

Forschungsbericht

Nr. 108

Landbewirtschaftung und Hochwasserschutz – Vorsorgender Hochwasserschutz durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen

Verfasser:

Gerardo Friedrich, Heinrich Franken

Institut für Pflanzenbau

Herausgeber: Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Endenicher Allee 15, 53115 Bonn
Tel.: 0228 – 73 2297; Fax.: 0228 – 73 1776
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Bonn, Juli 2003

ISSN 1610-2460

Projektleitung: Prof. Dr. Heinrich Franken

Projektbearbeiter: Dipl. Ing. Agr. Gerardo Friedrich

Institut für Pflanzenbau
Katzenburgweg 5
53115 Bonn
Tel./Fax: 0228/73 2852

Zitiervorschlag:

FRIEDRICH, G. UND H. FRANKEN (2003): Landbewirtschaftung und Hochwasserschutz – Vorsorgender Hochwasserschutz durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, 108, 104 Seiten.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Literaturübersicht	3
2.1 Hydrologische Grundlagen	3
2.2 Oberflächenabfluß und Wassererosion.....	5
2.3 Zwischenabfluß und Wassererosion.....	6
2.4 Bodenverdichtungen.....	7
2.5 Erfassung von Bodenverdichtungen durch Eindringwiderstandsmessungen.....	9
2.6 Arbeitshypothesen	11
3. Material und Methoden	13
3.1 Freilandversuche zur Messung des Zwischenschichtabflusses	13
3.1.1 Standorte	13
3.1.2 Witterungsverlauf.....	13
3.1.3 Versuchsanlage und –durchführung.....	14
3.1.4 Bodenphysikalische Untersuchungen.....	17
3.1.5 Direkte Abflußmessungen	17
3.2 Modellversuch zur Messung des Zwischenschichtabflusses.....	18
3.2.1 Versuchsanlage und –durchführung.....	19
3.2.1.1 Aufbau und Befüllung der Modellkästen.....	19
3.2.1.2 Versuchsanlage und Regensimulator	21
3.2.2 Bodenphysikalische Untersuchungen.....	22
3.2.3 Beregnungen und Abflußmessungen.....	22
3.3 Befragung über Bodenverdichtungen und Bodenschutz sowie Erfassung von Bodenverdichtungen in ausgewählten Regionen Nordrhein-Westfalens.....	24
3.3.1 Standorte.....	24
3.3.2 Befragung der Betriebsleiter.....	24
3.3.3 Penetrologger und Eindringwiderstandsmessungen.....	25
3.4 Statistische Auswertung	27
4. Ergebnisse	28
4.1 Freilandversuche	28
4.1.1 Abflußmessungen im Freilandversuch.....	28
4.1.1.1 Einfluß der Lockerungsmaßnahmen auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß.....	28
4.1.1.2 Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß.....	33
4.1.2 Physikalische Bodeneigenschaften.....	33

4.2 Modellversuch	38
4.2.1 Abflußmessungen und Berechnungen.....	38
4.2.1.1 Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf den Beginn des Abflusses	39
4.2.1.2 Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei unterschiedlicher Berechnungsintensität	42
4.2.1.3 Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei natürlichem Niederschlag .	48
4.2.1.4 Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei „Abtrocknungsversuchen“	50
4.2.2. Physikalische Bodeneigenschaften.....	51
4.3 Befragung und Eindringwiderstandsmessungen	54
5. Diskussion	61
5.1 Wirkung der Lockerungsmaßnahmen	62
5.1.1 Freilandversuche.....	62
5.1.2 Modellversuch	65
5.1.2.1 Abflußbeginn	65
5.1.2.2 Abflußmengen.....	67
5.2 Wirkung des Zwischenfruchtanbaus	69
5.2.1 Modellversuch	70
5.2.1.1 Abflußbeginn	70
5.2.1.2 Abflußmengen.....	70
5.3 Eindringwiderstandsmessungen	71
5.4 Befragung	74
6. Schlußfolgerungen für die Umsetzung in die Praxis.....	77
7. Zusammenfassung.....	79
8. Literaturverzeichnis	81
9. Anhang	87
10. Liste der Posterpräsentationen, Vorträge und Veröffentlichungen.....	102
11. Kurzfassung	103

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Anhangtab.	Anhangtabelle
Aufl.	Auflage
BeOB	Beginn des Oberflächenabflusses
BeSic	Beginn des Sickerwasserabflusses
BeZS	Beginn des Zwischenschichtabflusses
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratzentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
d	Tag
DIN	Deutsche Industrienorm
et al.	und andere
FK	Feldkapazität
fS	Feinsandfraktion
fU	Feinschlufffraktion
g	Gramm
gS	Grobsandfraktion
gU	Grobschlufffraktion
h	Stunde
ha	Hektar
m	Meter
min	Minuten
ml	Milliliter
mL	Varianten „mit Lockerung“
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
mS	Mittelsandfraktion
mU	Mittelschlufffraktion
mZF	Varianten „mit Zwischenfrucht“
NRW	Nordrhein-Westfalen
NS	Niederschlag
OB	Oberflächenabfluß
OK	Tiefenbereich „Oberkrume“

oL	Varianten „ohne Lockerung“
oZF	Varianten „ohne Zwischenfrucht“
PC	Personal Computer
PS	Tiefenbereich „Pflugsohle“
S	Sandfraktion
s	Sekunde
Sic	Sickerwasserabfluß
T	Tonfraktion
Tab.	Tabelle
teilw.	teilweise
U	Schlufffraktion
UB	Tiefenbereich „Unterboden“
Wdh.	Wiederholung
WG	Wintergerste
WR	Winterraps
ZS	Zwischenschichtabfluß

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsanlage auf den Standorten Frankenforst, Vinxel und Wülfrath	15
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Meßflächen innerhalb der Parzellen mit Randverdichtung und Grube für die Meßeinrichtungen	16
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Meßeinrichtungen (verändert nach Beining, 2001)	18
Abbildung 4: Aufbau eines gefüllten Modellkastens	20
Abbildung 5: Versuchsplan des Modellversuchs 2000-2001 mit Beregnungsanlage	23
Abbildung 6: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen > 1,8 MPa	27
Abbildung 7: Penetrologger zur Messung des Eindringwiderstandes	27
Abbildung 8: Oberflächenabfluß und Niederschlags in Frankenforst (2000-2001)	29
Abbildung 9: Zwischenschichtabfluß und Niederschlag in Frankenforst (2000-2001)	29
Abbildung 10: Oberflächenabfluß und Niederschlag in Wülfrath (1999-2000)	31
Abbildung 11: Zwischenschichtabfluß und Niederschlag in Wülfrath (1999-2000)	31
Abbildung 12: Oberflächenabfluß und Niederschlag in Wülfrath (2000-2001)	32
Abbildung 13: Zwischenschichtabfluß und Niederschlag in Wülfrath (2000-2001)	32
Abbildung 14: Lagerungsdichte in Frankenforst (2000-2001)	33
Abbildung 15: Porenvolumen und Porenverteilung in Frankenforst (2000-2001)	34
Abbildung 16: Lagerungsdichte in Wülfrath (1999-2000)	35
Abbildung 17: Lagerungsdichte in Wülfrath (2000-2001)	35
Abbildung 18: Porenvolumen und Porenverteilung in Wülfrath (1999-2000)	36
Abbildung 19: Porenvolumen und Porenverteilung in Wülfrath (2000-2001)	36
Abbildung 20: Lagerungsdichte in Vinxel (1999-2000)	37
Abbildung 21: Porenvolumen und Porenverteilung in Vinxel (1999-2000)	37
Abbildung 22: Einfluß der Lockerung auf den Beginn des Abflusses (min); T1-3 (a-c), Beregnungsintensität: 25 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	39
Abbildung 23: Einfluß der Lockerung auf den Beginn des Abflusses (min); T5-7 (a-c), Beregnungsintensität: 5 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	40
Abbildung 24: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Beginn des Abflusses (min) T1-3 (a-c), Beregnungsintensität: 25 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	41
Abbildung 25: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sicker- wasserabfluß (ml); T1-3 (a-c), Beregnungsintensität: 25 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	42
Abbildung 26: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sicker- wasserabfluß (ml); T9, Beregnungsintensität: 50 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	43
Abbildung 27: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sicker- wasserabfluß (ml); T15, Beregnungsintensität: 4 x 5 mm x 12 min ⁻¹ d ⁻¹	44

Abbildung 28: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); T1-3 (a-c), Beregnungsintensität: 25 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	44
Abbildung 29: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); T9, Beregnungsintensität: 50 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	46
Abbildung 30: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächenabfluß bei den Beregnungsversuchen T15, T16 und T17 (ml).....	47
Abbildung 31: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei natürlichem Regen (ml); T10, T12 und T14	48
Abbildung 32: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei natürlichem Regen (ml); T10, T12 und T14	49
Abbildung 33: Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschicht- und das Sickerwasserabfluß bei den „Abtrocknungsversuchen“; T4, T8 und T11 (ml).....	50
Abbildung 34: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Zwischenschicht- und das Sickerwasserabfluß bei den „Abtrocknungsversuchen“; T4, T8 und T11 (ml).....	51
Abbildung 35: Einfluß der Lockerung auf die Lagerungsdichte in der Oberkrume und im Pflugsohlenbereich (Modellversuch 2000-2001)	52
Abbildung 36: Einfluß der Lockerung auf das Gesamtporenvolumen und die Porenverteilung in der Oberkrume und im Pflugsohlenbereich (Modellversuch 2000-2001)	52
Abbildung 37: Einfluß der Zwischenfrucht auf die Lagerungsdichte in der Oberkrume und Pflugsohlenbereich (Modellversuch 2000-2001)	53
Abbildung 38: Einfluß der Zwischenfrucht auf das Gesamtporenvolumen und die Porenverteilung in der Oberkrume und im Pflugsohlenbereich (Modellversuch 2000-2001)	53
Abbildung 39: Wie haben Sie vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren?	54
Abbildung 40: Fühlen sie sich über das Bundesbodenschutzgesetz informiert?	55
Abbildung 41: Inwiefern sehen Sie Konfliktpotential zwischen dem Bundesbodenschutzgesetz und Ihrer Bodenbewirtschaftung?	55
Abbildung 42: Wie oft kontrollieren Sie Ihre Flächen mit Spaten oder Handbodensonde auf Bodenschadverdichtungen?	56
Abbildung 43: Haben Sie auf Ihren Flächen Anzeichen für Bodenschadverdichtungen beobachten können?	57
Abbildung 44: Wie beurteilen Sie Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich der Vermeidung von Bodenschadverdichtungen?	57
Abbildung 45: Was hat Sie davon abgehalten, auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren umzustellen?	58
Abbildung 46: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen mit Werten > 1.8 MPa (0-20 cm Tiefe)	58

Abbildung 47: Klassifizierung der Werte $>1,8$ MPa im oberen Krumbereich (0-20 cm Tiefe)	59
Abbildung 48: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen mit Werten $> 1,8$ MPa in der Krumbasis (20-45 cm Tiefe)	59
Abbildung 49: Klassifizierung der Werte $>1,8$ MPa in der Krumbasis (20-45 cm Tiefe)	60
Tabelle 1: Standorteigenschaften der Versuchsflächen	14
Tabelle 2: Korngrößenverteilung in 0-50 cm Tiefe	17
Tabelle 3: Herkunft, Bodenart und Bodentyp des Modellbodens	19
Tabelle 4: Korngrößenverteilung des Modellbodens	20
Tabelle 5: Berechnungszeitplan des Modellversuches	23
Tabelle 6: Klassifizierung der Flächen nach Verdichtungsgrad	26
Tabelle 7: Abflußbeginn (min) bei unterschiedlicher Berechnungsintensität	41
Tabelle 8: Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei unterschiedlicher Berechnungsintensität	45

1. Einleitung

Hochwasser kann als Prozeß bezeichnet werden, der entsteht, wenn zu viel Niederschlag in kurzer Zeit fällt und dieser nicht vom Boden aufgenommen wird. Das Niederschlagswasser fließt ober- oder unterirdisch ab und gelangt schneller in Vorfluter und Flüsse (GÖTTLE, 1996). So hat der Boden mit seiner Regulierungsfunktion eine besondere Bedeutung bei der Aufnahme und Retention von Niederschlagswasser. In der Bundesrepublik Deutschland fällt nur ein geringer Teil des Niederschlagswassers auf sogenannte „versiegelte Flächen“ (Siedlungen, Straßen, Industrie). Der überwiegende Teil wird von landwirtschaftlich genutzten Flächen und Waldgebieten aufgenommen. Von der gesamten Fläche der Bundesrepublik beträgt der Anteil der Waldgebiete etwa 30% und etwa 54 % werden landwirtschaftlich genutzt. Von den ca. 193 000 km² landwirtschaftlich genutzter Fläche entfallen ca. 68 % auf Ackerland und der Rest auf Dauergrünland, Gartenbau und Weinbau (BML, 2001). In Nordrhein-Westfalen sind diese Verhältnisse mit ca. 52 % landwirtschaftliche Nutzung und ca. 25 % Wald sehr ähnlich (LANDESAMT FÜR DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK NORDRHEIN-WESTFALEN, 2002). Somit spielt der Zustand der Ackerböden hinsichtlich der Wasserkapazität und Infiltrationsfähigkeit eine wesentliche Rolle.

Der Ursprung des Hochwassers liegt u.a. im verminderten Rückhaltevermögen der Böden, vor allem in den oberen Bereichen des Gewässernetzes. Hier kommt es zur Bildung von Abflußkomponenten, die das Niederschlagswasser schneller in die Vorfluter abfließen lassen. Aus diesem Grunde sollte Hochwasserschutz bei der Erhaltung bzw. Wiederherstellung des Wasserrückhalte- und Speichervermögens in der Landwirtschaft ansetzen (HACH und HÖLTL, 1989). Hierzu zählt vor allem die Änderung der Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Verminderung von Bodenverdichtungen (PESEL, 1997).

Die durch die Landwirtschaft hervorgerufenen Schädigungen des Bodenwasserhaushaltes führen zur schnelleren Ableitung des Niederschlagswassers und sind somit an der Bildung von Hochwasser beteiligt (DYCK und PESCKKE, 1995). Schädigungen des Bodenwasserhaushaltes können durch bearbeitungsbedingte Unterbodenverdichtungen oder durch zu geringen Schutz der Bodenoberfläche gegenüber aggregatzerstörenden Regentropfen, die zu einer Verschlammung führen, den Oberflächenabfluß fördern.

Ziel der vorliegenden Studie ist die quantitative Erfassung des Wasserabflusses, vor allem des unterirdisch auf Bodenverdichtungen abfließenden Zwischenschichtabflusses. Dazu wurden auf verschiedenen Standorten in Nordrhein-Westfalen Freilandversuche zur Messung vom Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß durchgeführt, um die Auswirkungen von Boden-

schadverdichtungen auf diese Abflußkomponenten zu prüfen. Im einzelnen wurde die Wirkung von Lockerungsmaßnahmen und des Anbaus von Zwischenfrüchten auf den Bodenwasserhaushalt untersucht. Zusätzlich zu den Freilandversuchen wurden diese Versuchsfragen auch in einem Modellversuch mit künstlicher und kontrollierter Beregnungsintensität geprüft, bei dem zusätzlich zum Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß auch das Sickerwasser erfaßt werden konnte.

Um die Verbreitung von Bodenverdichtungen in Nordrhein-Westfalen zu ermitteln, wurden in drei ausgewählten Regionen Eindringwiderstandsmessungen auf 85 landwirtschaftlichen Betrieben durchgeführt. Zeitgleich haben die Betriebsleiter dieser landwirtschaftlichen Betriebe an einer Befragung über das Bodenschutzgesetz und das Vorkommen von Bodenverdichtungen auf ihren Flächen teilgenommen. Die Auswertungen der Messungen und der Befragung sind wesentliche Bestandteile dieser Arbeit.

2 Literaturübersicht

2.1 Hydrologische Grundlagen

Der Niederschlag bildet das Anfangsglied des Wasserkreislaufes eines Wassereinzugsgebietes (MATTHEß und UBELL, 1983). Dieser fällt, wenn man von Flüssen und Seen absieht, auf den Boden oder auf die Pflanzendecke. Das Wasser kann, bevor es verdunstet, von der Vegetationsdecke festgehalten werden (Interzeption) oder durch die Pflanzen über Transpirationsprozesse wieder in die Atmosphäre gelangen. Zwischen dem vegetationslosen und dem bedeckten Boden können erhebliche Unterschiede in der Aufnahme- und Retentionskapazität bestehen. Das nicht verdunstete, von der Vegetation nicht aufgenommene oder festgehaltene Wasser gelangt auf die Bodenoberfläche und kann bei ungestörten Bedingungen versickern (BRONSTERT, 1994). Dieser Prozeß der Infiltration wird stark vom Zustand und den Eigenschaften des Bodens beeinflusst. Dazu gehören Anfangswassergehalt, Porenvolumen, Gefüge- und Aggregatstabilität, Wassernachschub und Vorrücken des Wassers im Bodenprofil (RODDA, 1976; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998; HARTGE und HORN, 1999).

Ein Teil des infiltrierten Wassers wird durch Evapotranspiration dem Boden wieder entzogen und ein weiterer Teil bleibt als „Bodenfeuchte“ im Porenvolumen des Bodens gespeichert. Das infiltrierte Niederschlagswasser versickert bei ungestörten Bedingungen im Boden bis ins Grundwasser und bildet einen unterirdischen Abfluß, der von MATTHEß und UBELL (1983) als **Basisabfluß** bezeichnet wird. Wird durch Niederschläge dem Boden mehr Wasser zugefügt als er aufnehmen kann, dann kommt es zwangsweise zu anderen Abflußarten, die das überschüssige Wasser abführen. Zur vertikalen Wasserbewegung kommt dann ein horizontaler Abfluß hinzu. So kann das Niederschlagswasser als **Oberflächenabfluß** abfließen, der den Anteil des Niederschlagswassers darstellt, der unmittelbar in die Vorfluter fließt, ohne in den Boden einzudringen (DIN 4049₁, 1979). Der Anteil an Oberflächenwasser wächst mit zunehmender Niederschlagsintensität, mit der Geländeneigung und der Abnahme der Infiltrationsrate eines Bodens (BLUME, 1990).

Zum Basis- und Oberflächenabfluß kommt der Anteil der Niederschläge hinzu, der zunächst in den Boden versickert, aber aufgrund von Neigung oder Störungen unterirdisch lateral zum Vorfluter abfließt (HÖLTING, 1996). Diesen bezeichnet FLÜGEL (1979) als **Zwischenfluß**; er stellt die infiltrierte Wassermenge aus einem Niederschlag dar, die sich im Boden geneigter Flächen überwiegend parallel zur Oberfläche bewegt und dem Vorfluter auf kürzerem Wege als das Grundwasser zufließt. Oberflächenabfluß und Zwischenabfluß werden in der Literatur

als **Direktabfluß** bezeichnet und bilden mit dem Basisabfluß den **Gesamtabfluß** (MATTHEß und UBELL, 1983; BRONSTERT, 1994). Bei intaktem, porösem Boden, durch den das Wasser ungehindert versickern kann, entsteht in der Regel kein Zwischenfluß (SELBY, 1982). Die Begriffe „Zwischenfluß“, „Zwischenabfluß“ und „Zwischenschichtabfluß“ werden in dieser Arbeit - je nach Quelle - synonym verwendet.

