loosening to 30 cm depth),

Plough (intensive tillage, inverting to 30 cm depth). The experimentation last three years (1996-1998).

The investigations of sensitivity of the parameters to the site factors soil profile, pedogenic properties and soil moisture (experimental patches in organic farming) show the following results:

Soil profile

1. Aggregate stability and aggregate morphology show the typical differentiation of soil layers in biological activity according to current state of the art: Aggregate stability and amount of crumbly, highly porous aggregates are diminishing with soil depth.
2. The structure mark which has been computed for the upper crumb shows developing potential to reach optimum conditions. For the lower crumb susceptibility for compaction has been stated as tendency. This already has been observed frequently when inverting tillage was changed to non inverting tillage as it is the fact in this case (change 1994) for thirty percent of the experimental patches. The subsoil has been marked as to have structure conditions near the optimum (the scale of demanded structure conditions for a sound soil in the structure evaluation scheme varies with soil depth because of the bio ecologically variation of light, moisture and density with soil depth. The attached structure mark shows the distance between optimum condition and actual condition).
3. Results of bulk density and shearing resistance confirm corresponding experiences with agricultural soils: They are augmenting with the soil depth.

Pedogenic properties

4. The two separate observed groups of soils (I.: Loess/Loess over Marl, II.: calcic and silty Marl) show their influence in higher structure marks in case of the more stony material (calcic and silty Marl). This is comprehensible according to functional ecology because of the higher amount of macro pores in stony material.
5. The augmentation of aggregate stability with higher contents of Calcium and Silt (calcic and silty Marl) which is already known could be confirmed too.
6. The amount of crumbly, highly porous aggregates could not be stated as to be influenced by one of the two soil groups.
7. Results of bulk density and shearing resistance show no difference dependent on different soil groups.

Soil moisture

8. Soil moisture shows the highest influence on the parameters in the results of the first investigation design (sampling four times yearly - seasonal periodicity of soil moisture). A corresponding tendency could be also stated for the second investigation design: With a soil moisture over 20% the samples gained higher structure marks, the aggregate stability was

lower and the amount of crumbly, highly porous aggregates higher. This results are due to the occurrence of arising „pseudo-crumbles“ with high soil moisture in early springtime. There could be observed a high amount of crumbly, highly porous aggregates when soil moisture was high, which leads to a good spatial soil structure. But this structure condition is highly susceptible against water siltation because of the „pseudo-crumbles“ which already not have been stabilised by biological factors but by meniscal water-tension only in the early springtime. Apart from this some observations about the reaction of Polyeder, Subpolyeder and crumbly, highly porous aggregates in different conditions of soil moisture and also in their annual rhythm have been explored.

9. Bulk density and shearing resistance don't show any influence depending on soil moisture. The influence of soil moisture on the shearing resistance mentioned in the literature could not be documented in this case.
10. Root density is proportionally inverse to soil moisture which is explained with the higher growing intensity of roots searching for water in soil (KÖNEKAMP/ZIMMER 1954).

The investigations of sensitivity of the parameters to management techniques show the following results:

Influence of Green Manure in the crop rotation and in comparison to Winter-Rye:

1. Augmentation of structure mark.
2. Augmentation of aggregate stability up to the following crop.
3. Increasing formation and stabilisation of crumbly, highly porous aggregates.
4. Tendency to less shearing resistance and lower bulk density under Green Manure vegetation.

Comparison of tillage techniques

1. No statistically safe differences in structure marks.
2. Distinct higher aggregate stability with non inverting tillage (Layer Cultivator).
3. No statistically safe differences in the amount of crumbly, highly porous aggregates.
4. Higher stability of crumbly, highly porous aggregates in the upper crumb with non inverting tillage (Layer Cultivator).
5. No differences in the results of bulk density. Regular increase of shearing resistance with soil depth when tillage has been non inverting (Layer Cultivator). Abrupt increase of shear-

ing resistance from the lower crumb to the subsoil when tillage has been inverting (Plough), as it has been investigated frequently before.

6. No differences in root density.

Evidence of methodology

The evidence of the improved structure evaluation has been confirmed by the gained results which correspond with literature. The structure mark shows the distance of actual soil condition to optimum conditions or degraded conditions. The difference in quality of soil conditions is taken into account in a very comprehensive way of evaluation. Whatever the result is a simple evaluation mark which facilitates statistical calculation. Soil condition is represented clearly and comparison with other parameters can be done simple and fast. The interpretation of structure not is depending on soil texture. Sampling under extreme conditions of soil moisture should be avoided.

The new developed test of aggregate stability which is implemented with aggregates of actual soil moisture between 3 and 5 mm of size delivers results which show sensitiveness to the factors which are causing aggregate stability according to current knowledge. Apart from this it is easy to do and with the improved evaluation scheme of aggregate silting it is less depending on subjective assessment of the implementing person. The test delivered clear differences between the surveyed management variations and can therefore be recommended for investigations about the influence of agricultural management on aggregate stability. As well as the structure note the test of aggregate stability is depending on soil texture. A validation of this new test by means of a comparison with a common scientific methodology could not be implemented. A research work with this assignment unfortunately procured no results because of methodological inaccuracy.