In einem hydraulisch homogenen Boden würde das Wasser entlang der Gravitation vertikal versickern. Diese idealisierte Situation eines Bodens ist in der Natur kaum anzutreffen, da die Feuchtepotentiale örtlich und zeitlich unterschiedlich sind. So nimmt die Infiltrationsrate mit zunehmender Auffüllung des Speicherraumes des Bodens, durch die Verringerung des hydraulischen Gradienten und aufgrund höherer Lagerungsdichte in tieferen Bodenschichten ab (BEISECKER, 1993). Hier kommt den Makroporen eine besondere Bedeutung zu, da der Makroporenfluß in der Regel schneller abläuft als es dem hydraulischen Gradienten entsprechen würde (BEVEN und GERMANN, 1982).

Die Infiltration eines Niederschlages findet zunächst in einem ungesättigten 3-Phasen System mit Boden, Wasser und Luft statt. Erst wenn das Porensystem der Bodenmatrix mit Wasser gefüllt ist, erfolgt die Wasserinfiltration in ein 2-Phasen System mit Boden- und Wasserbeteiligung. Diese gesättigte Wasserleitfähigkeit hängt stark vom Grob- und Makroporenanteil des Bodens ab (KUNTZE, 1994). Bei ungesättigten Verhältnissen wird das Wasser zunächst von der Bodenmatrix aufgenommen und fließt erst bei anhaltender Wasserzufuhr und erreichter Sättigung in die Makroporen. Dann wird das Wasser von diesen weitergeleitet (WORRESCHK, 1985; HIGGINS und COATES, 1990).

Vor allem bei Hangflächen können die Wasserpotentiale sehr stark voneinander abweichen. So ist im Allgemeinen der Wassergehalt am Hangfuß höher als im oberen Bereich. Befindet sich zudem eine Stauschicht im Boden, so entsteht eine horizontale Bewegungskomponente, die das Wasser schneller in den wassergesättigten Grundwasserbereich am Hangende führt. Bei lang andauernder Wasserzufuhr kann sich dieser gesättigte Bereich hangaufwärts erstrecken, wenn das Wasser nicht weiter abgeführt wird (ZUIDEMA, 1985).

Von besonderer Bedeutung für die Fragestellung dieser Arbeit sind der Zwischenabfluß und der bei Störung der Infiltrationsfähigkeit des Bodens entstehende Oberflächenabfluß. Beide Abflußarten bewirken Bodenerosion und durch das schnellere Ableiten des Niederschlagswassers tragen sie zur Hochwassergefährdung bei (MORGAN, 1999; MATTHEß und UBELL, 1983).

2.2 Oberflächenabfluß und Wassererosion

Die Infiltrationsvorgänge im Boden werden in erster Linie durch Niederschlag, Größe und Kontinuität der Poren sowie den hydraulischen Gradienten beeinflusst. Je geringer die Wasserleitfähigkeit und die treibenden Potentialunterschiede im Boden sind, desto größer ist die Gefahr, daß die Niederschlagsmengen die Infiltration im Boden übersteigen und es zum horizontalen Oberflächenabfluß kommt (ROTH, 1998). Das Oberflächenwasser bewirkt Wassererosion, wächst mit zunehmender Hangneigung und verminderter Regenverdaulichkeit des Bodens und erreicht die Vorfluter schneller als infiltrierte Wasser (MÜCKENHAUSEN, 1993; FLÜGEL, 1979).

Neben diesen drei Größen gibt es aus ackerbaulicher Sicht weitere Faktoren, die die Infiltration und den Oberflächenabfluß beeinflussen. Die Vegetationsdecke eines Ackerbodens übernimmt eine schützende Funktion, vor allem in den Wintermonaten, wenn die Transpirationsraten gering sind. Eine dichte Vegetation schützt die Bodenoberfläche vor aggregatzerstörenden Regentropfen (Splasheffekt) und dadurch vor Verschlammung. Durch diese Verschlammung und die folglich entstandene Verstopfung der Poren wird die Infiltrationsfähigkeit eines Bodens reduziert (ELLISON 1952; RODDA, 1976; MORGAN, 1999). Entsteht aufgrund mangelnder Infiltration ein Wasserfilm auf der Bodenoberfläche, so werden die Aggregate durch Wasseraufnahme instabiler und anfälliger gegenüber folgenden Regentropfen (POESEN, 1981; AUERSWALD, 1993). Nicht infiltrierte Oberflächenwasser löst Wassererosion aus.

Indirekt kann die Infiltrationsfähigkeit eines Bodens durch eine Bodenbedeckung mit Pflanzen oder mit Pflanzenresten positiv beeinflusst werden (MANNERING und MEYER, 1963; FRANKEN und WOLFGARTEN, 1991). MOORE (1981) weist darauf hin, daß die infiltrierte Niederschlagsmenge bei einem ungeschützten Boden bis zu 30 % geringer sein kann als unter einer geschlossenen Pflanzendecke. Die Aufprallenergie der Regentropfen wird von der Pflanzenmasse reduziert und das Wasser kann gebremst auf die Bodenoberfläche fallen. Dadurch kann das Wasser bei einem intakten Porensystem dann ungehindert in den Boden infiltrieren (WOLFGARTEN, 1989). Neben der direkten schützenden Wirkung gegen Regentropfen bildet die Mulchschicht auch eine Abflußbarriere, die die Abflußgeschwindigkeit reduzieren kann (LATTANZI, et. al. 1974).

Die erosive Wirkung des Oberflächenwassers auf Ackerböden kann durch unterschiedliche Maßnahmen reduziert oder sogar verhindert werden, so durch Maßnahmen, die die Aufprallwirkung der Niederschläge mindern, wie z.B. durch eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung (QUIST, 1995; FRIELINGHAUS et al. 1990). Vor allem Zwischenfrüchte spielen dabei eine besondere Rolle. Zwischenfrüchte können die Wasseraufnahme des Bodens steigern, sie verbrauchen Wasser, bedecken den Boden zwischen den Anbauzeiten der

Hauptfrüchte und wirken in abgestorbenem Zustand als Mulchschicht (GRÖBLINGHOF und ENTRUP, 1994; WÜRFEL, 1999).

Vor allem in den vegetationslosen Herbst- und Wintermonaten kann eine aus Pflanzenresten bestehende Mulchschicht eine Schutzfunktion für den Boden übernehmen. Konservierende Bodenbearbeitungssysteme integrieren Ernterückstände der Hauptfrüchte und setzen den Anbau von Zwischenfrüchten voraus (SOMMER et. al. 1995, SOMMER, 1999). Bei DICKEY et. al. (1984) fallen unter den Begriff „Konservierende Bodenbearbeitung“ alle Verfahren, bei denen nach der Saat der Folgefrucht mindestens 20 % des Bodens mit Pflanzenresten der Vorfrucht oder Zwischenfrucht bedeckt sind.

Neben dem Anbau von Zwischenfrüchten können weitere ackerbauliche Maßnahmen das Entstehen von Oberflächenwasser und Erosion verhindern, z. B. die Schaffung stabiler Bodenstrukturen durch organische Düngung, Fruchtfolgegestaltung und Vermeidung von Bodenverdichtungen (SOMMER, 1999). Zusätzlich können flurgliedernde Maßnahmen wie Streifenanbau und Hangunterteilung zur Verlangsamung und Ableitung von Oberflächenwasser führen (SCHWERTMANN, 1982).

2.3 Zwischenabfluß und Wassererosion

Neben dem ersichtlichen schädlichen Oberflächenabfluß, der neben der erosiven Wirkung auch zu einem schnelleren Abfluß des Niederschlagswassers führt, gibt es unterirdische Abflußkomponenten. Der unterirdische Zwischenabfluß erhöht ebenfalls die Erodierbarkeit und kann, bei Störungen im Bodenprofil, zum schnellen Abfließen des Niederschlagswassers beitragen (BOTSCHEK, 1999). Da dieser Zwischenfluß nicht unmittelbar sichtbar und schwer zu erfassen ist, wird er häufig als Einflußgröße nicht erwähnt (MORGAN, 1999).

Ein Zwischenabfluß entsteht, wenn der senkrechte Wassertransport bei Hangneigung gestört wird, vor allem bei natürlichen Schichtungen oder anthropogen bedingten Infiltrationsstörungen, die bei Hangneigung eine laterale Fließrichtung entstehen lassen (WOHLRAB, et. al., 1992). Ein lateraler Abfluß unter der Oberfläche entsteht nach MERZ (1996), wenn das in die Bodenmatrix infiltrierende Wasser auf Bodenschichtungen mit einer geringeren Durchlässigkeit stößt und unter gesättigten Bedingungen horizontal abfließen muß. Von besonderer Bedeutung ist hier die Wassersättigung des Bodens als wichtige Voraussetzung für einen Zwischenabfluß. Wird der Zustand der Wassersättigung oberhalb einer Stauschicht erreicht und die hydraulische Leitfähigkeit reduziert, so kommt es zum Zwischenabfluß (RICHARDS et. al., 1984), der nach FLURY et al. (1994) und MOSLEY (1979) hohe Durchflußraten erreichen kann. Der Zwischenabfluß kann erodierend wirken. Er kann aufgrund von Boden-

schichtungen oder Übersättigung des Bodens hangabwärts wieder austreten und ablaufen. Dadurch werden der Oberflächenabfluß verstärkt und die Erosivität erhöht (BOTSCHHECK, 1999). Aber auch unterirdisch kann es nach BARSCH und WIMMER (1998) und BOTSCHHECK (1999) zu Sedimenttransport kommen, bei stärkeren Auswaschungen auch zur Hohlraumbildung im Boden. Neben der erosiven Wirkung ist der Zwischenabfluß als Teil des Direktabflusses an der Entstehung von Hochwasser in starkem Maße beteiligt (MATTHEß und UBELL, 1983) und von gleicher Bedeutung für die Hochwasserganglinie wie der Oberflächen- und Basisabfluß.

An die Stelle der bisher verwendeten Begriffe „Zwischenfluß“ und „Zwischenabfluß“ tritt nun im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Begriff **Zwischenschichtabfluß**. Mit dem Begriff Zwischenschichtabfluß ist der unterirdische Abfluß gemeint, der dann entsteht, wenn zunächst infiltrierendes Wasser auf eine anthropogen verursachte Unterbodenverdichtung stößt und der vertikale Weitertransport verhindert wird. Diese Unterbodenverdichtung kann als Krumbasisverdichtung vorliegen und je nach Tiefe der wendenden Bodenbearbeitung im Bereich von 25-35 cm liegen. Die Unterbodenverdichtung wirkt als Stauschicht und verändert das Wasserpotential in der Oberkrume. In Hangflächen kommt es dann zwangsläufig zu einem hangabwärts gerichteten lateralen Abfluß.

2.4 Bodenverdichtungen

Die Entstehung von Bodenverdichtungen ist ein komplexer Vorgang, bei dem das Bodengefüge, je nach Belastungsart und Zustand des Bodens vor der Belastung, sein Volumen oder seine Form ändert. Diese Gefügeänderung äußert sich in einer Funktionsstörung des Porensystems, die durch erhöhte Dichtelagerung bzw. Abnahme des Gesamtporenvolumens oder Verschiebung der Porenverhältnisse entsteht (SOMMER et al. 2001).

Aus der eigenen Gewichtskraft des Bodens resultiert eine Normalverdichtung (KTBL, 1998). Je nach Nutzungsrichtung kann eine Abweichung von der Normalverdichtung durchaus eine positive Wirkung haben. So kann eine Überverdichtung ertragssteigernd wirken und die Standortqualität aus landwirtschaftlicher Sicht nicht einschränken (WIERMANN, 1998). Dies ist z. B. bei der Rückverfestigung des Saatbettes der Fall. Deshalb wird, statt des wertneutralen Begriffes „Bodenverdichtung“, der Begriff „**Bodenschadverdichtung**“ verwendet (DUMBECK, 1986; HARRACH und VORDERBRÜGGE, 1991; SOMMER et al. 2001). Als Bodenschadverdichtung wird eine Gefügeveränderung mit negativen Auswirkungen auf die Produktions-, Regelungs- und Lebensraumfunktionen des Bodens bezeichnet (SOMMER, 1998; DÜRR et al. 1995). Die Schadwirkung ergibt sich aus der Reduzierung der Porengröße

und deren Kontinuität, woraus eine gestörte Wasserleitfähigkeit, ein verringertes Infiltrationsvermögen und eine verminderte Luftkapazität und Luftdurchlässigkeit resultieren (SOMMER et al. 2001).

Bodenschadverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen werden durch die mechanische Belastung bei Bodenbearbeitung, Pflege- und Erntearbeiten verursacht (DÜRR, et al. 1955). Der Boden reagiert auf solche Belastung unterschiedlich, je nach bodenphysikalischen, endogenen Kennwerten oder bodenexogenen Faktoren. So bestimmen Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Bodenstruktur, Aggregat- und Aggregierungszustand, Wassergehalt und Gehalt an organische Substanz die Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Bodenbelastungen (HORN, 1984). Als bodenexogene Faktoren wirken maschinenspezifische Einflußgrößen wie Radlast, Reifeninnendruck, Kontaktfläche, Kontaktflächendruck und Reifenart (SEMMELE und HORN, 1995). Diese Faktoren stehen in engem Zusammenhang bei der Entstehung von Bodenschadverdichtungen, so daß bodenexogene Belastungen Veränderungen der bodenphysikalischen Kennwerte des Bodens hervorrufen können. Eine Veränderung (Bodenreaktion) tritt dann ein, wenn die Tragfähigkeit des Bodens der mechanischen Belastung nicht mehr standhält. Es entstehen eine Gefügezerstörung, eine Veränderung der Lagerungsdichte oder eine Verringerung des Porenvolumens bzw. eine Verschiebung des Porenverhältnisses (KÜHNER, 1998).

Vor allem die bodenendogenen Faktoren stehen in enger Beziehung zum Wassergehalt, der einen sehr starken Einfluß auf die Verformbarkeit des Bodens ausübt (KÜHNER, 1998). So wird durch die Befahrung eines Bodens bei hoher Bodenfeuchte hoher Druck in den mit Wasser gefüllten Bodenporen aufgebaut, der eine Verformung des Bodens bewirkt. Die Luftporen werden verschlossen und die Infiltration wird gestört (SEMMELE und HORN, 1995).

Nach SEMMELE und HORN (1995) sind es jedoch die bodenexogenen Faktoren, die die Belastung der Böden einschränken und Bodenverdichtungen verursachen. In dieser Arbeit sind vor allem die Bodenschadverdichtungen von Interesse, die durch die Bodenbearbeitung hervorgerufen werden und negative Auswirkungen auf das Infiltrationsverhalten des Bodens haben. In dieser Hinsicht spielt auch die Tiefenlage der Schadverdichtung eine besondere Rolle. Aufgrund mechanischer Belastungen können Krümenverdichtungen im Boden entstehen. Als Krüme wird der Oberboden als Bearbeitungshorizont verstanden. Handelt es sich um Schadverdichtungen, die aufgrund dynamischer Belastungen bei der Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug entstanden sind, so werden diese als „**Krümenbasisverdichtungen**“ bezeichnet (PETELKAU, 1998; CRAMER, 2002). Bei der Grundbodenbearbeitung können durch das Fahren des Traktors in der Pflugfurche bei ungünstiger Bodenfeuchte und durch die Schlupfwirkung solche Krümenbasisverdichtungen entstehen (DÜRR et al. 1995). Schlupf verursacht eine seitliche Teilchenverschiebung, die zusätzlich

zur Erhöhung der Lagerungsdichte auch eine Zerstörung des Porensystemes im Boden bewirkt. Im Kontaktbereich Rad-Boden werden Schäden am Gefüge verursacht und die Makroporen durch Aggregatzerstörung verschlossen (DÜRR et al., 1995; SEMMEL und HORN, 1995; PETELKAU, 1998).

SOMMER (1985) macht vor allem die wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug für die Entstehung und die Verbreitung von Bodenverdichtung verantwortlich. Dazu kommt, daß durch die höheren Bodenbelastungen und intensiveren Eingriffe in den Boden die Bearbeitungsgrenze und somit auch die Pflugsohle im Laufe der Jahre nach unten verlagert wurde (SOMMER, 1987). Mit der Vertiefung der Bearbeitungsgrenze gingen auch eine Erhöhung der Lagerungsdichte und eine Verminderung des Porenvolumens einher.

Nach DEXTER (1986) weisen in den ostdeutschen Bundesländern ca. 40 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen Krumbasisverdichtungen auf. DÜRR (1995) und SOMMER (1998) deuten auf die immer größere Verbreitung von Krumbasisverdichtungen in den alten Bundesländer hin.

Die Auswirkungen von Krumbasisverdichtungen hinsichtlich der verminderten Wasserinfiltration sind hier bereits beschrieben worden. DÜRR et al. (1995) bezeichnen die fahrwerksbedingte Gefügeschädigung als die Hauptursache für die Wassererosion. Schon MATTHY (1940) hat eine ungünstige Wasserverteilung auf krumbasisverdichteten Böden festgestellt. Vor allem bei Starkniederschlägen kommt es zu einer Stauung über der Pflugsohle. Das zunächst infiltrierende Wasser fließt ober- und unterirdisch horizontal ab und wirkt erosiv.

2.5 Erfassung von Bodenverdichtungen durch Eindringwiderstandsmessungen

Je nach Fragestellung können verschiedene bodenphysikalische Kennwerte zur Beschreibung von Bodenverdichtungen herangezogen werden. Abhängig von der zu erfassenden Größe stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung.

So werden vor allem Verfahren eingesetzt, die Lagerungsdichte, Porenvolumen, Stabilitätszustand, Infiltrationsfähigkeit, Bewurzelung und Bodenfestigkeit als wichtige Maßeinheiten zur Beurteilung von Bodenverdichtungen erfassen. Zu den Verfahren gehören Stechzylinderuntersuchungen mit denen u.a. Lagerungsdichte, Porenvolumen, Porenverteilung, Feldkapazität, Wasser- und Luftgehalt sowie Wasser- und Luftdurchlässigkeit bestimmt werden können. Bei der Untersuchung der Porenraumgliederung werden auch mikromorphologische Gefügeuntersuchungen mittels Dünn- und Anschlifftechnik, Mikroskopie, Röntgenanalytik und Computertomographie eingesetzt. Für den Stabilitätszustand kann über Drucksetzungs-

kurven die Belastungsfähigkeit eines Bodens festgestellt werden. Aber auch Aggregatstabilitätsmessungen geben wichtige Informationen über die Verdichtungs- und Verschlammungsanfälligkeit der Böden (EHLERS et al. 1983; DISERENS, 1994; DÜRR et al. 1995; HARTGE und HORN, 1999; SOMMER, 2001).