The evidence of the counting out of root density by means of a stencil in the subsoil seems to be indifferent when samples are few. Therefore in case of implementing the whole ESD and taking few samples only it is preferable to use a qualitative root evaluation scheme instead of the quantitative root counting. When ESD is implemented only partly (e.g. only structure evaluation and test of aggregate stability) and many samples are taken the root counting in the subsoil by means of the stencil can be kept. The evidence of the physical standard parameters bulk density and shearing resistance has been confirmed with the results according to literature.

The parameters and methods used in combination as a part of ESD show - as the most soil investigation methods - dependence on pedogenic properties and soil moisture. This experience has been intended to be taken into account by giving some advises fore implementation of ESD. Apart from this suggestions for some structure evaluation schemes and silting evaluation schemes which are adapted to sandy soils and silt soils as well as a rooting evaluation scheme have been worked out and presented.

ESD in its improved version can achieve to document scientifically but without high technology expenditure effects of management systems or techniques on quality of soil structure. It combines the actual and comprehensive impression of soil condition in the field with exact quantitative data information of soil parameters. Moreover that advantages are facility and communicability because of its vividness and close connection to farmers knowledge about soil. Thus it can help to facilitate decisions about soil management planning and practice also in regions and projects where investigations with high-technology methods are to expensive or not well adapted for consultancy presentation. So the methodology is well adapted to the conditions in developing countries.

8 Literaturverzeichnis

- AGÖL (1996): Rahmenrichtlinien für den ökologischen Landbau. Arbeitsgemeinschaft ökologischer Landbau (Hg.). SÖL-Sonderausgabe 17, Bad Dürkheim
- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Arbeitsgemeinschaft Boden (Hg.), Hannover
- AICHINGER, S.; KIEM, R.; KANDELER, E. (1995): Die Bedeutung von Mikroorganismen für die Aggregatstabilisierung von Böden unterschiedlicher Nutzung. Mitteilungen DBG 76, S. 561-564
- AHRENS, E. (1983): Significance of fertilization for post-harvest conditions of vegetables, especially spinach. In: Environmentally sound agriculture. Lockeretz, W. (Hg.), New York
- ALTEMÜLLER, H.-J.; HARTGE, K.-H. (1991): Einleitung und Problemstellung. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 2, BMELF (Hg.), Hamburg, Berlin, S. 9-11
- ANDERSON, T.-H. (1991): Bedeutung der Mikroorganismen für die Bildung von Aggregaten im Boden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 154. S. 409-416
- ASPIRAS, R. B. et al. (1971): Chemical and Physical Stability of Microbially Stabilized Aggregates. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35, S. 283-286
- AUERSWALD, K. (1992): Bodeneigenschaften und Bodenerosion. Habilitationsschrift, TU Weihenstephan.
- AUFHAMMER, G. (1958): Untersuchungen zur Garefähigkeit der Böden. In: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung. Deutsche Akademie für Landwirtschaftswissenschaften. Berlin, S. 201-206
- BACKES, F. et al. (1997): Mikrobiologische Qualitätsparameter für Winterweizen aus organischem Anbau. In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau. Köpke U.; Eisele, J.-A. (Hg.), Berlin, S. 224-230
- BAEUMER, K. (1991): Bodenfruchtbarkeit als Wissenschaftlicher Begriff: Kenngrößen und Prozesse im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Produktion im Agrarökosystem. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 1, BMELF (Hg.), Hamburg, Berlin, S. 29-45
- BECHER, H.; KAINZ, M. (1983): Auswirkungen einer langjährigen Stallmistdüngung auf das Bodengefüge im Lössgebiet bei Straubing. Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau 153, S. 152-158
- BECK, T. (1991): Auswirkungen abgestufter Pflanzenbauintensitäten nach 15-jähriger Laufzeit auf wichtige bodenmikrobiologische Kennwerte. Bayer. Landwirtsch. Jahrb. 68, S. 361-367

- BENECKE, P. (1966): Die Geländeansprache des Bodengefüges in Verbindung mit der Entnahme von Stechzylinderproben für Durchlässigkeitsmessungen. Zeitung für Kulturtechnik, Landentwicklung und Flurbereinigung 7, S. 91-104
- BERNARD, H.; LEPKE, U. (1995): Methodenvergleich zur Bestimmung der Aggregatstabilität. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1995. Stiftung Ökologie und Landbau, Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- BESTE, A. (1996): Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren im ökologischen Landbau auf Bodenstruktur und Wasserhaushalt. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
- BESTE, A. (1997): Entwicklung und Erprobung der Spatendiagnose zur Beurteilung der ökologischen Funktionsfähigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden im Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung. Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Bonn, S. 43-48
- BESTE (1997 b): Ergebnisse der Erweiterten Spatendiagnosen 1996. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1996. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- BESTE (1998): Ergebnisse der Erweiterten Spatendiagnosen 1997. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1997. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- BESTE (1999): Ergebnisse der Erweiterten Spatendiagnosen 1998. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1998. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- BESTE, A.; HAMPL, U. (1999): Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung/Project Ecological Soil Management. Forschung für ein Leben aus gesunder Erde/Science for life from healthy soils. Informationsbroschüre der Stiftung Ökologie und Landbau (SÖL). Bad Dürkheim
- BEYER, L. (1991): Gefügeeigenschaften von Parabraunerden und Podsolen unter Wald- und Ackernutzung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 154, S. 107-114
- BLUME, H.-P. (Hg.) (1990): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung; vorbeugende und abwehrende Schutzmassnahmen. Landsberg/Lech
- BLUME, H.; BEYER, L. (1996): Zur Definition von Humusformen ackerbaulich genutzter Böden. I. Diagnostische Merkmale. Mitteilungen DBG 80, S. 183-185
- BMU (1996): Umwelt 10. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Bonn
- BÖCK, G. (1997): Strukturuntersuchungen am Bodenbearbeitungs-Systemversuch Triesdorf. Diplomarbeit, Fachbereich Bodenkunde, Fachhochschule Weihenstephan