Penetrometer haben große Verbreitung gefunden (SOMMER, 2002). Mit einem Penetrometer wird die Bodenfestigkeit gemessen, indem eine Sonde in den Boden eingedrückt und der Eindringwiderstand erfaßt wird. Die Sonden eines Penetrometers sind mit unterschiedlich dimensionierten konischen Spitzen ausgestattet, die je nach Bodenart und zu erwartendem Widerstand ausgetauscht werden können. Penetrometer finden Verwendung bei der Beurteilung der Durchwurzelbarkeit, der Bewertung von Bodenbearbeitungsmaßnahmen und der Erfassung von Bodenverdichtungen (MURER et al. 1991).

KRAHMER (1997) definiert den Eindringwiderstand als den Widerstand, den der Boden einem gleichmäßig einzudrückenden Konus entgegensetzt. Heute eingesetzte Geräte messen den Eindringwiderstand elektronisch, der als Tiefenfunktion in MPa dargestellt wird.

Vorgänger moderner Penetrometer waren Rammsonden, bei denen die Sonde durch eine aus bestimmter Höhe fallende Masse in den Boden getrieben wurde (SCHULZ, 1991).

SCHULZ (1991) teilt den Eindringwiderstand in die Haftreibung der Sonde mit dem Boden und in die eigentliche Komprimierbarkeit eines Bodens ein. Die Haftreibung verfälscht die Werte des Eindringwiderstandes; deshalb werden heute nur haftreibungsfreie Penetrometer eingesetzt. Die Haftreibung wird vermindert durch den Einsatz eines Sondierkonus mit größerem Durchmesser als der der Sondierstange. Neben dieser meßtechnischen Einflußgröße wird der Eindringwiderstand vor allem von anderen bodenphysikalischen Kennwerten beeinflusst. So haben Lagerungsdichte, Wassergehalt des Bodens, Porengrößenverteilung, organische Substanz und Vorbelastung einen Einfluß auf diese Größe (HORN, 1984). DURR et al.(1995); BORCHERT und GRAF (1987) BECHER (1978) und HORN (1984) bezeichnen als wesentliche Einflußgrößen vor allem den Bodenwassergehalt und die Lagerungsdichte.

Um vergleichbare Meßergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, die Messungen bei möglichst gleichbleibendem Wassergehalt des Bodens durchzuführen. So sollte der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Penetrometermessungen bei 80 – 100 % FK liegen (BORCHERT und GRAF, 1987; KRAHMER, 1997). Wassergehalte über 100 % sollten vermieden werden.

Eine erhöhte Lagerungsdichte führt zu höheren Eindringwiderstandswerten. Die größere Anzahl an Bodenteilchen in einem begrenzten Raum führt zu einer schwereren Verdrängung der Bodenpartikel durch die Sondenspitze. KRAHMER (1997) stellt, wie bei der Bodenfeuchte, eine enge Korrelation zwischen Eindringwiderstand und Lagerungsdichte fest. DUMBECK

(1986) weist darauf hin, daß der Eindringwiderstand bei verschiedenen Böden die Lagerungsdichte nicht zufriedenstellend wiedergibt. Das liegt in der Komplexität der Wechselbeziehungen zwischen Bodenwassergehalt, Eindringwiderstand und Lagerungsdichte. Um so wichtiger wird es, daß man bei den Messungen die Bodenfeuchte zur Beurteilung des Eindringwiderstandes mit einbezieht und möglichst viele Störfaktoren wie Haftreibung und schlechte Handhabung ausschließt (FRIEDRICH et al. 2002).

Die Interpretierbarkeit von Eindringwiderstandsmessungen wurde in der Literatur häufig diskutiert. So werden diese Werte u.a. zur Beurteilung von Durchwurzelbarkeit und Wasserinfiltration herangezogen. Penetrometermessungen sind aufgrund der schnellen und einfachen Handhabung eine geeignete Methode zur Erfassung von Bodenverdichtungen und damit auch zur indirekten Beurteilung dieser Merkmale.

2.6 Arbeitshypothesen

Zwischenabfluß als Komponente des hochwasserwirksamen Gesamtabflusses wurde bereits von mehreren Autoren beschrieben. Die Komponente **Zwischenschichtabfluß** als der Anteil des Niederschlagswassers, der auf einer anthropogen bedingten Krumbasisverdichtung (Pflugsohle) horizontal hangabwärts fließt, ist aus ackerbaulicher Sicht bisher noch nicht gebührend berücksichtigt worden.

Mit der quantitativen Erfassung des Zwischenschichtabflusses ist auch die Frage verbunden, welche Maßnahmen können zu einer Verminderung oder Vermeidung des Zwischenschichtabflusses beitragen. Vom großen Interesse sind demnach auch die Verbreitung von Pflugsohlenverdichtungen und Möglichkeiten ihrer Erfassung. Somit ergeben sich für diese Arbeit folgende Arbeitshypothesen:

Die Infiltration des Niederschlagswassers wird durch eine Krumbasisverdichtung (Pflugsohle) gestört. Das Wasser wird über der Verdichtung gestaut und fördert somit auch den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß.

- I. Die mechanische Lockerung von Krumbasisverdichtungen fördert die Infiltration des Niederschlagswassers, verringert die Gefahr von Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß, und verzögert so den Zufluß in den Vorfluter.
- II. Der Anbau von Zwischenfrüchten vermindert durch den Schutz des Bodens und durch die Bildung einer Mulchschicht mit Pflanzenresten die Gefahr des horizontalen Wasserabflusses und verzögert damit den Abfluß in den Vorfluter.

III. Als eine Folge der wendenden Bodenbearbeitung sind Krumenbasisverdichtungen weit verbreitet, sie fördern den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß. Mit Hilfe von Penetrometermessungen kann, bei Einhaltung meßtechnischer Vorgaben, die Verbreitung von Bodenverdichtungen schnell und sicher erfaßt werden.

IV. Hinsichtlich der Verbreitung von Bodenverdichtungen auf Ackerstandorten und der Vermeidungsstrategien sowie darüber hinaus über das geltende Bundesbodenschutzgesetz besteht Informations- und Beratungsbedarf.

3. Material und Methoden

3.1 Freilandversuche zur Messung des Zwischenschichtabflusses

3.1.1 Standorte

Zur Messung des Zwischenschichtabflusses im ersten Versuchszeitraum 1999-2000 wurden Freilandversuche auf fünf Standorten mit Hanglage in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Drei Versuchspartzen lagen auf Flächen landwirtschaftlicher Praxisbetriebe in Wülfrath-Flandersbach (Am Hof), Vinxel (Vinxel) und Meindorf (Am Wasserwerk), zwei Versuchsfächen auf den Versuchsgütern der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn: Frankenforst bei Vinxel (Schlag 1) und Dikopshof bei Sechtem (Schlag 8). Im zweiten Versuchszeitraum 2000-2001 wurden die Untersuchungen auf den Standorten Wülfrath-Flandersbach (Am Hof) und Frankenforst (Schlag 6-8) wiederholt.

Bei der Auswahl der Versuchsstandorte wurden die bisherige Bodenbearbeitung, Hangneigung, Pflugsohlenverdichtung und Verdichtungsanfälligkeit der jeweiligen Böden berücksichtigt. So kamen gepflügte Flächen in Frage, die eine Hangneigung von möglichst >10 % und Pflugsohlenverdichtungen aufwiesen. Die Bodenarten der Versuchsstandorte sollten zur Gruppe der Schluffe und Lehme gehören. Bei der Anlage der Versuchsfächen wurden pedologisch einheitliche Hangabschnitte auf jedem Standort ausgewählt.

Die Stärke der vorhandenen Bodenverdichtung wurde vorab mit einem Penetrometer geprüft. Für die weitere Standortcharakterisierung wurden dann entsprechende Bodenprofile auf den Versuchsstandorten angesprochen und diese mit den Bodenkarten des GEOLOGISCHEN LANDESAMTES NORDRHEIN-WESTFALEN (1997) verglichen. Die Bodenart mit Untergruppe wurde nach der AG BODEN, K4 (1996) und anhand des Bodenartendreieckes nach KUNTZE et al. (1994) bestimmt (Tab. 1 und Tab. 2).

3.1.2 Witterungsverlauf

Die täglichen Witterungsdaten für die Standorte Frankenforst und Vinxel wurden am Versuchsgut Frankenforst erfaßt. Auf dem Standort Dikopshof wurden Niederschlag und Temperatur in der dortigen Wetterstation aufgezeichnet. Für die Versuchsfäche Meindorf wurden die Niederschlagsdaten am Standort selbst und zusätzlich in Bonn-Poppelsdorf erfaßt und für die Versuchsfäche Wülfrath ebenfalls am Standort. Zur Kontrolle wurden die Daten mit den Aufzeichnungen des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (1999-2001) verglichen.

Die aufgezeichneten Niederschlagsdaten sind für alle Standorte in den Abbildungen 8 bis 13 im Kapitel 4 dargestellt.

Tab. 1: Standorteigenschaften der Versuchsflächen

Standort	Bodenart Untergruppe	Bodentyp	Hangneigung (%)	Fruchtart
Wülfrath	Tonschluff (tu) Ut4	Braunerde aus Fließerde	13	WG (99-00)
				WR (00-01)
Vinxel	Tonschluff (tu) Ut4	Parabraunerde aus Löß	10	WG
Meindorf	Normallehm (ll) Ls4	Parabraunerde, teilw. pseudovergleyt	10	WG
Frankenforst (Schlag 1)	Tonschluff (tu) Lu	Braunerde	8-10	WG
Frankenforst (Schlag 8)	Tonschluff (tu) Lu	Parabraunerde	12	WG
Dikopshof	Sandlehm (sl) Slu	Parabraunerde aus umgelagertem Löß über Kies	10	WG

3.1.3 Versuchsanlage und –durchführung

Standorte Frankenforst, Vinxel und Wülfrath

Im ersten Versuchszeitraum 1999-2000 wurden alle Versuche, mit Ausnahme des Standortes Vinxel, nach einer Winterweizen-Vorfrucht mit Wintergerste bestellt. In Vinxel wurden nach der Ernte der Wintergerste das Stroh abgefahren und Gelbsenf (*Sinapsis alba*) als Zwischenfrucht angebaut. Die nachfolgenden Zuckerrüben sollten im Mulchsaatverfahren gesät werden.

Im Versuchszeitraum 2000-2001 wurden in Wülfrath nach Wintergerste und Stroheinarbeitung Winterraps, auf dem Versuchsgut Frankenforst nach Winterweizen und Strohabfuhr Wintergerste angebaut.

Die Versuche wurden als einfaktorielle Blockanlagen mit vier Wiederholungen angelegt (Abb. 1). Auf den Versuchsflächen Frankenforst und Wülfrath wurde der Einfluß der „Lockerung“ geprüft, auf der Versuchsfläche Vinxel der Einfluß der „Zwischenfrucht“.

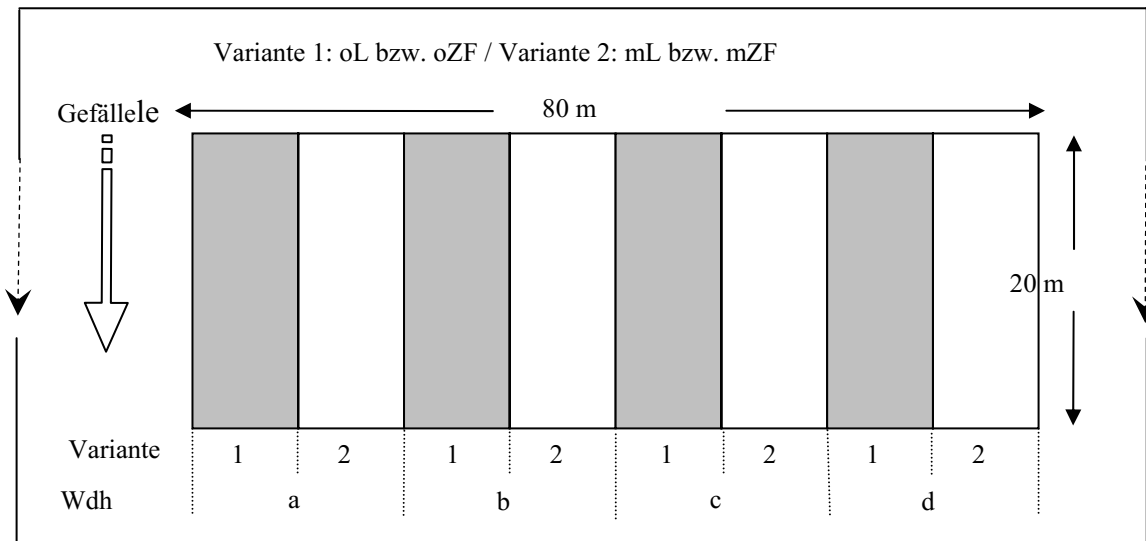


Abb. 1: Versuchsanlage auf den Standorten Frankenforst, Vinxel und Wülfrath

Vor der Saat wurde die Bodenbearbeitung nach den jeweiligen Versuchsplänen (Abb.1) vorgenommen. So wurde in Frankenforst und Wülfrath die Versuchsvariante 1 mit einem Tiefenmeißel auf 60 cm Tiefe gelockert; die Variante 2 blieb ungelockert. Auf dem Standort Wülfrath wurden die Messungen in beiden Versuchsperioden auf derselben Fläche durchgeführt. Um die nachhaltige Wirkung von Lockerungsmaßnahmen zu prüfen, wurden diese hier nur im ersten Untersuchungsjahr durchgeführt.

Auf dem Standort Vinxel wurde, um den Einfluß der Zwischenfrucht zu untersuchen, der bereits über alle Versuchspartellen flächig gesäte Gelbsenf in den entsprechenden Varianten mit einem Totalherbizid (Wirkstoff Glyphosat) behandelt. Die Variante 1 entsprach hier den Versuchspartellen „ohne Zwischenfrucht“ und die Variante 2 „mit Zwischenfrucht“.

In Frankenforst lagen Fahrgassen zwischen den einzelnen Versuchspartellen. So waren sie hier nicht unmittelbar nebeneinander angeordnet, sondern durch einen Bereich mit Fahrgassen getrennt. Da auf dem Standort Vinxel Gelbsenf angebaut worden war, waren dort keine Fahrgassen vorhanden. Auf dem Standort Wülfrath wurde der Versuch quer zu den Fahrgassen gelegt, so daß die Versuchsfläche hier lediglich 80 m x 15 m betrug.

Innerhalb der Versuchspartellen wurden auf allen Standorten Meßeinrichtungen entsprechend Abbildung 2 angelegt. Zur Abgrenzung der Meßbereiche wurden die seitlichen Ränder (Abb. 2) durch achtmaliges Befahren randverdichtet. Die oberen und unteren Ränder der Meßbereiche wurden mit einer Rüttelplatte randverdichtet.

Diese Randverdichtung sollte verhindern, daß bereits infiltriertes Niederschlagswasser aus der Meßparzelle ab- bzw. in diese einfließen und dadurch die Messung beeinflusste konnte. Bei Versuchsende wurde das Porenvolumen an Stechzylinderproben nach NITZSCH (1938) untersucht.

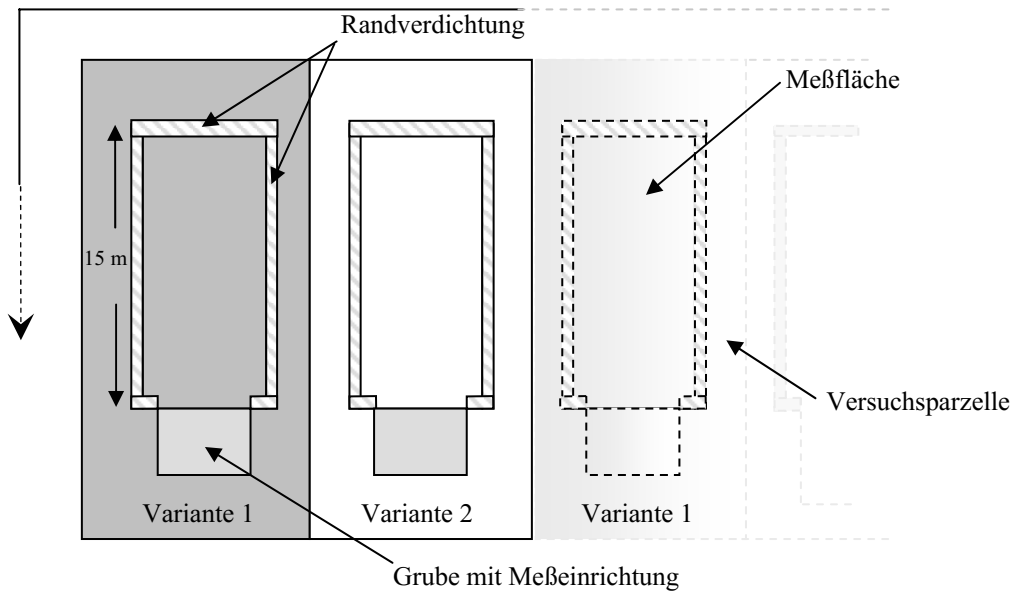


Abb. 2: Schematische Darstellung der Meßflächen innerhalb der Parzellen mit Randverdichtung und Grube für die Meßeinrichtungen

Standorte Dikopshof und Meindorf

Auf dem Versuchsgut Dikopshof wurde der Einfluß der „Lockerung“ in einer einfaktoriellen Blockanlage geprüft. Betriebsbedingt wurde hier die Parzellenbreite bzw. die Meßfläche variiert. Die Arbeitsbreite der eingesetzten Maschinen betrug 3 m. So entsprach die Breite der Meßfläche der Parzellenbreite. Die Parzellenlänge betrug 15 m. Die Meßvorrichtungen wurden entsprechend angepaßt. Der Versuch auf dem Dikopshof mußte wegen eines Bauvorhabens (Pipeline) aufgegeben werden.

Auf der Versuchsanlage in Meindorf wurden 4 Meßflächen „ohne Varianten“ mit entsprechenden Meßvorrichtungen eingerichtet. Hier sollte der Abfluß auf einer gepflügten Fläche erfaßt werden. Wegen fehlender Niederschläge und starker Inhomogenität des Bodens, die erst nach Anlage des Versuches festgestellt wurde, konnte kein Abfluß gemessen werden. Die Versuchsfläche wurde daher nach dem ersten Versuchszeitraum nicht mehr berücksichtigt.

3.1.4 Bodenphysikalische Untersuchungen

Die Bodenarten der Versuchsflächen bis 50 cm Profiltiefe wurden nach der AG BODEN, K4 (1996) und anhand des Bodendreieckes nach KUNTZE et al. (1994) bestimmt (Tab. 1 und 2). An jedem Standort wurden zur weiteren Standortcharakterisierung Stechzylinderuntersuchungen in den gelockerten Flächen bzw. in den Parzellen „ohne Zwischenfrucht“ durchgeführt. Es wurden folgende Bereiche beprobt: die Oberkrume (OK), der Bereich der Pflugsohlenverdichtung (PS) und der Unterboden (UB), um den Einfluß der ackerbaulichen Maßnahmen auf die Lagerungsdichte, das Porenvolumen und die Porenverteilung zu prüfen. Für die Bestimmung der Lagerungsdichte, der Porenverteilung und des Porenvolumens wurden die Werte von jeweils 8 Stechzylindern pro Tiefe und Wiederholung gemittelt und statistisch ausgewertet.