- BÖHM, H.; GROCHOLL, J.; AHRENS, E. (1990): Mikrobiologische Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen am Beispiel dreier Bodentypen. Zeitung für Kulturtechnik und Landentwicklung 32, S.114-120
- BÖHM, W. (1979): Methods of Studying Root Systems. Berlin, Heidelberg
- BUCHMANN, I. (1996): Bodenkarte und Erläuterungen. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1995. Stiftung Ökologie und Landbau, Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- BUND/MISERIOR (1995): Zukunftsfähiges Deutschland. Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Basel/Boston/Berlin
- CAPPELN von, J.-H. (1959): Strukturverbesserung durch Phosphatanreicherung des Bodens. = Die Phosphorsäure 19, S. 177-202
- CHESTERS, G. et al. (1957): Soil Aggregation in Relation to Various Soil Constituents. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 21, S.272-277
- CHABOUSSOU, F. (1987): Pflanzengesundheit und ihre Beeinträchtigung. Die Schädigung durch synthetische Düngemittel und Pflanzenbehandlungsmittel. Alternative Konzepte 60, Karlsruhe
- CZERATZKI, W. (1957): Untersuchungen über Krümelstabilität an einem Kalkversuch. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 78, S. 121-135
- CZERATZKI, W. (1958): Zur Problematik der Krümelstabilitätsmessung. In: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung. Deutsche Akademie für Landwirtschaftswissenschaften. Berlin, S. 85-98
- CZERATZKI, W. (1972): Die Ansprüche der Pflanze an den physikalischen Bodenzustand. Landbauforschung Völkenrode 22, S. 29-36
- DEBOSZ, K. et al. (1998): Impact of Soil Management on Distribution of Carbohydrate C and Clay Dispersibility in Different Sized Soil Aggregates. Poster, NJF-Seminar no. 286. Soil Tillage and Biology. June 8-10th Ås, Norway
- DE KIMPE, C.; WARKENTIN, R. (1998): Soil Functions and the Future of Natural Resources. In: Towards sustainable land use. Furthering cooperation between people and institutions, Blume H.-P. (Hg.). Selected papers of the 9th conference of the International Soil Conservation Organisation (ISCO), Reiskirchen
- DE LEENHEER, L.; DE BOODT, M. (1954): Discussion on the Aggregate Analysis of Soils by Wet Sieving. Soil Sci. 2
- DEUTSCHER BUNDESTAG (Hg.) (1998): Bundesbodenschutzgesetz. Entwurf
- DIEZ, TH. (1982): Spatendiagnostische Untersuchungen an der Krume von Lössböden. Mitteilungen DBG 34, S. 145-148

- DIEZ, TH. (1991): Beurteilung des Bodengefüges im Feld. Möglichkeiten, Grenzen und ackerbauliche Folgerungen. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 2, BMELF(Hg.), Hamburg und Berlin, S. 96-103
- DIEZ, TH.; WEIGELT, H. (1987): Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung. München, Wien, Zürich
- DIERKS R.; HEITEFUSS R. (Hg.) (1990): Integrierter Landbau. Systeme umweltbewusster Pflanzenproduktion. München
- DNA, (1973): Felduntersuchungen. Bestimmung des Makrogefüges. Deutscher Normenausschuss (Hg.) (= DIN 19682, Bl. 10)
- DUMBECK, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden.. Giessener Bodenkundliche Abhandlungen 3, Giessen
- DUTZLER-FRANZ, G. (1977): Der Einfluss einiger chemischer und physikalischer Bodenmerkmale auf die Enzymaktivität verschiedener Bodentypen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 140, S. 329-350
- EBERT, D. (1952): Die Spatendiagnose und ihre Anwendung. In: Die deutsche Landwirtschaft 8, S. 397-399
- ECKERT, H. (1993): Bewertungsrahmen zur Charakterisierung der ökologischen Situation landwirtschaftlicher Betriebe. Mitteilungen DBG 72, S. 1475-1478
- EHRNSBERGER, R. (1993): Bodenzologie und Agrarökosysteme. In: Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege 6, Ehrnsberger, R. (Hg.). Cloppenburg, S. 11-41
- EHRNSBERGER, R.; BUTZ-STRAZNY, F. (1993): Auswirkung von unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Grubber und Pflug) auf die Milbenfauna im Ackerboden. In: Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege 6, Ehrnsberger, R. (Hg.). Cloppenburg, S. 188-208
- EITZINGER, J.; KLAGHOFER, E. (1995): Einfluss unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung auf ausgewählte bodenphysikalische Eigenschaften. Wasser/Boden 47, S. 11
- EMMERLING, C. (1995): Tätigkeitsbericht. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1994. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- EMMERLING, C. (1996): Tätigkeitsbericht. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1995. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- EMMERLING, C. (1997): Tätigkeitsbericht. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1996. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- EMMERLING, C. (1997 b): Schriftliche Mitteilung
- EMMERLING, C. (1998): Tätigkeitsbericht. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1997. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht

- EMMERLING, C. (1999) Tätigkeitsbericht. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1998. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- FRANKEN, H.; LOH, M. (1986): Der Einfluss ackerbaulicher Maßnahmen auf die Dynamik der Aggregatstabilität. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 28, S. 35-41
- FRESE, H. (1958): Zur Bildung von Makrogefügetypen im Ackerboden durch atmosphärische Einflüsse. In: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung. Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften. Berlin
- FREYER, B. (1997): Kennziffern der Nachhaltigkeit von 317 ackerbaubetonten Betrieben des biologischen Landbaus in der Schweiz, ausgewertet auf der Basis von Betriebskontrolldaten. In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Köpke U. und J.-A. Eisele (Hg.), Berlin, S. 103-108
- FRIEBE, B. (1995): Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodentiere und ihre Abbauleistungen. Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege 6, Ehrnsberger, R. (Hg.). Cloppenburg, S. 171-187
- GÄTH, S. (1995): Ursachen der Luftspregung. = Bodenökologie und Bodengenes 15. Habilitation, Giessen
- GEIER, U. et al. (1997): Ökobilanz Hamburger Landwirtschaft - Umweltrelevanz verschiedener Produktionsweisen. Handlungsfelder Hamburger Umweltpolitik. Gutachten im Auftrag der Umweltbehörde Hamburg
- GISI, U. (1997): Bodenökologie. Stuttgart, New York
- GLÖSS, ST. (1997): Bodenbewertung im Rahmen von Umweltplanungen. In: Kennzeichnung und Bewertung von Böden für eine nachhaltige Landschaftsnutzung, Hierold W. und R. Schmidt (Hg.), ZALF-Bericht 28, Müncheberg, S. 81-93
- GÖRBING, J. (1947): Die Grundlagen der Gare im praktischen Ackerbau. Hannover
- GÖRBING, J.; SEKERA, F. (1947): Die Spatendiagnose - Ziel und Grundlage der zweckmäßigen Bodenbearbeitung. Hannover
- GROß, U. (1992): Erosionsanfälligkeit in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Arbeitspapier 190, Darmstadt, S.128-131
- GROß, U. (1996): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf Verschlammungsneigung und Aggregatstabilität verschiedener Böden. Dissertation, Universität Giessen, Giessen
- GRUBER, W. (1992 a): Befahrbarkeit von Ackerböden. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Arbeitspapier 190, Darmstadt, S.52-58

- GRUBER, W. (1992 b): Die Gefahr der Bodenverdichtung bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung. In: Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Beiträge zum 3. Symposium vom 12.-13. Mai 1992 in Giessen, Friebe (Hg.), Giessen, S. 21-29
- HAAS, G.; KÖPKE, U. (1994): Vergleich der Klimarelevanz ökologischer und konventioneller Landbewirtschaftung. In: Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages (Hg.). Studienprogramm Landwirtschaft Teilband II., Bonn
- HAAS, G. et al. (1995): Vergleich konventioneller und organischer Landbau - Teil I: Klima-relevante Kohlendioxid-Emission durch den Verbrauch fossiler Energie. Berichte über Landwirtschaft 73
- HAAS, G. (1997): Leistungen des Ökologischen Landbaus zur Verringerung der Gewässerbelastungen. In: Umweltqualitäten und Wirtschaften - Was wurde erreicht? Wo geht es hin? 30. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft, Dohmann, M. (Hg.), Aachen
- HAINES, W. B. (1930): The Hysteresis Effect in Capillary Properties, and the Modes of Moisture Distribution Associated therewith.
- HAMPL-MATHY, U. (1991 a): Bodenbearbeitung im ökologischen Landbau. SÖL-Sonderausgabe 52, Bad Dürkheim
- HAMPL-MATHY, U. (1991 b): Pflanzenernährung im ökologischen Landbau. Ökologie & Landbau 78, S. 16-22
- HAMPL-MATHY, U. (1992): Grundbodenbearbeitung. In: Methoden des umweltgerechten Pflugeinsatzes. Sonderveröffentlichung des Bodensee-Umweltschutzprojektes der Deutschen Umwelthilfe e. V., der Fachgruppe für Technik im ökologischen Landbau und des Modellprojektes „Biotopvernetzung und Extensivierung landwirtschaftlich genutzter Flächen im Landkreis Konstanz“.
- HAMPL, U. (1995 a): Bodenschutz ist Hochwasserschutz. Ökologie & Landbau 94, S. 38-39
- HAMPL, U. (1995 b): Beratung zur Umstellung auf Ökologische Bodenbewirtschaftung. Dissertation an der Universität Hohenheim. Verlag Dr. Kovac. Hamburg
- HAMPL, U. (1995 c): Ökologische Bodenbearbeitung und Beikrautregulierung. SÖL-Sonderausgabe 56, Bad Dürkheim
- HAMPL, U. (1996 a): Gründüngung. Grundlage der Bodenfruchtbarkeit. Graz
- HAMPL, U. (1996 b): Das Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung. Ökologie & Landbau 100, S. 34
- HAMPL, U. (1997): Eindringwiderstände in Grünbrache und Roggen. In: Ergebnisbericht Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung 1996. Stiftung Ökologie und Landbau. Bad Dürkheim. Unveröffentlicht
- HAMPL, U.; KUSSEL, N. (1994): Die Erweiterte Spatendiagnose. Unveröffentlicht