Zur Beurteilung des Standortes und zur Kontrolle der durchgeführten Lockerungsmaßnahmen bzw. der Wirkung der Zwischenfrucht wurde bei Versuchsbeginn und –ende der Eindringwiderstand mit einem Penetrologger gemessen. Das eingesetzte Gerät wird in Kapitel 3.3 ausführlich beschrieben.

Tab. 2: Korngrößenverteilung in 0-50 cm Tiefe

Standort	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	Skelettanteil
Wülfrath	1,51	0,89	2,30	47,66	22,61	5,25	18,77	1,01
Vinxel	0,64	1,79	5,71	43,90	21,15	4,98	21,76	0,06
Meindorf	2,83	35,85	9,52	11,88	11,91	6,35	20,41	1,37
Frankenforst (Schlag 1)	0,93	1,52	15,42	31,34	23,50	6,28	20,71	0,34
Frankenforst (Schlag 8)	1,23	1,77	11,94	37,74	16,61	7,72	22,47	0,52
Dikopshof	2,78	28,17	7,28	30,75	11,41	3,84	12,39	3,37

3.1.5 Direkte Abflußmessungen

Wie in Abbildung 2 dargestellt, befand sich am unteren Ende der Meßparzellen eine Grube mit den Vorrichtungen zur Messung des Wasserabflusses. Von besonderer Bedeutung war die getrennte Erfassung des Oberflächenabflusses sowie des Zwischenschichtabflusses. Hierfür wurden verzinkte Leitbleche mit einer Breite von 75 cm und 15 cm Tiefe im Bodenprofil installiert, die Oberflächenwasser und Zwischenschichtabfluß trennten und einem Auffangsystem zuleiteten. Das obere Leitblech für das Oberflächenwasser wurde in etwa 6 bis 8 cm

Tiefe plaziert. Je nach Tiefenlage der Pflugsohlenverdichtung wurde das zweite Leitblech für den Zwischenschichtabfluß zwischen 25 und 35 cm Tiefe eingesetzt.

Das abfließende Wasser wurde über Abflußrinnen in Auffangbehälter weitergeleitet (Abb. 3). Die Meßgruben wurden zum Schutz der Meßvorrichtung überdacht.

Die Abflußmessungen erfolgten wöchentlich. Nach stärkeren Niederschlägen wurde zusätzlich gemessen, um ein Überlaufen der Meßgefäße zu verhindern. Die Daten wurden kumuliert erfaßt und datiert.

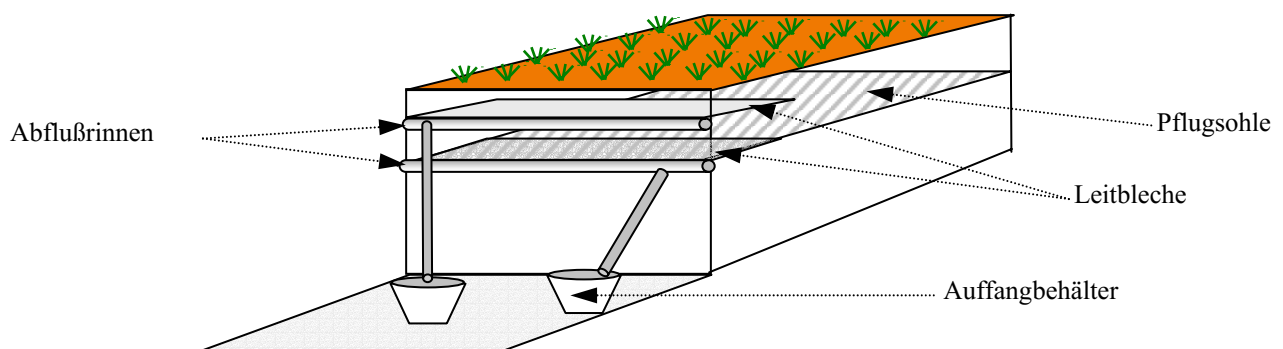


Abb. 3: Schematische Darstellung der Meßeinrichtungen (verändert nach Beining, 2001)

3.2 Modellversuch zur Messung des Zwischenschichtabflusses

Ergänzend zu den Freilandversuchen wurde auf dem Versuchsgelände „Poppelsdorf“ der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn ein Modellversuch durchgeführt. Im Modell sollte ein hängiger Ackerstandort mit einer Pflugsohle simuliert werden. Dazu wurden mit Ackerboden gefüllte Metallkästen eingesetzt (Abb. 4), in denen analog zu den Freilandversuchen, die Einflüsse von Lockerungsmaßnahmen und Zwischenfrüchten auf den Zwischenschichtabfluß untersucht werden sollten. Darüber hinaus wurden auch der Oberflächenabfluß und das Sickerwasser erfaßt.

Der Versuch wurde im Winterhalbjahr 1999-2000 angelegt. Im Versuchsjahr 2000-2001 wurde der Modellversuch wiederholt und durch eine Beregnungsanlage zur Durchführung von Versuchen unter kontrollierten Niederschlagsbedingungen ergänzt.

3.2.1 Versuchsanlage und -durchführung

3.2.1.1 Aufbau und Befüllung der Modellkästen

Der Modellversuch wurde in 12 (1999-2000) bzw. 16 (2000-2001) **Metallkästen** (Abb. 4) aus verzinktem Stahlblech durchgeführt. Die Kästen waren 2 m lang, 50 cm breit und 30 cm tief, mit einem Gesamtvolumen von 0,3 m³. Die Grundfläche betrug 1 m² (KEHL, 1997; REINTJES, 1989; HERTLE, 1989). Im Kastenboden waren in der Mitte und am vorderen Ende zwei Abflußlöcher (Ø 2 cm) für das Sickerwasser eingelassen. Eine Frontwand wurde mit einem regulierbaren Schieber versehen, der eine getrennte Erfassung des ablaufenden Zwischenschichtabflusses wie auch des Oberflächenwassers ermöglichte. An der Ausflußstelle für den Zwischenschichtabfluß wurde der Schieber so angepaßt, daß das Wasser langsam durch einen 1 cm Schlitz über ein Leitblech in PVC-Rohre fließen konnte. Das Oberflächen- und das Sickerwasser wurden ebenfalls über PVC-Rohre in die entsprechenden Auffangbehälter geführt.

Die hinteren Stützen der Kästen wurden so erhöht, daß eine Neigung von ca. 8,0 % in Richtung der Abflußstelle entstand.

Der **Boden** für den Modellversuch 1999-2000 stammte von einem ehemaligen Gemüsebaustandort in Alfter-Oedekoven bei Bonn. Zur Charakterisierung des Bodens wurde ein Bodenprofil des Herkunftstandortes angesprochen.

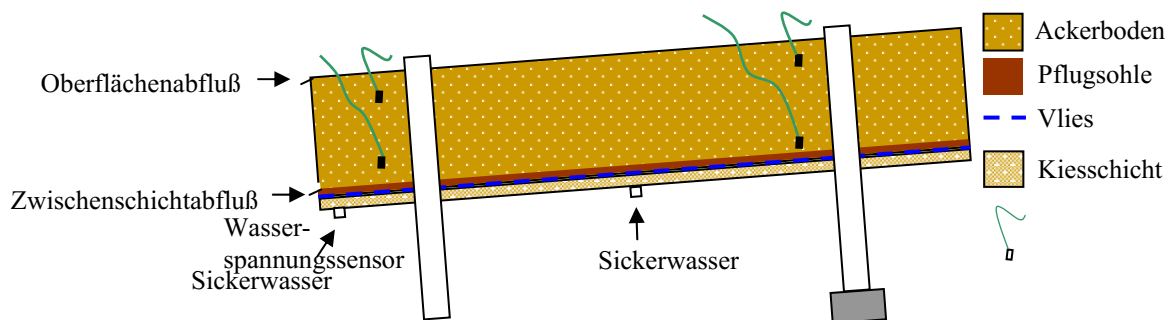
Der Boden für die Versuchsanlage 2000-2001 stammte von einem ehemaligen Ackerstandort in Brühl bei Köln. Da der verwendete Boden der Ackerkrume bereits abgetragen und gelagert war, konnte in diesem Fall keine Profilansprache mehr erfolgen. Die Bodenart mit Untergruppe wurde auch hier mit entsprechender Sieb- und Schlämmanalyse (KÖHN, 1928) nach der Kartieranleitung Nr. 4 (AG BODEN; 1996) bestimmt (Tab. 3 und 4).

Tab. 3: Herkunft, Bodenart und Bodentyp des Modellbodens

Versuchsjahr	Herkunft	Bodenart Untergruppe	Bodentyp
1999-2000	Alfter- Oedekoven	Tonschluff (tu) Lu	Parabraunerde, teilw. pseudovergleyt
2000-2001	Brühl	Tonschluff (tu) Lu	---

Tab. 4: Korngrößenverteilung des Modellbodens

Standort	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	Skelettanteil
Alfter-Oedekoven	5,93	7,90	4,47	32,46	17,24	5,24	19,93	6,90
Brühl	5,74	8,29	5,05	29,86	22,53	4,01	19,15	6,10

**Abb. 4: Aufbau eines gefüllten Modellkastens**

Der lufttrockene Boden wurde über ein Sieb der Maschenweite 10 mm homogenisiert. Vor dem Befüllen der Versuchskästen mit dem Ackerboden wurde als unterste Schicht eine 3 cm dicke Dränschicht mit 2 mm-Kies eingefüllt, um ein freies Abfließen des Sickerwassers zu gewährleisten. Ein darüberliegendes Dränvlies (2 mm) sollte den Kapillarstau zwischen Boden und Kiesschicht verhindern.

Dann wurde die erste Bodenschicht zur Herstellung der Verdichtungssohle schichtweise eingefüllt, angefeuchtet und mit einer Rüttelplatte verdichtet, bis die simulierte Pflugsohlenverdichtung eine Stärke von ca. 3 cm aufwies und ein Eindringwiderstand von 2,5-3,0 MPa erreicht wurde. Anschließend wurden die Kästen weiter mit dem Oberboden befüllt.

Die Bodenkästen sind bereits vor dem Befüllen nach Versuchsplan in Abbildung 5 aufgestellt worden. Zur Kontrolle der Bodenfeuchte wurden auf der Pflugsohle sowie auch nahe der Bodenoberfläche Wasserspannungssensoren eingebaut: Zwei Sensoren im tieferen, vorderen Bereich des Versuchskastens und zwei im höheren, hinteren Bereich. Damit sollten eventuelle Abweichungen der Bodenfeuchteverhältnisse zwischen beiden Bereichen, die durch Wasseranstauung verursacht werden könnten, erfaßt werden.

3.2.1.2 Versuchsanlage und Regensimulator

Im ersten Versuch (1999-2000) wurde der Modellversuch als zweifaktorielle Blockanlage mit vier Varianten und drei Wiederholungen (12 Versuchskästen) angelegt. Im zweiten Versuchsjahr (2000-2001) wurde die Anlage durch eine vierte Wiederholung ergänzt und entsprechend Abbildung 5 als Lateinisches Quadrat (16 Kästen) aufgestellt. Einflußfaktoren waren in beiden Versuchsjahren „mechanische Lockerung“ und „Zwischenfrucht“. Dafür wurden die bereits mit Boden befüllten und mit einer Verdichtungssohle versehenen Versuchskästen entsprechend dem Versuchsplan in Abbildung 5 gelockert bzw. mit Gelbsenf (*Sinapsis alba*) als Zwischenfrucht bestellt.

Im Versuchsjahr 2000-2001 wurden die Versuchskästen der Varianten 1 und 3 mit einem Lockerungsdorn so gelockert, daß die Bodenverdichtung erfaßt und aufgebrochen werden konnte, um den Einfluß der Lockerung auf den Abfluß zu prüfen. Die Varianten 2 und 4 blieben ungelockert. Für die Lockerung der Pflugsohle wurde ein Lockerungsdorn an einem Metallgestell angebracht, das an den Kanten der Versuchskästen aufgestützt und entlang gezogen wurde. Durch die starre Konstruktion konnte gewährleistet werden, daß der Dorn in der entsprechenden Tiefe geführt und das darunterliegende Vlies bzw. die Dränschicht nicht gestört wurden.

In den Varianten 3 und 4 wurde Gelbsenf gesät, um den Einfluß einer Zwischenfrucht zu untersuchen. Für die Saat wurde die praxisübliche Saatmenge von 20 kg ha⁻¹ gewählt, dies entspricht 2 g Saatgut pro Versuchskasten. Die Zwischenfrucht wurde nach dem Abfrieren über Winter in 5 cm lange Stücke zerkleinert und als Mulchschicht leicht in die oberste Krumenschicht eingearbeitet.

Bei der Versuchswiederholung wurde im April 2001-2002 eine Reihe Zuckerrüben pro Versuchskasten mit 8 Pflanzen pro Reihe und Kasten gesät.

Im Versuch 1999-2000 wurden die gleichen Varianten angelegt, die jedoch in der Blockanlage anders randomisiert waren. In dieser Versuchsphase wurde von November 1999 bis März 2000 bei natürlichem Regen gemessen. Während dieser Untersuchungszeit fielen insgesamt 204 mm Regen, ohne daß Niederschlagsereignisse über 10 mm auftraten.

Im zweiten Versuchsjahr (2000-2001) wurde in der ersten Untersuchungsperiode bei natürlichem Regen gemessen. Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich von November 2000 bis März 2001. Im diesem Zeitraum fielen insgesamt 314 mm Regen.

In der zweiten Periode, von Mitte April bis Mitte August 2001, wurde der von KROMER UND VÖHRINGER (1998) konstruierte Bonner Regensimulator des Institutes für Landtechnik der Universität Bonn eingesetzt.

3.2.2 Bodenphysikalische Untersuchungen

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben, wurden für die Bestimmung der Bodenart der jeweiligen Böden Korngrößenanalysen durchgeführt (Tab. 3 und 4).

Nach Beendigung der Versuche wurden Stechzylinderuntersuchungen durchgeführt. Es wurden pro Kasten die Oberkrume (OK) und der Bereich der Pflugsohlenverdichtung (PS) erfaßt, um den Einfluß der ackerbaulichen Maßnahmen auf die Lagerungsdichte, das Porenvolumen und die Porenverteilung zu prüfen.

Zur weiteren Prüfung und zur Kontrolle der durchgeführten Lockerungsmaßnahmen bzw. der Wirkung der Zwischenfrucht wurde vor Versuchsbeginn und nach Beendigung der Versuche der Eindringwiderstand mit einem Penetrologger gemessen.

3.2.3 Berechnung und Abflußmessungen

Während der Versuche mit natürlichem Regen in beiden Versuchsperioden wurden die Abflußmengen in Zeitabschnitten von 7-8 Tagen gemessen. Erfasst wurden dabei das Oberflächenwasser, der Zwischenschichtabfluß und das Sickerwasser. Zusätzlich wurde in denselben Zeitabschnitten die Bodenfeuchte anhand der Wasserspannung kontrolliert. Die Niederschlagsdaten stammten von der Wetterstation des Versuchsfeldes der Landwirtschaftlichen Fakultät in Bonn-Poppelsdorf.

In der zweiten Periode des Versuchszeitraumes 2000-2001 wurde nach dem in Tabelle 5 aufgestellten Plan beregnet und gemessen.

Tab. 5: Beregnungszeitplan des Modellversuches

Versuchsbezeichnung	Zeitraum	Beregnungsmenge und Zeit	Bemerkung
T1-3 a	11.04.-17.04.	25 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	Wdh. 1
T1-3 b	18.04.-24.04.	25 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	Wdh. 2
T 1-3 c	25.04.-30.04.	25 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	Wdh. 3
T 4	03.05.-09.05.	---	1. Abtrocknung
T 5-7 a	10.05.-14.05.	5 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	Wdh. 1
T 5-7 b	15.05.-22.05.	5 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	Wdh. 2
T 5-7	23.05.-29.05.	5 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	Wdh. 3
T 8	30.05.-04.06.	---	2. Abtrocknung
T 9	05.06.-12.06.	50 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	Wdh. 1
T 10	13.06.-18.06.	40 mm / Woche	Natürlicher Regen
T 11	19.06.-26.06.	---	3. Abtrocknung
T 12	27.06.-03.07.	28 mm / Woche	Natürlicher Regen
T 13	04.07.-11.07.	---	4. Abtrocknung
T 14	12.07.-23.07.	38 mm / Woche	Natürlicher Regen
T 15	24.07.-30.07.	4 x 5mm x 12 min ⁻¹	Wdh. 1
T 16	31.07.-07.08.	50 mm x 120 min ⁻¹	Wdh. 1
T 17	08.08.-14.08.	4 x 5mm x 30 min ⁻¹	Wdh. 1

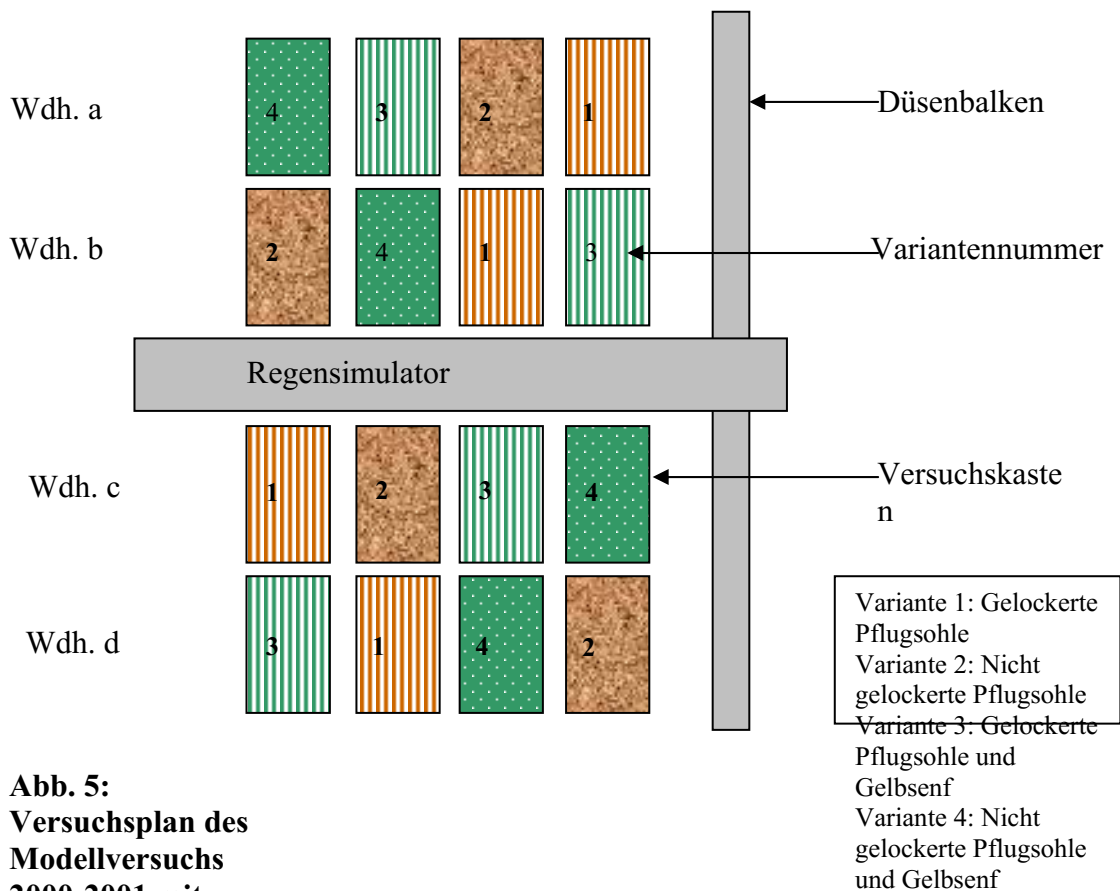


Abb. 5:
Versuchsplan des
Modellversuchs
2000-2001 mit
Beregnungsanlag
e

3.3 Befragung über Bodenverdichtungen und Bodenschutz sowie Erfassung von Bodenverdichtungen in ausgewählten Regionen Nordrhein-Westfalens

3.3.1 Standorte

Um die Verbreitung von Bodenverdichtungen in Nordrhein-Westfalen über den Eindringwiderstand als Kenngröße zu erfassen, wurden drei Regionen ausgewählt. Darüber hinaus wurde zeitgleich eine Befragung der Betriebsleiter über Bodenverdichtungen und Bodenschutz durchgeführt.