- HARRACH, T. (1984): Lockerungsbedürftige Böden einfach und sicher erkennen. In: Bodenfruchtbarkeit in Gefahr? Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) (Hg.), Frankfurt, S. 115-121
- HARRACH, T. (1998) Gefügebeurteilung im Gelände insbesondere Bewertung der Pakungsdichte und Schätzung der nFK im Wurzelraum. In: Boden und Bodenschutz. Beiträge zum Seminar am 10. und 11. 9. 1998 in Emmelshausen. Bildungsseminar für die Agrarverwaltung Rheinland-Pfalz (Hg.), Mainz, S. 34-41
- HARRACH, T.; VORDERBRÜGGE, T. (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 2, BMELF (Hg.), Hamburg, Berlin, S. 69-82
- HARRACH, T.; RICHTER, U. (1992): Wirkung von Bodenbearbeitungsverfahren auf den Stickstoffhaushalt im System Boden-Pflanze. In: Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Beiträge zum 3. Symposium vom 12.-13. Mai 1992 in Giessen, Friebel (Hg.), Giessen, S. 81-96
- HARTGE, K.H. (1987): Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart
- HARTGE, H.; HORN, R (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. Stuttgart
- HASINGER, G. (1993): Bodenbeurteilung im Feld. Forschungsinstitut für biologischen Landbau. CH, Oberwil
- HAUG, G.; SCHUMANN, G.; FISCHBECK, G. (1990): Pflanzenproduktion im Wandel. Weinheim
- HELAL, M. (1991): Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 154, S. 403-407
- HENK, U. (1989): Untersuchungen zur Regentropfenerosion und Stabilität von Bodenaggregaten. Dissertation TU Braunschweig.
- HIEROLD, W.; SCHMIDT, R. (Hg.) (1997): Kennzeichnung und Bewertung von Böden für eine nachhaltige Landschaftsnutzung. ZALF-Bericht 28, Müncheberg
- HÖFLICH, G. (1996): Standort- und fruchtartenspezifische Interaktionen zwischen Rhizosphärenbakterien und Pflanzenwachstum. Mitteilungen DBG 81, S. 331-334
- HOFFMANN, M. (2000): Mündliche Mitteilung
- HÖVELMANN, L.; FRANKEN, H. (1992): Zum Einfluss der Grundbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität, Eindringwiderstand und Wurzelentwicklung in rekultivierten Böden aus Löss. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). Arbeitspapier 190. Darmstadt, S. 63-67
- HÖVELMANN, L.; FRANKEN, H. (1993): Einfluss von Fruchtfolge und Bodenbearbeitung auf die Stabilität oberflächennaher Bodenaggregate rekultivierter Böden aus Löss. Mitteilungen DBG 72, S. 127-130

- HURNI, H. with the assistance of an international group of contributors (1996): Precious Earth: From Soil and Water Conservation to Sustainable Land Management. International Soil Conservation Organisation (ISCO) and Centre for Development and Environment (CDE). Bern
- ISCO (Hg.) (1996): Conclusions and recommendations of ISCO'96. Bonn
- JUNG, G. (1988): Die Spatendiagnose nach Görbing, Johannes. Ihre Aussagekraft im Vergleich mit bodenphysikalischen Untersuchungen. Diplomarbeit Fachhochschule Weihenstephan.
- KÄMPF, R. (1953): Ein Beitrag zur Beurteilung und Erfassung der Bodengare bei Lösslehm-böden. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 96, S. 333-366
- KANDELER, E.; MURER, E. (1993): Aggregate Stability and Soil Microbial Processes in a Soil with Different Cultivation. Geoderma 56, S. 503-513
- KANDELER, E. et al. (1995): Bodenmikrobiologische Prozesse als frühzeitige Indikatoren für die Änderung der Bodennutzung. Mitteilungen DBG 76, S. 637-640
- KANDLER, O. (1977): Das Klima des Rhein-Main-Nahe-Raumes. Mainzer Geographische Studien 11, Festschrift zum 41. Dt. Geographentag, Mainz, S. 379-387
- KATSCHINSKI, N. A. (1958): Die Natur der mechanischen Stabilität und Wasserstabilität der Bodenstruktur. In: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung. Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften. Berlin
- KAUER, R. (1993): Vergleichende Untersuchungen zum integrierten und ökologischen Weinbau - Ausgewählte Ergebnisse zur Schaderregerbekämpfung. In: Forschung im ökologischen Landbau, Zerger, U. (Hg.), SÖL-Sonderausgabe 42, Bad Dürkheim, S. 244-248
- KELLER, L. (1990): Methoden für die Beurteilung umweltschonender Bewirtschaftungstechniken in der Landwirtschaft. Instrumente zur Beurteilung der Umweltwirkung von umweltgerechter Landwirtschaft. Liebefeld-Bern
- KEMPER, W. D. et al. (1985): Gas Displacement and Aggregate Stability of Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49, S. 25-28
- KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. (1986): Aggregate stability and size distribution. In: Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods, Klute, A. (Hg.), Agronomy Monograph 9, S. 425-442
- KLAER, W. (1977): Grundzüge der Naturlandschaftsentwicklung von Rheinhessen. Mainzer Geographische Studien 11, Festschrift zum 41. Dt. Geographentag, Mainz, S. 211-225
- KÖLLER, K. (1993): Erfolgreicher Ackerbau ohne Pflug: wissenschaftliche Ergebnisse - praktische Erfahrungen. Frankfurt (Main)
- KÖNEKAMP, A.; ZIMMER, E. (1954): Ergebnisse der Wurzeluntersuchungen Völkenrode 1949-1953. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 65, S. 158-169