Die Befragung der Landwirte und die Messung des Eindringwiderstandes in Ackerschlägen wurden auf 85 Betrieben in den Regionen Euskirchen-Düren (30 Betriebe), Köln-Bonn (25 Betriebe) und Mettmann (30 Betriebe) durchgeführt.

Die untersuchten Regionen unterscheiden sich vor allem durch die Jahresniederschläge. Die Region Euskirchen-Düren liegt im Regenschattengebiet der Eifel und ist mit Jahresniederschlägen < 650 mm als niederschlagsarm anzusprechen. Die Region Mettmann mit mehr als 1000 mm kann als niederschlagsreiches Gebiet bezeichnet werden, während die Region Köln-Bonn mit Niederschlägen zwischen 650 mm und 900 mm im Jahr eine Mittelstellung einnimmt.

Die Böden der untersuchten Ackerschläge in den einzelnen Regionen unterscheiden sich aus ackerbaulicher Sicht kaum. Bei den Lößlandschaften im Raum Euskirchen-Düren und Mettmann handelte es sich um feinsandige bis schluffige Lehme, bei den Böden der Auenlandschaft im Raum Köln-Bonn um schluffige Lehme. Als Bodentypen waren Parabraunerden und Braunerden in allen drei Regionen vertreten.

Um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten, wurden Ackerschläge, deren Bodenart stark vom Durchschnitt abwich, z.B. sehr sandige Lehme oder sehr tonige Böden, nicht in die Auswertung mit einbezogen.

Die Befragung und die Penetrometermessungen wurden in den Wintermonaten der Jahre 2000 und 2001 durchgeführt.

3.3.2 Befragung der Betriebsleiter

Für die Befragung der Betriebsleiter wurde ein Fragebogen ausgearbeitet, der folgende vier Bereiche umfaßte:

1. Allgemeine Fragen zum Betrieb (Größe, Betriebsart, Maschinen-, und Arbeitskräftebesatz),
2. Bodenbewirtschaftung (konventionell, konservierend bzw. reduziert),

3. Bundesbodenschutzgesetz und
4. Bodenverdichtungen

Die Auswertung der Umfrage konzentriert sich in dieser Arbeit auf die Bereiche Bundesbodenschutzgesetz, Bodenverdichtungen und Bodenbewirtschaftung mit folgenden Fragen:

1. Haben Sie vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren?
2. Fühlen Sie sich über das Bundesbodenschutzgesetz informiert?
3. Inwiefern sehen Sie Konfliktpotential zwischen dem Bundesbodenschutzgesetz und Ihrem Bewirtschaftungssystem?
4. Wie oft kontrollieren Sie Ihre Flächen mit Spaten oder Bodensonde auf Bodenschadverdichtungen?
5. Haben Sie auf Ihren Flächen Anzeichen von Bodenschadverdichtungen beobachten können?
6. Wie beurteilen Sie Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich der Vermeidung von Bodenschadverdichtungen?
7. Was hat Sie bislang davon abgehalten, auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren umzustellen?

Bei allen Fragen konnten die Betriebsleiter zwischen vorgegebenen Antworten wählen. Traf keine der vorgegebenen Antworten zu, so konnten sie eigene Antworten formulieren. Bei den Fragen 1, 5 und 7 waren Mehrfachnennungen möglich. Alle Betriebsleiter wurden persönlich befragt. Um die Antworten auf den Fragebogen nicht zu beeinflussen, wurden die Penetrometermessungen erst nach der Befragung der Betriebsleiter durchgeführt.

3.3.3 Penetrologger und Eindringwiderstandsmessungen

Die Messungen des Eindringwiderstandes wurden mit einem elektronischen Penetrologger (Abb. 7) durchgeführt. Dabei wird der Widerstand gemessen, den der Boden dem Eindringen einer Bodensonde entgegensetzt. Der eingesetzte Penetrologger ermöglicht die Erfassung des Eindringwiderstandes in 1 cm-Abschnitten bis in eine Tiefe von 80 cm. Die gemessenen Werte werden in MPa angegeben und können während und nach der Messung sowohl graphisch, wie auch numerisch angezeigt werden (Abb. 7), so daß eine sofortige Beurteilung des Bodenzustandes im Feld möglich ist. Die im Feld gewonnenen Daten werden gespeichert und können später auf einen PC übertragen und ausgewertet werden.

Tiefenmessung und Eindringgeschwindigkeit (20 mm s^{-1}) werden mit Hilfe von Ultraschallwellen erfaßt, die vom Gerät auf eine auf der Bodenoberfläche liegende Metallplatte gesendet

und von dieser wieder zurück zum Gerät reflektiert werden.

Je nach Bodenart und erwartetem Eindringwiderstand kann zwischen verschiedenen Sondierstangenstärken und Sondierspitzen gewählt werden. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde ein Sondierkonus mit einer Meßfläche von 1 cm² und einem Winkel von 60 ° eingesetzt.

Um die Haftreibung zwischen Boden und Sondierstange so gering wie möglich zu halten, ist einmal der äußere Durchmesser des Sondierkonus größer als der der Sondierstange. Zum anderem sollte der Penetrologger möglichst senkrecht in den Boden eingedrückt werden. Um das zu gewährleisten, wird die Neigung des Gerätes durch eine eingebaute Wasserwaage angezeigt. Eine Überschreitung der Toleranzwerte (Abweichung um 2° von der Vertikalen) wird vom Penetrologger angezeigt und akustisch signalisiert.

Der Eindringwiderstand wird durch Bodenart, Bodentyp, Lagerungsdichte und Bodenfeuchte beeinflusst. Um die Vergleichbarkeit der gemessenen Eindringwiderstände zu gewährleisten, sollten die Messungen bei 80-90 % Feldkapazität durchgeführt werden. Dazu wurden alle Daten in den Wintermonaten bei ausreichender Bodenfeuchte erhoben. Die Bodenfeuchte wurde in 10 cm Tiefenabschnitten gravimetrisch bestimmt. Die Bodenarten wurde mit Hilfe von Bodenkarten und durch Fingerprobe bestimmt.

Pro landwirtschaftlicher Betrieb wurden 3-4 Flächen ausgewählt mit jeweils 10 Meßwiederholungen pro Fläche, wobei Vorgewende und Fahrgassen ausgelassen wurden. Bei der Auswertung wurden die Meßwerte in Regionen (Euskirchen-Düren, Köln-Bonn und Mettmann) eingeteilt und nach Tiefen getrennt behandelt, um folgende Tiefenabschnitte charakterisieren zu können: Oberer Krumbereich (0-20 cm), Krumbasis (21-45 cm) und Unterboden (46-70 cm).

Für die Klassifizierung der Flächen nach Verdichtungsgrad wurden Messungen, die Werte über 1,8 MPa aufwiesen, pro Fläche gezählt und in Klassen eingeteilt (Tab. 6 und Abb. 6).

Für die Klassifizierung des Eindringwiderstandes in den jeweiligen Tiefenbereichen - als Maßstab für die Stärke der Verdichtung - wurden die Werte in folgende Meßbereiche eingeteilt: 1,8-2,2 MPa, 2,3-2,7 MPa, 2,8-3,3 MPa und > 3,3 MPa.

Tab. 6: Klassifizierung der Flächen nach Verdichtungsgrad

Anzahl der Messungen > 1,8 MPa	Klassifizierung der Fläche
0-1	nicht verdichtet
2-3	gering verdichtet
4-7	partiell verdichtet
8-10	überwiegend verdichtet

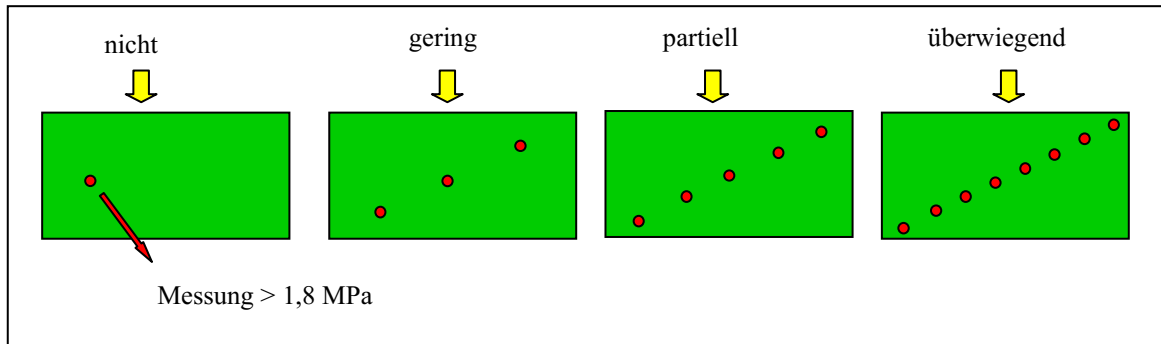


Abb. 6: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen >1,8 MPa



Abb. 7: Penetrologger zur Messung des Eindringwiderstandes

3.4 Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden mit dem SAS-Statistikprogrammpaket 8.2 auf einem PC ausgewertet. Die varianzanalytische Verrechnung der Freilandversuche erfolgte getrennt nach Standorten einfaktoriell über den Faktor „Lockerung“. Die Ergebnisse des Modellversuches wurden zweifaktoriell über die Faktoren „Lockerung“ und „Zwischenfrucht“ verrechnet. Für alle Versuche wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=0,05$ angenommen. Die errechneten Mittelwerte wurden mit dem Tuckey-Test auf Signifikanz geprüft und signifikante Unterschiede durch unterschiedliche Buchstaben (a, b) oder durch * gekennzeichnet.

4. Ergebnisse

4.1 Freilandversuche

4.1.1 Abflußmessungen im Freilandversuch

4.1.1.1 Einfluß der Lockerungsmaßnahmen auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß

Auf den Standorten Frankenforst und Wülfrath wurde während der Versuchszeiträume 1999 bis 2000 und 2000-2001 der Einfluß von Lockerungsmaßnahmen auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß geprüft.

In Frankenforst überschritten die Niederschläge von November bis Januar des ersten Versuchszeitraumes 1999-2000 nur selten 5 mm d^{-1} (Anhangtab. 1); ab Mitte Januar 2000 bis zum Ende der Untersuchungsperiode nahm die Anzahl der Niederschlagsereignisse ab. Im Februar wurden vereinzelt Niederschlagsereignisse $> 10 \text{ mm d}^{-1}$ verzeichnet. Die insgesamt geringen Niederschlagsmengen ließen aber keine verlässlichen Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Lockerungsmaßnahmen zu (Anhangtab. 3).

In den Abbildungen 8 und 9 sind der Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß sowie die Niederschläge im Versuchszeitraum 2000-2001 in Frankenforst dargestellt. Die Niederschläge zwischen den Meßterminen überschritten oft 10 mm. An sieben Terminen konnten Niederschlagssummen $\geq 20 \text{ mm}$ gemessen werden. Im Versuchszeitraum (03.11.00-06.04.01) fielen insgesamt 318 mm Niederschläge.

Beim Oberflächenabfluß konnten hier tendenziell höhere Abflußmengen bei den verdichteten Varianten festgestellt werden, bei 8 von 23 Meßterminen sogar signifikante Unterschiede (*). So wurden bei den verdichteten Varianten Höchstmittelwerte von 526,00 ml und bei den gelockerten Varianten 407,25 ml gemessen. Ab März 2001 (Termin 18) konnten trotz großer Niederschlagsmengen keine nennenswerten Unterschiede mehr beobachtet werden.

Die Messungen des Zwischenschichtabflusses ergaben auf diesem Standort, daß die Lockerungsmaßnahmen bei 20 von 23 Terminen zu einer signifikanten Reduzierung (*) des Abflusses geführt haben, wie in Abbildung 9 deutlich zu erkennen ist.

Über die Zwischenschichten sind bei den verdichteten Varianten maximal 1195,25 ml und bei den gelockerten Flächen 264,50 ml abgeflossen. Zudem ist die Streuung der Abflußmengen innerhalb einer Variante/Meßtermin deutlich größer als beim Oberflächenabfluß.

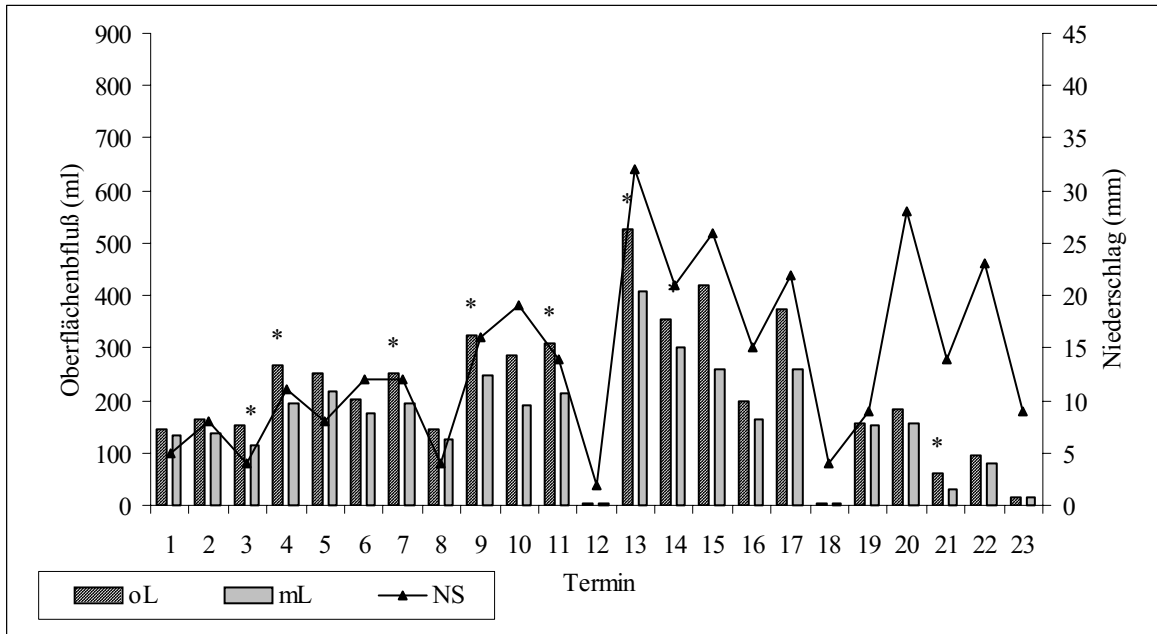


Abb. 8: Oberflächenabfluß und Niederschlag in Frankenforst (2000-2001)

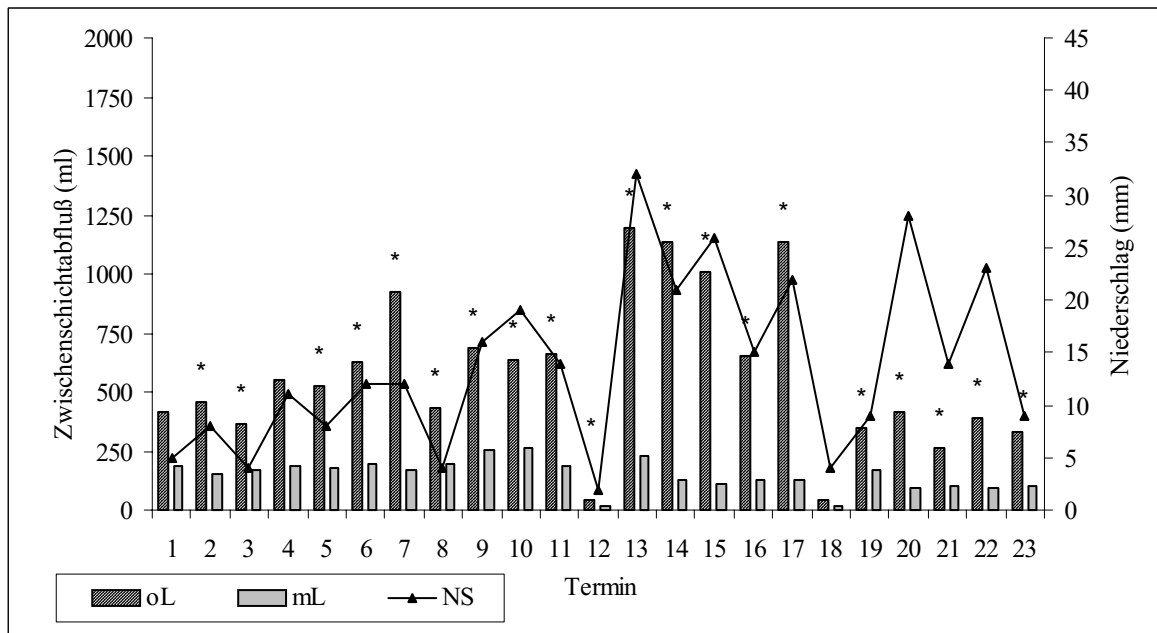


Abb. 9: Zwischenschichtabfluß und Niederschlag in Frankenforst (2000-2001)

Auf dem Standort Wülfrath wurde in beiden Untersuchungsperioden auf derselben Versuchsfäche der Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß untersucht. Hier sind allerdings im zweiten Versuchsjahr die Parzellen nicht erneut gelockert worden, um die Wirkung einer einmaligen Lockerung auch im Folgejahr unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen. Der Standort Wülfrath liegt in einer mit >1000 mm NS niederschlagsreichen Hügellandschaft. So fielen in der ersten Versuchsperiode (29.11.99-01.04.00) insgesamt 381 mm Regen und im zweiten Versuchszeitraum (15.10.00-07.04.01) 420 mm. Die Niederschlagsverteilung ist auf diesem Standort von besonderer Bedeutung. So konnten während der zweiten Untersuchungsperiode an 18 von 25 Meßterminen Niederschlagssummen > 10 mm, an 7 Terminen > 20 mm und an 5 Terminen sogar Summen > 30 mm registriert werden. In der ersten Versuchsperiode wich die Niederschlagsverteilung geringfügig davon ab.