- KOEPF, H. (1953): Die biologische Aktivität des Bodens und ihre experimentelle Kennzeichnung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 64, S. 138-146
- KÖPKE, U. (1979): Ein Vergleich von Feldmethoden zur Bestimmung des Wurzelwachstums landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Dissertation. Universität Göttingen
- KUBIENA, W. (1938): Über das Elementargefüge des Bodens. = Bodenkundliche Forschung 4. Wien
- KÜHNELT, W. (1958): Zoogene Krümelbildung in ungestörten Böden. In: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung. Deutsche Akademie für Landwirtschaftswissenschaften. Berlin, S. 193-200
- KULLMANN, A. (1956): Methoden zur Krümelstrukturuntersuchung des Bodens. In: Die deutsche Landwirtschaft 9, S. 442-446
- KULLMANN, A. (1958): Zur Problematik der Krümelstabilitätsmessungen und zur Methodik des Durchflussverfahrens. In: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung. Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften. Berlin, S. 7-34
- KULLMANN, A., KOITZSCH, R. (1956): Zur Krümelstabilitätsmessung auf leichtem Boden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 73, S. 224-235
- KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G.; SCHWERDTFEGGER, G. (1994): Bodenkunde. Stuttgart.
- KUSSEL, N. (1998): Schriftliche Mitteilung
- KUSSEL, K. (1999): Schriftliche Mitteilung
- LAL, R.; GREENLAND, D.J. (Hg.) (1979): Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics. Chichester
- LEITHOLD, G. (2000): Mündliche Mitteilung
- LIEBEROTH, I. (1969): Bodenkunde Bodenfruchtbarkeit. Berlin.
- LUDWIG, M. (1977): Zur Bodengeographie des Rheinhessischen Tafel- und Hügellandes. Mainzer Geographische Studien 11, Festschrift zum 41. Dt. Geographentag, Mainz, S. 277-283
- LYNCH, J. M. (1983) Soil Biotechnology. Blackwell, Oxford
- MÄDER, P. (1993): Effekt langjähriger biologischer und konventioneller Bewirtschaftung auf das Bodenleben. In: Forschung im ökologischen Landbau, Zerger, U. (Hg.), SÖL-Sonderausgabe 42, Bad Dürkheim, S. 271-278
- MEUSER, H. (1991): Bodenkundliche Aspekte bei Wurzeluntersuchungen an Kulturpflanzen. Die Geowissenschaften 8, S. 247-250

- MÜCKENHAUSEN, E. (1947): Die Spatendiagnose im Rahmen der Bodenkunde. Neue Mitteilungen für die Landwirtschaft 2, 159-161
- MÜCKENHAUSEN, E. (1993): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen, 4. Aufl., Frankfurt (Main)
- MÜLLER, G. (1958): Beziehungen zwischen Biologie und Struktur des Bodens. In: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung. Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften. Berlin, S. 167-192
- MÜLLER-SÄMANN, K. (1986): Bodenfruchtbarkeit und Standortgerechte Landwirtschaft in den Tropen. Eschborn
- MULLA, D.J. et al. (1992): Temporal Variation in Aggregate Stability on Conventional and Alternative Farms. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, S. 1620-1624
- MUNKHOLM, L. (1998): Non-Inverting Soil Tillage as a Means of Optimising Soil Tilth. Proceedings, NJF-Seminar no. 286. Soil Tillage and Biology. June 8-10th, Ås, Norway
- MURER, E. J. et al. (1993): An Improved Sieving Machine for Estimation of Soil Aggregate Stability (SAS). Geoderma 56, S. 539-547
- NEUDECKER, E. (1997): Untersuchungen zur Frage der Durchwurzelung bei wendender und nicht wendender Bodenbearbeitung im ökologischen Landbau. Diplomarbeit, Fachbereich Gartenbau, Fachhochschule Osnabrück
- OADES, J.M. (1984): Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. Plant and Soil 76, S. 319-337
- ÖDORFER, A.; POMMER, G. (1997): Zusammenhänge zwischen Anbauintensität und Befall mit Weizenkrankheiten. In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Köpke U.; Eisele, J. A. (Hg.), Berlin, S. 302-307
- PFIFFNER, I. (1993): Einfluss langjährig ökologischer und konventioneller Bewirtschaftung auf Regenwurmpopulationen. In: Forschung im ökologischen Landbau, Zerger, U. (Hg.), SÖL-Sonderausgabe 42, Bad Dürkheim, S. 280-287
- PORTRATZ, K. U. (1993): Bedeutung von Feuchte und Struktur der Bodenoberfläche für die Bodenerosion. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen 11, Bonn
- PREUSCHEN, G. (1989): Bodengesundung. Aktiver Bodenschutz durch Wiederbelebung der Böden und Herstellung der natürlichen Bodenfunktionen. SÖL-Sonderausgabe 18, Bad Dürkheim
- RID, H. (1961): Strukturveränderungen des Ackerbodens im Bereich der Krume, der Pflugsohle und des Untergrundes, nachgewiesen durch Strukturdiagnosen und Messungen der Grobstruktur. In: Sonderdruck Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 114, S.58-86