Im Versuchszeitraum 1999-2000 konnte an 10 Meßterminen ein signifikant höherer Oberflächenabfluß auf den verdichteten Varianten festgestellt werden. Aber auch an den übrigen Terminen wurden hier tendenziell höhere Abflußmengen gemessen (Abb.10).

Beim Zwischenschichtabfluß fielen die Unterschiede zwischen den Varianten auf diesem Standort noch deutlicher aus. So wies die verdichtete Variante einen insgesamt höheren Zwischenschichtabfluß auf als die gelockerte Variante. An 15 von 23 Meßterminen konnten diese Unterschiede statistisch abgesichert werden. Das Gesamtvolumen des Zwischenschichtabflusses war deutlich größer als das des Oberflächenabflusses (Abb. 10 und 11).

Auf diesem Standort wurde weiterhin der Einfluß der Lockerung im Folgejahr geprüft (2000 bis 2001). Wie in Abbildung 12 zu erkennen ist, wurde nur an drei Meßterminen ein signifikant höherer Oberflächenabfluß auf der verdichteten Variante gemessen. Die Abflußmengen der beiden Varianten glichen sich weitgehend an. Beim Zwischenschichtabfluß war der Einfluß der Lockerung im zweiten Jahr nur noch tendenziell erkennbar; lediglich an 4 Terminen wurde ein statistisch abgesicherter höherer Abfluß der verdichteten Variante festgestellt (Abb. 13).

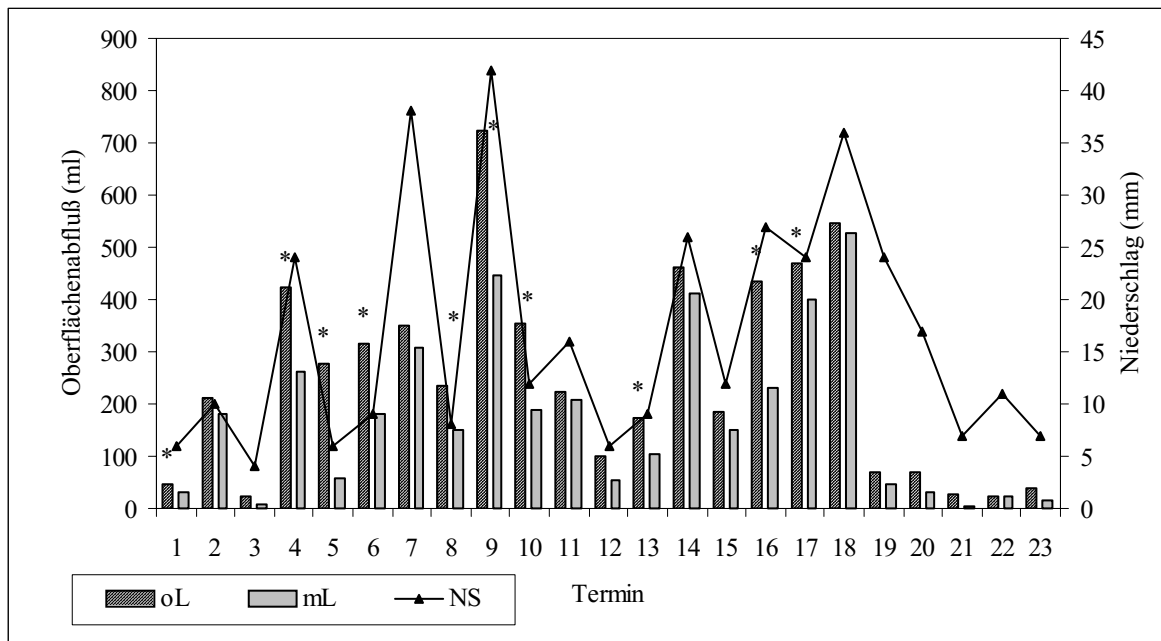


Abb. 10: Oberflächenabfluß und Niederschlag in Wülfrath (1999-2000)

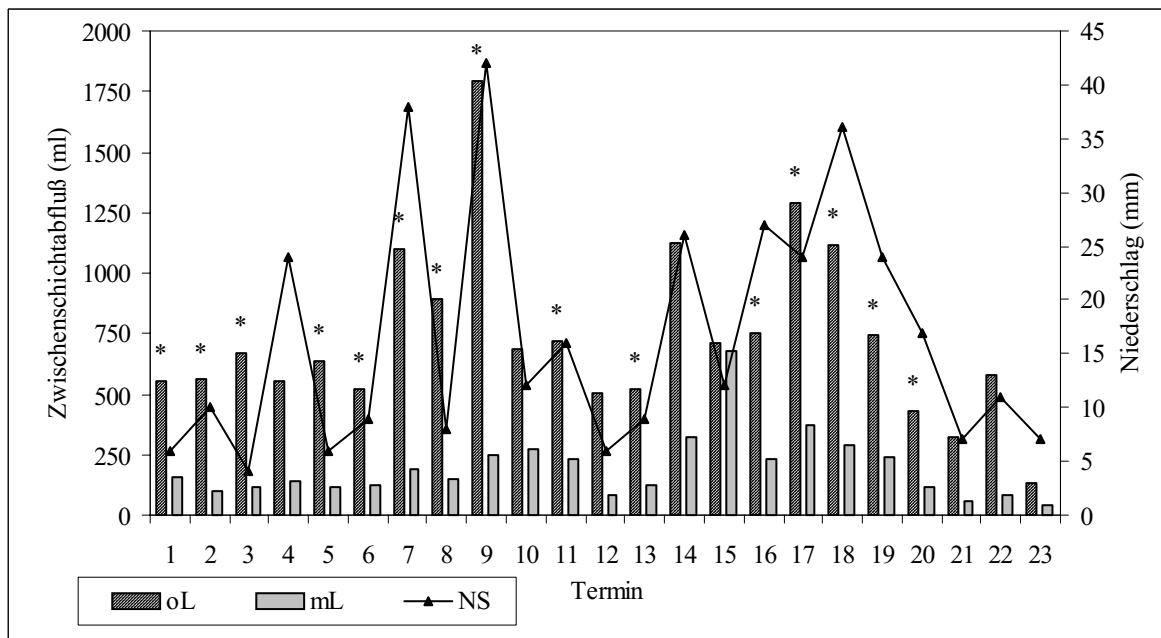


Abb. 11: Zwischenschichtabfluß und Niederschlag in Wülfrath (1999-2000)

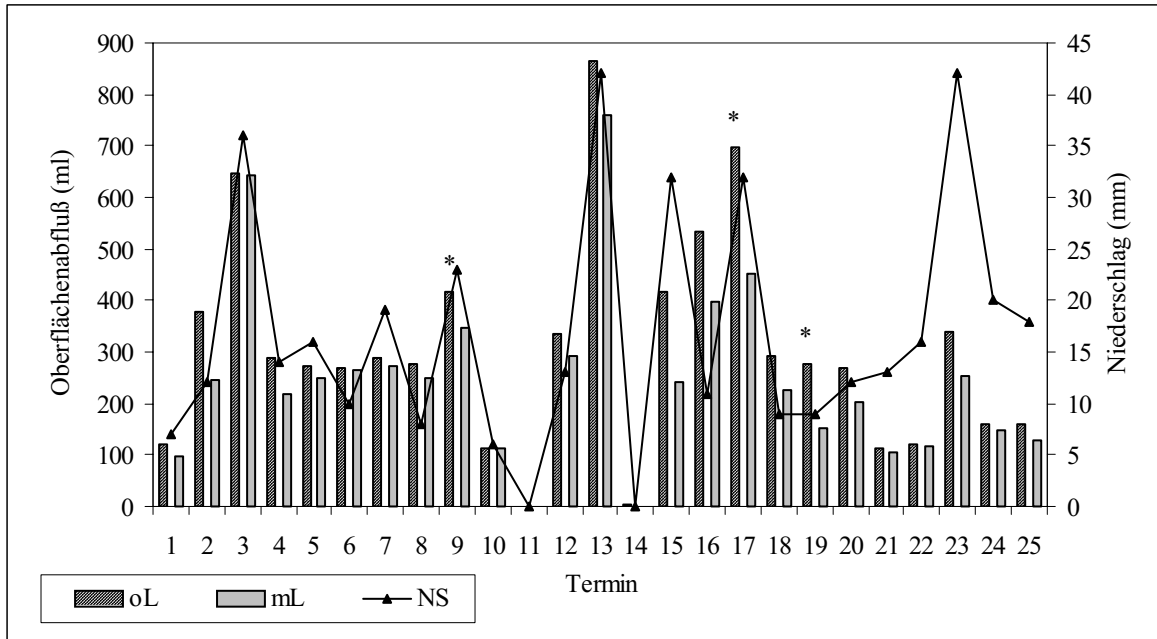


Abb. 12: Oberflächenabfluß und Niederschlag in Wülfrath (2000-2001)

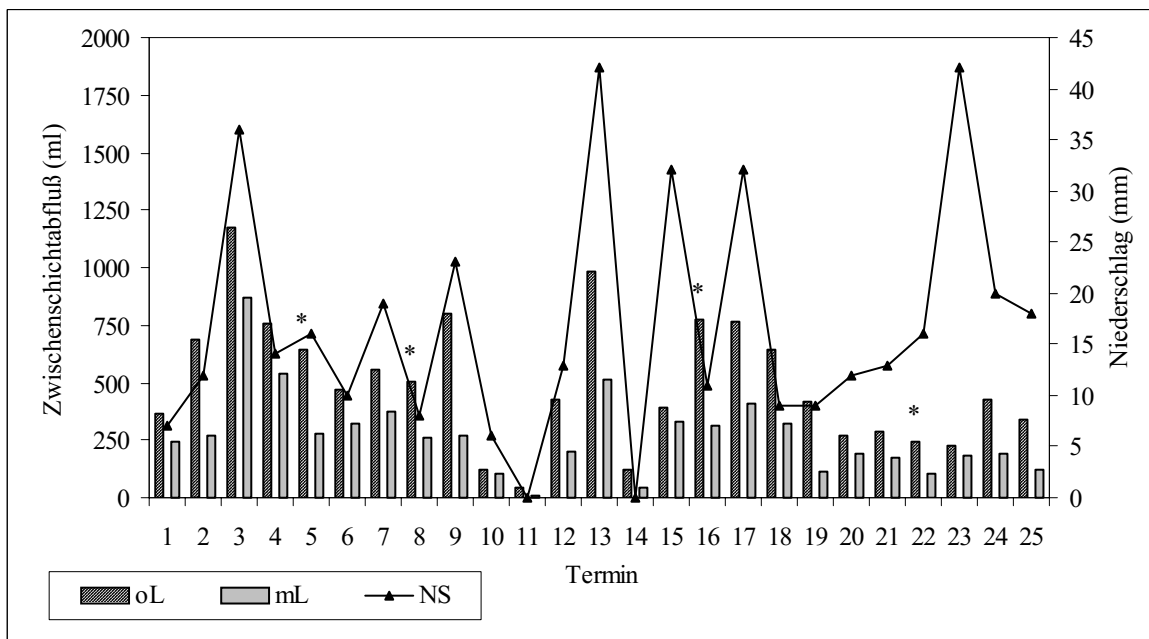


Abb. 13: Zwischenschichtabfluß und Niederschlag in Wülfrath (2000-2001)

4.1.1.2 Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß

Auf dem Versuchsstandort Vinxel (1999-2000) wurde der Einfluß einer Zwischenfrucht auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß (Versuchsplan in Abbildung 1) geprüft. Wie bereits für den Standort Frankenforst (1999-2000) beschrieben wurde, waren auch hier die Niederschläge und entsprechend die Abflußmengen aus beiden Tiefenbereichen so gering, daß keine verlässliche Aussage getroffen werden kann (Anhangtab. 1).

Der Einfluß einer Zwischenfrucht auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß wurde u.a. aus diesem Grund in den Modellversuchen 1999-2000 und 2000-2001, wie in Kapitel 4 beschrieben, eingehend untersucht.

4.1.2 Physikalische Bodeneigenschaften

Zur Standortcharakterisierung wurden Stechzylinderuntersuchungen durchgeführt, um u.a. die Lagerungsdichte, das Porenvolumen und die Porenverteilung zu bestimmen. Darüber hinaus wurden zum Vergleich auch die gelockerten bzw. die mit einer Zwischenfrucht bestellten Versuchspartellen beprobt.

In den Abbildungen 14 - 19 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen für die Standorte Frankenforst (2000-2001), Vinxel (1999-2000) und Wülfrath (1999-2000 und 2000-2001) dargestellt.

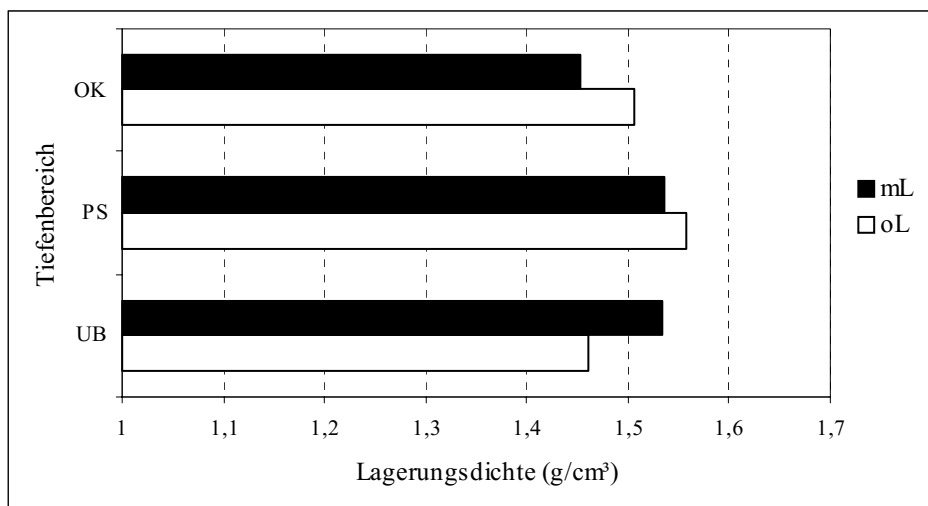


Abb. 14: Lagerungsdichte in Frankenforst (2000-2001)

Die Auswertung der Versuchsperiode 1999-2000 hat ergeben, daß die Lagerungsdichte des nicht gelockerten Bodens auf dem Standort Frankenforst lediglich im oberen Krumbereich einen signifikant höheren Wert aufwies. In den tieferen Bereichen waren die Werte der Lockerungsvarianten tendenziell höher. Die Werte der zweiten Untersuchungsperiode (2000 bis 2001) zeigen ein ähnliches Bild.

Auch bei der Betrachtung des Gesamtporenvolumens und der Porenverteilung können keine wesentlichen Veränderungen festgestellt werden (Abb. 15). Die Auswertung der zweiten Versuchsperiode ergab ebenfalls keine deutlichen Unterschiede zwischen den Varianten.

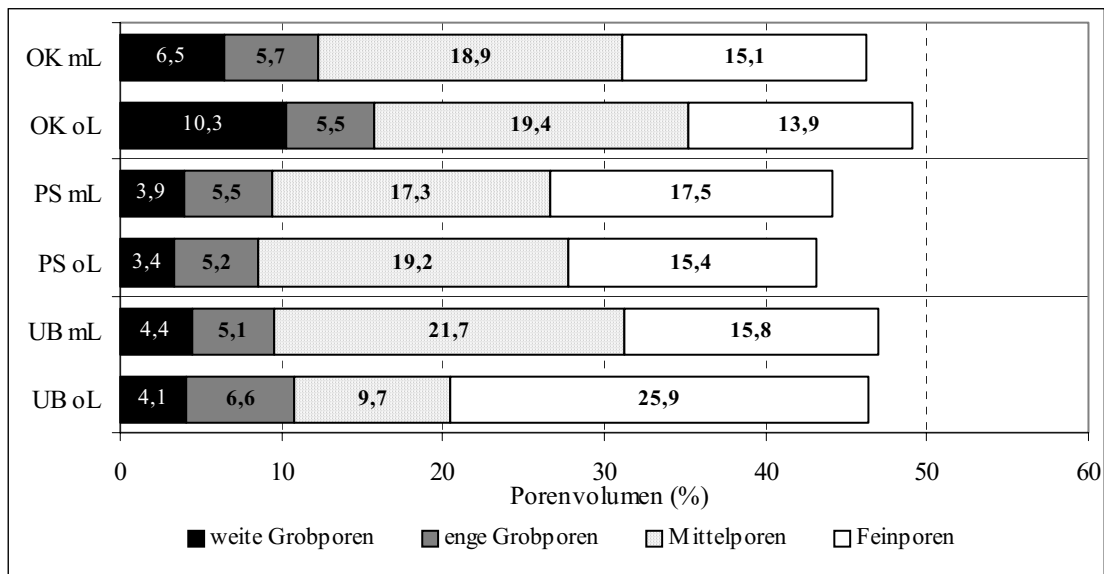


Abb. 15: Porenvolumen und Porenverteilung in Frankenforst (2000-2001)

Die Lagerungsdichte des Versuchsstandortes Wülfrath (Abb. 16 und 17) lag auf vergleichbarem Niveau mit der des Versuchsgutes Frankenforst. Auch hier hat die durchgeführte Lockerung zu keiner meßbaren Veränderung geführt. Auf dem Standort Wülfrath wurden die Proben, im Gegensatz zu Frankenforst, auf denselben Parzellen wie im Vorjahr entnommen. Die Lockerungsmaßnahmen blieben - wie bereits erwähnt - in der zweiten Untersuchungsperiode aus, um die nachhaltige Wirkung der Bodenlockerung zu prüfen. Diese Werte der Lagerungsdichte lagen in der Versuchsperiode 2000-2001 (Abb. 17) im Bereich der Oberkrume und der Pflugsohle etwas höher. Im Bereich des Unterbodens war dieser Effekt nicht mehr zu erkennen.

In den Abbildungen 18 und 19 sind das Gesamtporenvolumen und die Porenverteilung in den entsprechenden Tiefenbereichen und Versuchsvarianten des Standortes Wülfrath dargestellt.

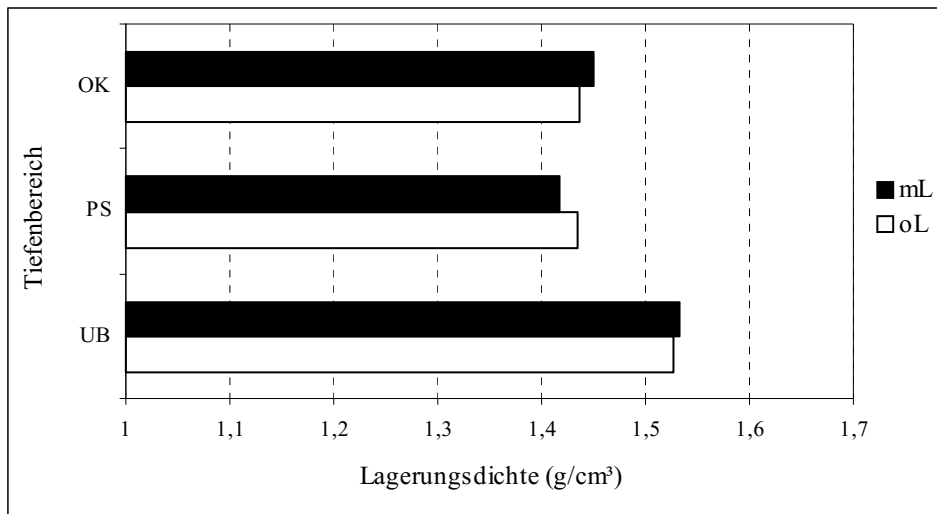


Abb. 16: Lagerungsdichte in Wülfrath (1999-2000)

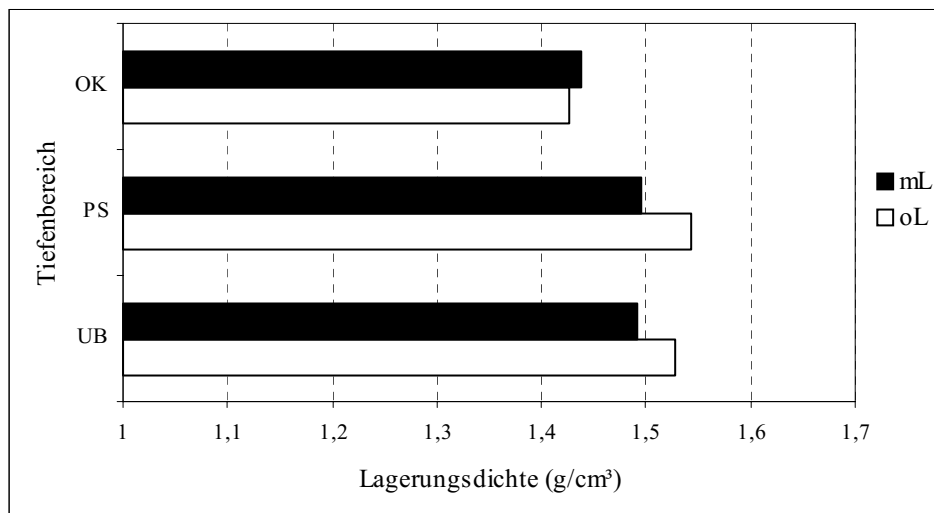


Abb. 17: Lagerungsdichte in Wülfrath (2000-2001)

Der Vergleich der Werte innerhalb einer Versuchsperiode zeigt, wie schon bei der Lagerungsdichte, daß die Lockerung auch auf diesem Standort weder zu einer Veränderung des Gesamtporenvolumens noch der Porenverteilung geführt hat. Abbildung 19 ist zu entnehmen, daß in der zweiten Untersuchungsperiode (2000-2001) insgesamt eine Reduzierung des Porenvolumens aufgetreten ist. Betrachtet man die Verteilung der Porengrößen, so ist auch hier eine Verschiebung erkennbar. Vor allem in den beiden tieferen Bereichen „Pflugsohle“ und „Unterboden“ zeigt sich eine Verringerung des Grobporen- wie auch eine Erhöhung des Feinporenanteils zu Lasten der Mittelporen.

Auf dem Standort Vinxel wurde der Einfluß einer Zwischenfrucht auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß untersucht. Die Zwischenfrucht Gelbsenf hat in diesem Freilandversuch zu keiner signifikanten Veränderung weder der Dichtelagerung des Bodens noch des Gesamtporenvolumens oder der Porengrößenverteilung geführt (Abbildung 20 und 21).

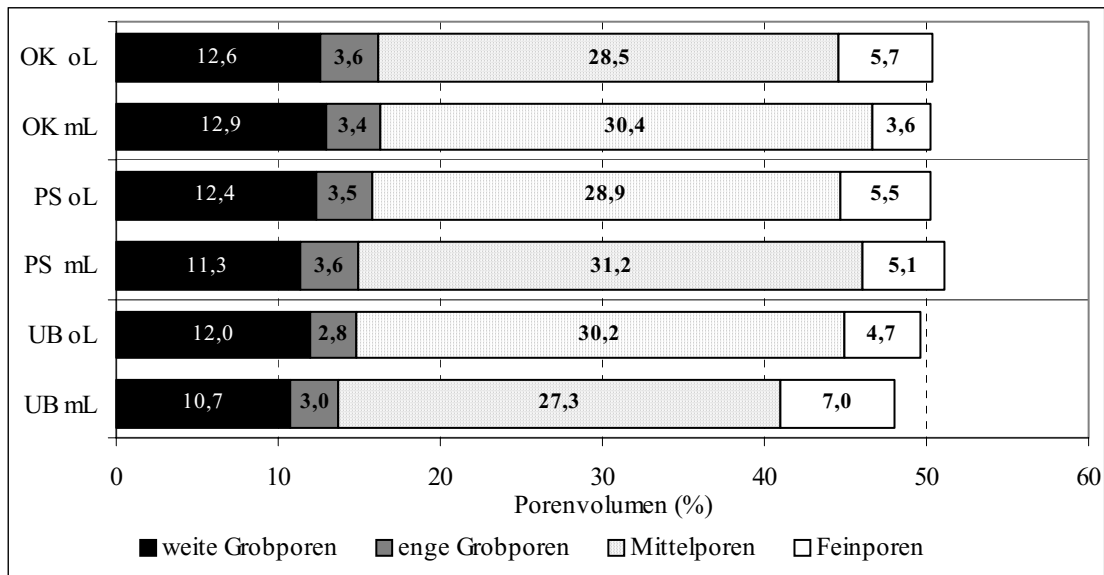


Abb. 18: Porenvolumen und Porenverteilung in Wülfrath (1999-2000)

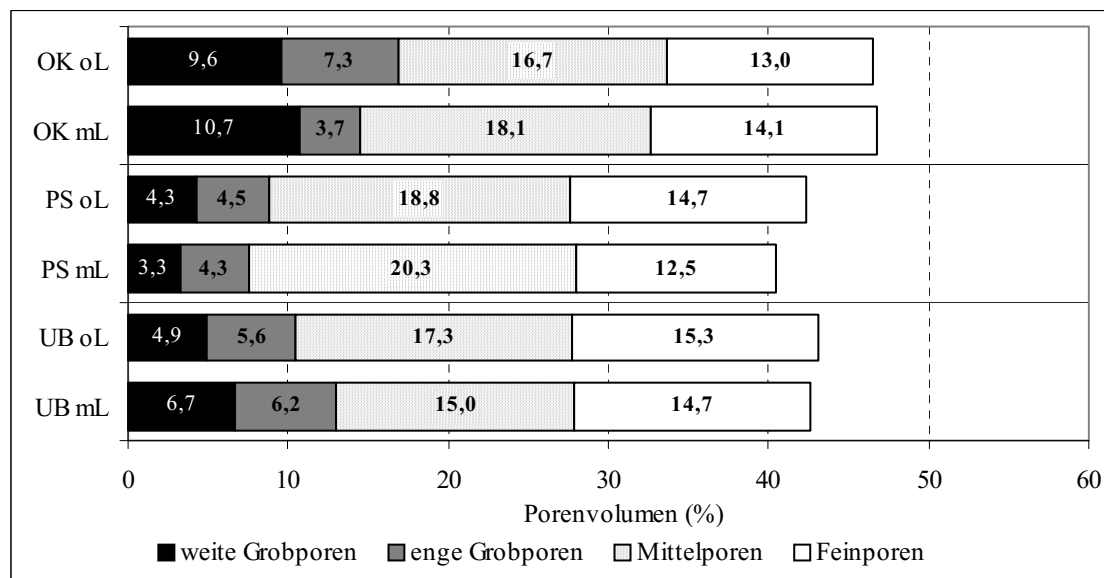


Abb. 19: Porenvolumen und Porenverteilung in Wülfrath (2000-2001)

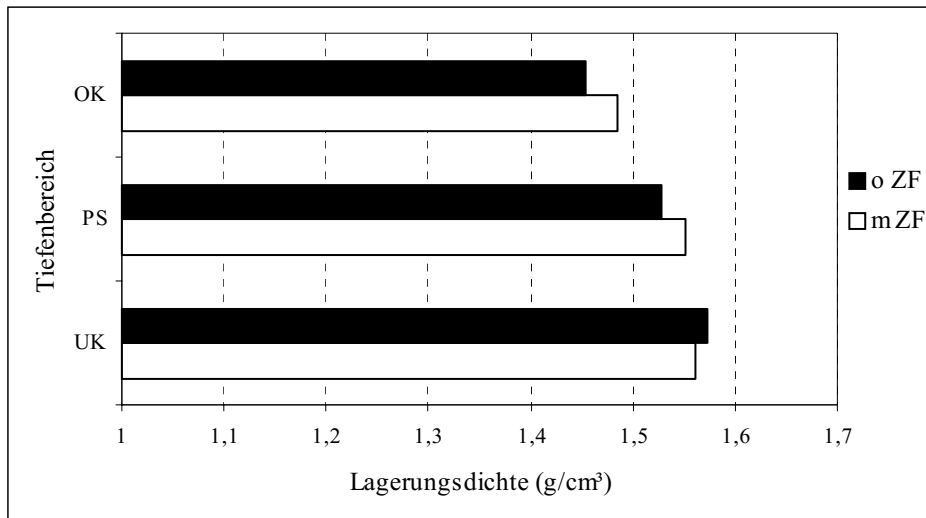


Abb.: 20 Lagerungsdichte in Vinxel (1999-2000)

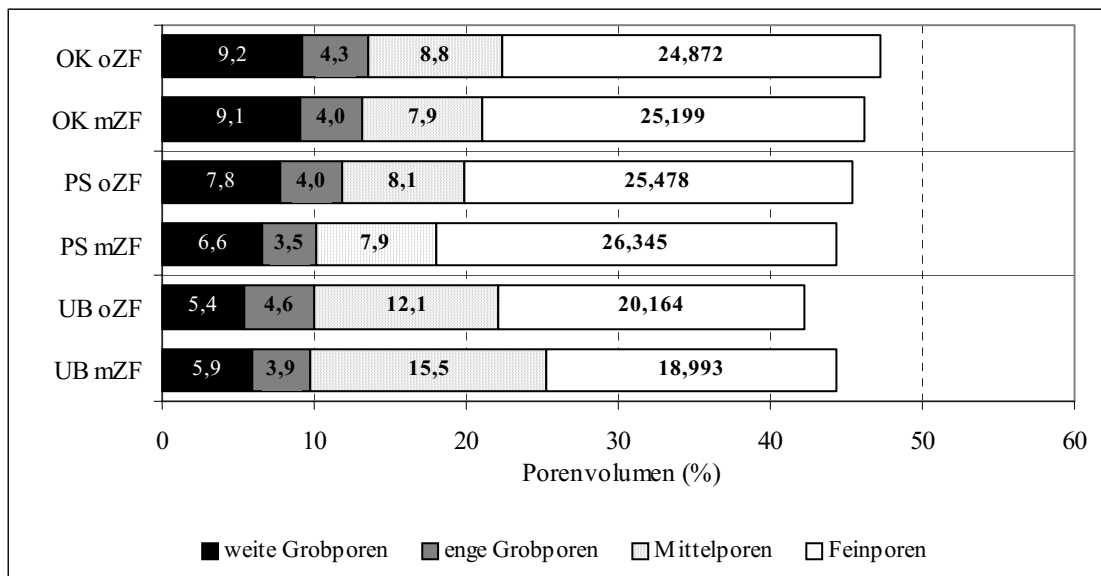


Abb. 21: Porenvolumen und Porenverteilung in Vinxel (1999-2000)

4.2 Modellversuch

4.2.1 Abflußmessungen und Berechnungen

Im Versuchszeitraum 1999-2000 wurde auf dem Versuchsfeld Poppelsdorf der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn ein Modellversuch bei natürlichem Regen durchgeführt, der im Versuchszeitraum 2000-2001 um den Einsatz eines Regensimulators erweitert wurde. In beiden Versuchsperioden wurde - analog zu den Freilandversuchen - der Einfluß einer mechanischen Lockerung und einer Zwischenfrucht (Gelbsenf) auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß geprüft. Zusätzlich konnte im Modellversuch auch das Sickerwasser aufgefangen und gemessen werden. Die Messungen wurden, wie in den Freilandversuchen, in wöchentlichen Abständen durchgeführt.

Im ersten Versuchszeitraum wurde von Dezember 1999 bis März 2000 an 33 Terminen der kumulierte Abfluß gemessen. In dieser Periode fielen insgesamt 194 mm natürlicher Niederschlag, der allerdings ungleichmäßig verteilt war. So fiel im Monat Dezember die Hälfte des monatlichen Niederschlages zwischen der 6. und 7. Messung. Der Monat Januar war im Vergleich zum Langjährigen Mittel mit nur 25 mm ein niederschlagsarmer Monat, wobei keine Niederschlagsereignisse über 10 mm zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen registriert wurden. In den Monaten Februar und März fielen 61 und 54 mm Niederschlag. Die für die Beantwortung der Versuchsfrage ungünstigen Niederschlagsbedingungen erschwerten die Erfassung der Abflußfraktionen. Jedoch haben die Ergebnisse die Eignung des Modells für weitere Untersuchungen mit kontrollierter Beregnung belegt.

In der zweiten Versuchsperiode (2000-2001) wurde der Versuch nach dem im Abbildung 5 (Kapitel 3.2.3) beschriebenen Versuchsplan angelegt und nach dem Zeitplan in Tabelle 5 beregnet.

Zwischen den Beregnungen wurden Messungen bei natürlichem Regen durchgeführt. Durch die kontrollierten Bedingungen der Beregnung konnte neben der Messung des Oberflächen-, Sickerwasser- und Zwischenschichtabflusses auch der genaue Abflußbeginn der drei Abflußfraktionen registriert werden.

4.2.1.1 Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf den Beginn des Abflusses

Beim ersten Versuch (T1-3) - in dreifacher Wiederholung (a-c) - wurde mit der gleichen Niederschlagsintensität von $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$ an drei Terminen in jeweils wöchentlichem Abstand berechnet. Dabei wurde der Beginn des Oberflächen-, des Zwischenschicht- und des Sickerwasserabflusses registriert, um den Einfluß der Lockerung und der gehäckselten Zwischenfrucht zu prüfen.

Wie Abbildung 22 zu entnehmen ist, konnte beim Beginn des Oberflächenabflusses an keinem der drei Termine ein signifikanter Einfluß der Lockerungsmaßnahmen festgestellt werden. Diese Maßnahme hat jedoch zu einer statistisch abgesicherten Verzögerung des Zwischenschichtabflusses in den gelockerten Varianten geführt, während der Beginn des Sickerabflusses in den gelockerten Varianten signifikant beschleunigt wurde.

Wie Abbildung 23 zeigt, konnte eine Verzögerung des Zwischenschichtabflusses bzw. eine kürzere Zeitspanne bis zum Beginn des Sickerwasserabflusses, auch bei weiteren Beregnungsmaßnahmen mit verminderter Intensität ($5 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$) festgestellt werden (T5-7 a-c). Eine verzögernde Wirkung der Lockerung auf den Oberflächenabfluß war auch hier nicht erkennbar.

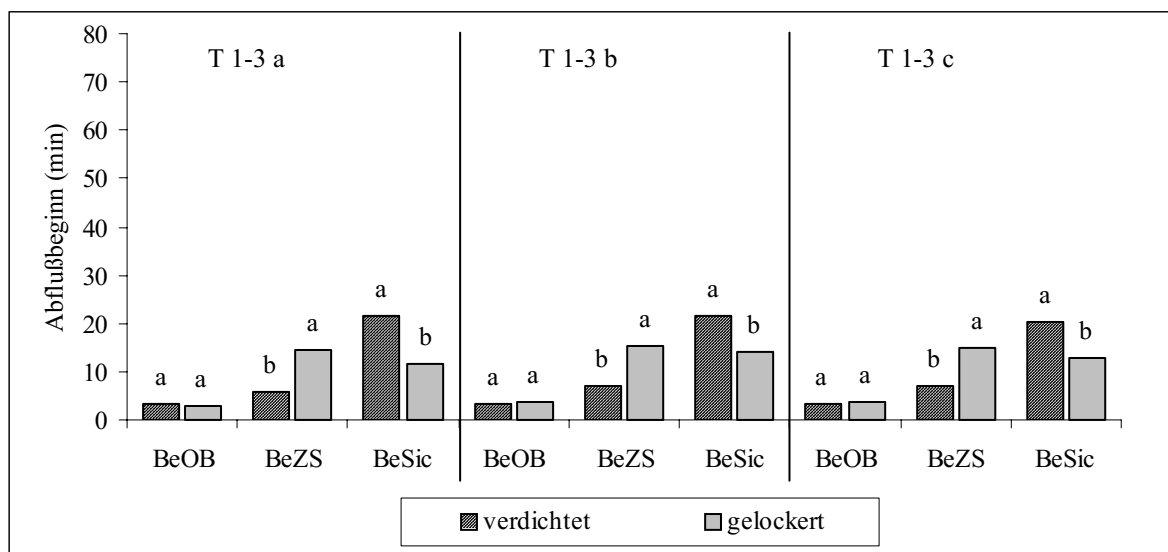


Abb. 22: Einfluß der Lockerung auf den Beginn des Abflusses (min); T1-3 (a-c), Beregnungsintensität: $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

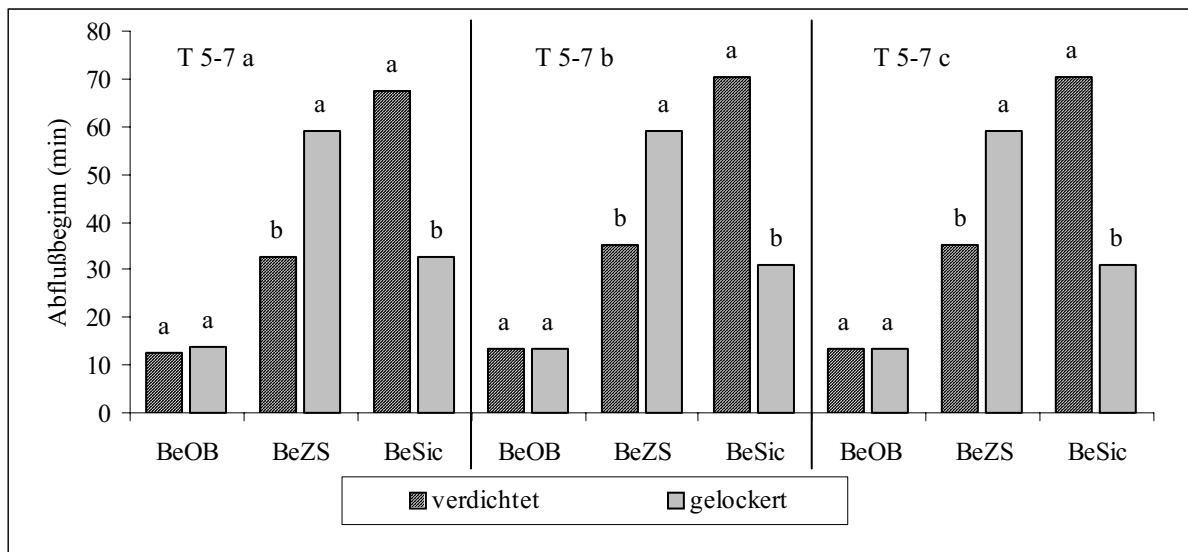


Abb. 23: Einfluß der Lockerung auf den Beginn des Abflusses (min); T5-7 (a-c), Beregnungsintensität: 5 mm x 60 min⁻¹ d⁻¹

Dieser Lockerungseffekt trat bei Versuchen mit höherer Beregnungsintensität (T9) von 50 mm x 60min⁻¹ d⁻¹ nicht mehr auf. Bei dieser Beregnungsmenge kam es sehr schnell zu einem Oberflächenabfluß (≤ 2 min). Im Beginn des Zwischenschichtabflusses nach ca. 28 min und des Sickerwasserabflusses nach ca. 14 min unterschieden sich die Varianten nicht (Tabelle 7). Dieser Sachverhalt wiederholte sich in ähnlicher Form bei einer Beregnungsintensität von 50 mm x 120min⁻¹ d⁻¹ (T16). Hier wurde jedoch ein signifikant schnelleres Abfließen des Sickerwassers in den gelockerten Varianten festgestellt.