- REX, M. (1984): Der Einfluss der Durchwurzelbarkeit des Bodens auf den Ertrag und den Nährstoffentzug von Getreide. = Giessener Bodenkundliche Abhandlungen 1. Dissertation Giessen
- RSU (1985): Umweltprobleme der Landwirtschaft. Rat der Sachverständigen für Umweltfragen (Hg.), Sondergutachten. Bonn
- RSU (1987): Umweltgutachten. Bonn
- RSU (1994): Umweltgutachten. Bonn
- ROBERT BOSCH STIFTUNG (Hg.) (1994): Schwäbisch Haller Agrarkolloquium zur Bodennutzung, den Bodenfunktionen und der Bodenfruchtbarkeit. Denkschrift für eine umweltfreundliche Bodennutzung in der Landwirtschaft. Gerlingen
- ROGASIK, H. et al. (1995): Bodenphysikalische und bodenbiologische Untersuchungen der Gefügeentwicklung im A-Horizont dreier Landnutzungssysteme. Mitteilungen DBG 76, S. 61-64
- ROTH, C. H. (1996): Aggregation Indices to Characterize Structural Breakdown of Dry Soil Samples by Air Slaking. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 159, S. 429-435
- SCHACHTSCHABEL, P.; HARTGE, K. (1958): Die Verbesserung der Strukturstabilität von Ackerböden durch eine Kalkung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 83, S.193-202
- SCHAFFER, G. (1960): Eine Methode zur Abscherwiderstandsmessung von Ackerböden zur Beurteilung ihrer Strukturfestigkeit im Felde. Landwirtschaftliche Forschung 13, S. 25-44
- SCHNEIDER, R.; EMMERLING, C.; SCHRÖDER, D. (1995): Auswirkungen von Grünbrache auf die bodenphysikalische Standortqualität. Mitteilungen DBG 76, S. 153-156
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Aufl., Stuttgart
- SHELLER, E. (1994): Pflanzenernährung und Düngung im organischen Landbau. In: Springer Loseblatt System Ökologische Landwirtschaft. Pflanzenbau, Tierhaltung, Management 1, Lünzer, I.; Vogtmann, H. (Hg.), Heidelberg, New York, Sektion 02.02, S. 1-21
- SCHINNER, F.; SONNLEITNER, R. (1996 a): Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Bodenökologie 1: Grundlagen, Klima, Vegetation, Bodentyp. Berlin
- SCHINNER, F.; SONNLEITNER, R. (1996 b): Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Bodenökologie 2: Bodenbewirtschaftung, Düngung und Rekultivierung. Berlin
- SCHLICHTING, E. et al. (1995): Bodenkundliches Praktikum. 2. Aufl. Hamburg

- SEITZ, L. (1997): Einfluss reduzierter Bodenbearbeitung im Ökologischen Landbau auf Nährstoffhaushalt und mikrobiologische Eigenschaften von Böden sowie die Besiedelung durch Regenwürmer. Diplomarbeit Universität Trier, Fachbereich Angewandte Geographie/Geowissenschaften. Trier
- SEKERA, F.; BRUNNER, A. (1943): Beiträge zur Methodik der Garesforschung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 29, S. 196-212
- SEKERA, F. (1951 a): Der allgemeine Bauplan der Bodenstruktur und die Dynamik der Bodengare. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 52, S. 57-60
- SEKERA, F. (1951 b): Das Krankheitsbild des Gareschwundes. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 52, S. 150-160
- SEKERA, M. (1984): Gesunder und kranker Boden. Ein praktischer Wegweiser zur Gesunderhaltung des Ackers. Graz - Stuttgart
- SIEFERT, E. (1977): Der organisch - biologische Landbau. In: Ökologischer Landbau, eine europäische Aufgabe: Agrarpolitik und Umweltprobleme. Alternative Konzepte 21. Karlsruhe, S. 39-52
- SIEGRIST, S. (1995): Experimentelle Untersuchungen über die Verminderung der Bodenerosion durch biologischen Landbau in einem NW-schweizerischen Lössgebiet. Die Erde 126, S. 93-106
- SIEGRIST, S. et al. (1998). Does Organic Agriculture Reduce Soil Erodibility? The Results of a Long-Term Field Study on Loess in Switzerland. Agriculture, Ecosystems & Environment 69, S. 253-264
- SLATER, C.; HOPP, H. (1951): Winter decline of soil structure in clean-tilled soils. In: Agron. Journ. 43, S.1
- SOBOTIK, M. (1989): Auf die Wurzel kommt es an! Bedeutung der Wurzelökologie für die praktische Landwirtschaft. Der Förderungsdienst 6, S. 174-177
- SOMMER, C.; ZACH, M. (1992): Grundbodenbearbeitung mit nicht wendender Lockerung. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (ktBL). Arbeitspapier 190. Darmstadt, S. 35-42
- STOCKFISCH, N. et al. (1995): Einfluss reduzierter Bodenbearbeitung auf biologische und chemische Kennwerte in verschiedenen Tiefen einer Löss-Parabraunerde. Mitteilungen DBG 76, S. 697-700
- STOOPS, G.; JONGERIUS, A. (1975): Proposal for a Micromorphological Classification of Soil Materials. I. Classification of the Related Distribution of Fine and Coarse Particles. Geoderma 13, S. 189-199
- SUNKEL, R. (1961 a): Über die Porosität von Bodenaggregaten. 2. Mitteilung: Untersuchungsergebnisse. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 3, S.221-234

- SUNKEL, R. (1961 b): Über die Porosität von Bodenaggregaten. 3. Mitteilung: Vergleich zwischen Stabilität und Porosität von Aggregaten und Beziehungen zum Kohlenstoffgehalt und zur Korngrößenverteilung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 3, S.234-244
- TEBRÜGGE, F. (1989): Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen im 10-jährigen Versuch auf technische Leistungsparameter, Bodenstruktur, biologische Aktivität, Pflanzenkrankheiten und Ertrag. Proc. 11th International Congress on Agricultural Engineering, 24.-26. 11. 1990, Berlin, S. 21-22
- TEBRÜGGE, F.; EICHHORN (1992): Die ökologischen und ökonomischen Aspekte von Bodenbearbeitungssystemen. In: Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Beiträge zum 3. Symposium vom 12.-13. Mai 1992 in Giessen. Giessen, S. 7-20
- TEIPEL, R. (1952 a): Das Ausmaß der Strukturschäden auf verschiedenen Böden Thüringens - 1. Teil. In: Die deutsche Landwirtschaft 11, S. 587-591
- TEIPEL, R. (1952 b): Das Ausmaß der Strukturschäden auf verschiedenen Böden Thüringens - Schluss. In: Die deutsche Landwirtschaft 12, S. 650-653
- TEIWES, K. (1988): Einfluss von Bodenbearbeitung und Fahrverkehr auf physikalische Eigenschaften schluffreicher Ackerböden.
- TIPPKÖTTER, R. (1993): Klassifikation von Aggregierungsmerkmalen mit Hilfe der Ultraschalldiagnostik. Mitteilungen DBG, 72, S. 273-276
- TISDALL, JM.; OADES, JM. (1982): Organic matter and water-stable Aggregates in soils. Journal Soil Sci. 33, S. 141-163.
- UBA (1997): Nachhaltiges Deutschland. Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Umweltbundesamt (Hg.), Berlin
- UBA (1998): Maßstäbe bodenschonender landwirtschaftlicher Bodennutzung - Erarbeitung von Beurteilungskriterien und Messparametern als Grundlagen für fachliche Regelungsansätze. Umweltbundesamt (Hg.), Berlin
- UNEP/ISRIC (1990): The extend of human-induced soil degradation. Annex 5. United Nations Environment Programme; International Soil Reference and Information Center (Hg.), Wageningen. Netherlands
- VASILIU, A. (1958): Der Einfluss einiger Dauergramineen- und Leguminosengemische auf die Wasserstabilität der Struktur einiger Böden der rumänischen Volksrepublik. In: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung. Deutsche Akademie für Landwirtschaftswissenschaften. Berlin, S. 207-216
- VOGTMANN, H.; FRAGSTEIN, P., von (1984): Qualitätsbeurteilungen von Lebensmitteln aus alternativer Sicht. VDLUFA-Sonderdruck

- VOIGT, S. (1998): Bodenstruktur und Bodenwasserhaushalt bei unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung und -bearbeitung im Verlauf einer Vegetationsperiode. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
- VORDERBRÜGGE, TH. (1989): Einfluss des Bodengefüges auf Durchwurzelung und Ertrag bei Getreide - Untersuchungen an rekultivierten Böden und einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch. Dissertation. Giessener Bodenkundliche Abhandlungen 5. Niederkleen
- WAIBEL, H.; FLEISCHER, G. (1998): Kosten und Nutzen des chemischen Pflanzenschutzes in der deutschen Landwirtschaft aus gesamtwirtschaftlicher Sicht. Kiel
- WILDENHAYN, M. (1994): Persönliche Mitteilung. In: Integrierter Landbau. Systeme umweltbewusster Pflanzenproduktion. Grundlagen, Praxiserfahrungen, Entwicklungen, Dierks, R.; Heitefuss, R. (Hg.), München/Münster Hiltrub/Wabern-Bern, S. 109
- WBGU (1994): Die Welt im Wandel - Die Gefährdung der Böden. (= Jahresgutachten 1994). Bonn.
- WERNER, J.; THÄMERT, W. (1988): Zur Diagnose des physikalischen Bodenzustandes auf Produktionsflächen. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkunde 12, Berlin, S. 729-739
- WERNER, D. (1993): Ergebnisse röntgenmorphologischer Untersuchungen verdichteter und gelockerter Bodengefüge. Mitteilungen DBG 72, S. 281-284
- WEST, A. W. (1987): Relationships between Mycelial and Bacterial Populations in Stored, Air-Dried and Glucose-Amended Arable and Grassland Soil. Soil Biol Biochem 19, S. 599-605
- WICHTMANN, H. (1955): Untersuchungen zur Frage der Aggregatbindekräfte in lufttrockenen Bodenkrümeln. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 71, S. 232-246
- WILKENS, K. (1992): Kennzeichnung des Makroporensystems des Bodens bei abnehmender Bearbeitungsintensität (Pflug, Grubber, Direktsaat) mittels digitaler Bildanalyse. In: Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Beiträge zum 3. Symposium vom 12.-13. Mai 1992 in Giessen, Friebe, B. (Hg.), Giessen, S. 43-49
- ZACHARTSCHENKO, I. (1956): Zur Messmethodik der Stabilität der Bodenstruktur. Bodenkunde 1, S. 54-62

9 Anhang