Die oben aufliegende gehäckselte Zwischenfrucht hat beim ersten Beregnungsversuch (T1-3 a-c) mit 25 mm x 30 min⁻¹ d⁻¹ in den drei Versuchswiederholungen zu einer signifikanten Verzögerung des Oberflächenabflusses geführt (Abb. 24). Ein Einfluß auf den Zwischenschichtabfluß wurde bei zwei Versuchswiederholungen festgestellt. Der Beginn des Sickerwasserabflusses zeigte hier keinen signifikanten Unterschied zwischen der Varianten. Beim zweiten Beregnungsversuch (T 5-7 a-c) mit 5 mm x 60 min⁻¹ d⁻¹ konnte dieser Sachverhalt nicht festgestellt werden. Bei dieser Beregnungsintensität bestanden keine Unterschiede zwischen den Varianten.

In Tabelle 7 sind die Mittelwerte der Versuchswiederholungen für die Termine T9 und T15-17 bei jeweils unterschiedlicher Beregnungsintensität aufgeführt. Bei der höchsten Niederschlagsintensität (T9) sind auch hier keine Unterschiede im Abflußgeschehen erfaßt worden. Die Beregnungsversuche T15-17 haben bei geringerer Intensität signifikante

Unterschiede im Beginn des Oberflächenabflusses gezeigt. Die Varianten mit Zwischenfrucht zeigten dann wieder einen signifikant späteren Abflußbeginn. Die Zwischenfrucht hatte hier keinen Einfluß auf den Beginn des Zwischenschicht- und des Sickerwasserabflusses.

Tab. 7: Abflußbeginn (min) bei unterschiedlicher Beregnungsintensität

Termin	Beregnung	Abfluß	verdichtet		gelockert		mit ZF		ohne ZF	
T9	50 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	BeOB	1,63	a	2,00	a	2,25	a	1,38	a
		BeZS	29,13	a	27,75	a	28,00	a	28,88	a
		BeSic	14,50	a	14,75	a	15,25	a	14,00	a
T15	4 x 5 mm x 12 min ⁻¹ d ⁻¹	BeOB	14,88	b	23,13	a	23,00	a	15,00	b
		BeZS	39,88	b	60,25	a	44,00	a	56,13	b
		BeSic	78,00	a	42,88	b	57,63	a	63,25	a
T16	50 mm x 120 min ⁻¹ d ⁻¹	BeOB	4,38	a	5,25	a	7,75	a	1,88	b
		BeZS	29,63	a	24,88	a	24,83	a	29,63	a
		BeSic	25,50	a	8,63	b	17,38	a	16,75	a
T17	4 x 5 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	BeOB	14,20	a	13,20	a	22,50	a	11,25	b
		BeZS	38,50	b	62,30	a	45,00	a	49,75	a
		BeSic	71,00	a	31,20	b	58,30	a	57,40	a

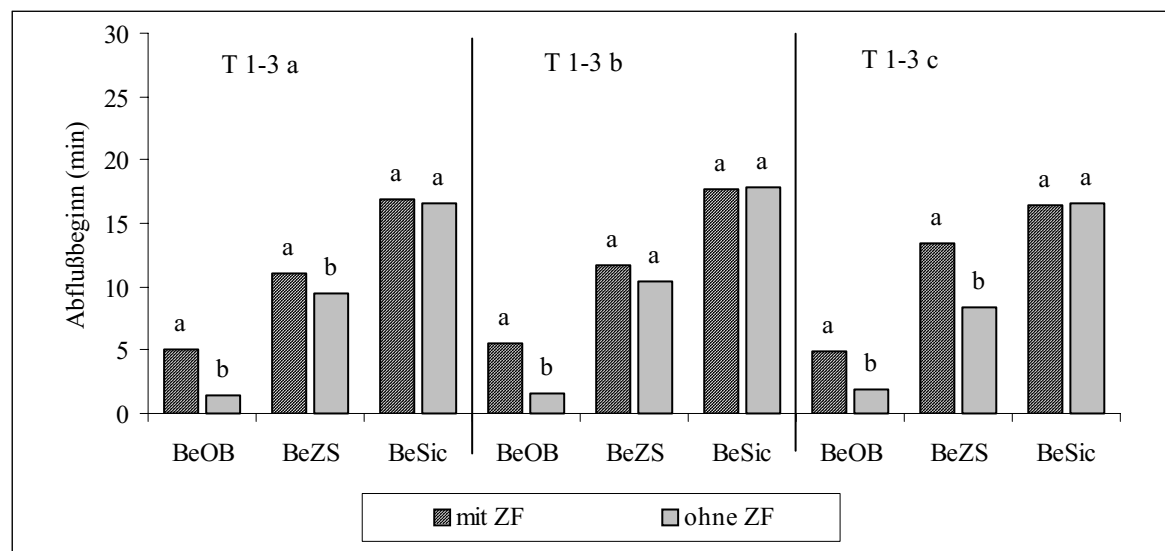


Abb. 24: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Beginn des Abflusses (min); T1-3 (a-c), Beregnungsintensität: 25 mm x 30 min⁻¹ d⁻¹

4.2.1.2 Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei unterschiedlicher Beregnungsintensität

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse des Beregnungsversuches mittlerer Intensität ($25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$) hinsichtlich des Einflusses der Lockerung und der Zwischenfrucht in drei aufeinanderfolgenden Versuchsläufen (a,b,c) dargestellt.

Bei dieser Beregnungsintensität von $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$ hat die Lockerung in den ersten beiden Versuchsläufen (a und b) einen signifikanten Einfluß auf den Oberflächenabfluß. Im dritten Lauf war dieser Einfluß nur noch tendenziell erkennbar. Die Messungen des Zwischenschichtabflusses und des Sickerwassers haben bei allen drei Beregnungen statistisch abgesicherte Unterschiede ergeben. So führte die Lockerung zu einer Verminderung des Oberflächenwassers und des Zwischenschichtabflusses. Die Sickerwassermenge war erwartungsgemäß bei den gelockerten Varianten wesentlich höher.

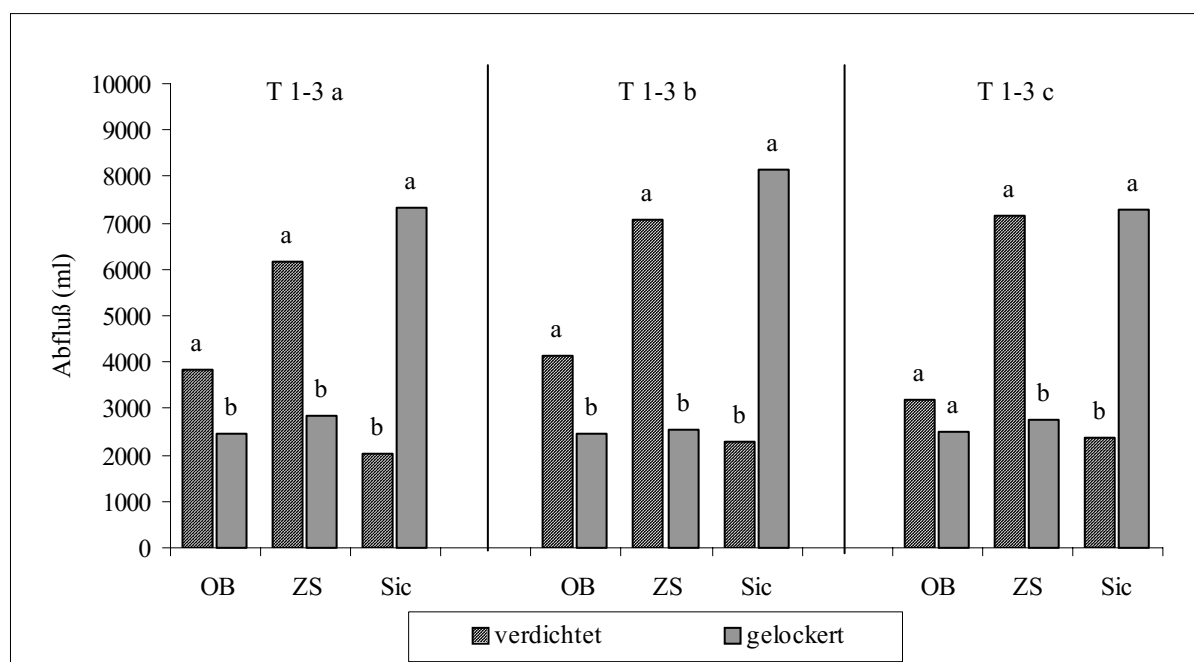


Abb. 25: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); T1-3 (a-c), Beregnungsintensität: $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

Beim Beregnungsversuch mit der geringsten Intensität von $5 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (T5-7 a-c) wurde im Oberflächenabfluß kein Unterschied zwischen den Varianten festgestellt. Hier wurden auch wesentlich geringere Wassermengen aufgefangen. Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß ließen hingegen einen Lockerungseffekt erkennen (Tab. 8).

Bei der höchsten Beregnungsintensität mit $50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in Versuch T9 war der Einfluß der Lockerungsmaßnahmen auf den Oberflächen- und den Zwischenschichtabfluß deutlich erkennbar (Abb. 26). So wurde bei den gelockerten Varianten weniger Abfluß aufgefangen als bei den verdichteten. Der Sickerwasserabfluß wies aber keine signifikanten Unterschiede mehr auf. Im Versuch T16 wurde mit der gleichen Wassermenge wie bei Versuch T9 beregnet, aber über die doppelte Zeitdauer ($50 \text{ mm} \times 120 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Dabei wurde das gleiche Ergebnis wie bei T9 erzielt.

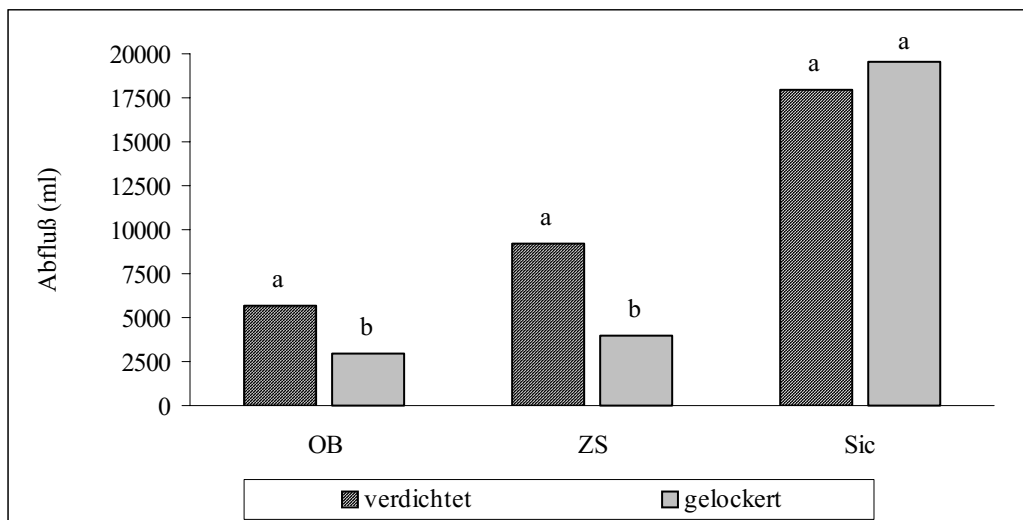


Abb. 26: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); T9, Beregnungsintensität: $50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

Im Versuch T15 wurde mit einer Intensität von $5 \text{ mm} \times 12 \text{ min}^{-1}$ in vierfacher Wiederholung (1 x täglich) beregnet. Hier konnten insgesamt nur geringe Mengen an Oberflächenabfluß aufgefangen werden und es wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten gefunden (Abb. 27). Die Lockerungsmaßnahmen haben bei dieser Beregnungsintensität jedoch zu einer signifikanten Verringerung des Zwischenschichtabflusses und darüber hinaus auch zu einer signifikanten Erhöhung des Sickerwasseranteils geführt.

Zu Termin T17 wurde wie im Versuch T15 beregnet, jedoch mit einem Zeitintervall von 30 min. Auch hier wurde nur ein geringer Oberflächenabfluß ohne signifikante Unterschiede zwischen den Varianten gemessen. Der Zwischenschichtabfluß der gelockerten Variante unterschied sich ebenfalls signifikant von dem der verdichteten Variante, da hier größere Wassermengen über der ungelockerten Pflugsohle abgeflossen sind. Beim Sickerwasser hat die Lockerung, wie in Versuch T15, zu einer signifikant höheren Versickerungsrate geführt.

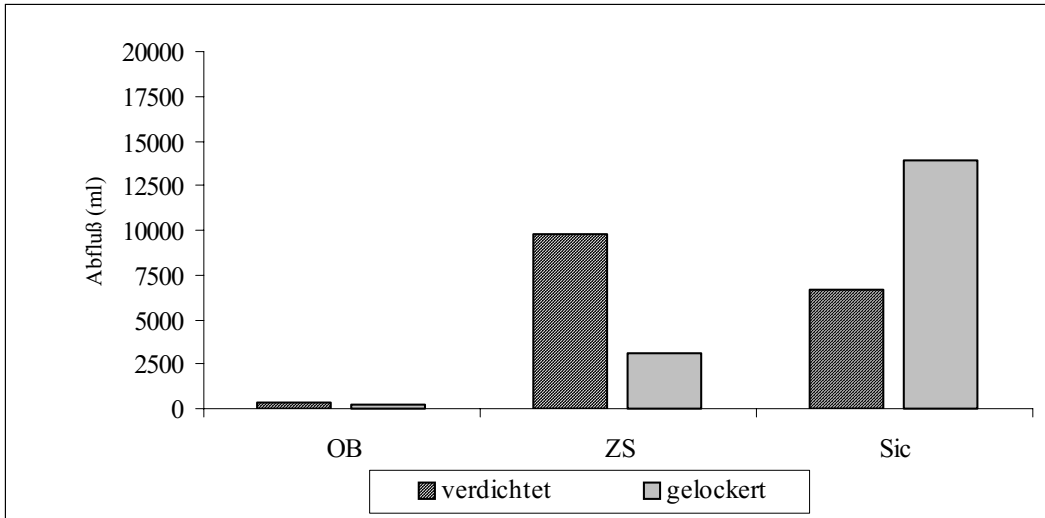


Abb. 27: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); T15, Beregnungsintensität: $4 \times 5 \text{ mm} \times 12 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

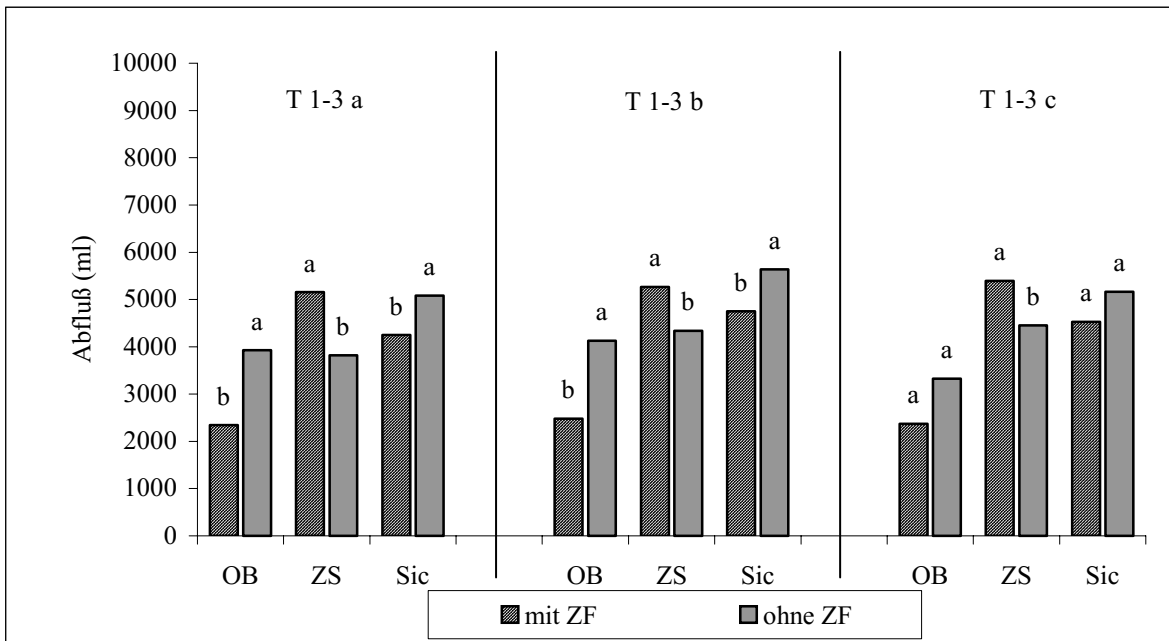


Abb. 28: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); T1-3 (a-c), Beregnungsintensität: $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

Tab. 8: Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei unterschiedlicher Beregnungsintensität (ml)

Termin	Beregnung	Abfluß	verdichtet		gelockert		mit ZF		ohne ZF	
T1-3a	25 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	OB	3832,50	a	2438,80	b	2345,00	b	3926,30	a
		ZS	6147,50	a	2835,00	b	5161,30	a	3821,30	b
		SIC	2036,30	b	7306,30	a	4255,00	b	5087,50	a
T1-3b		OB	4147,50	a	2463,80	b	2480,00	b	4131,30	a
		ZS	7078,80	a	2527,50	b	5268,80	a	4337,50	b
		SIC	2265,60	b	8127,50	a	4750,9	b	5641,3	a
T1-3c		OB	3188,80	a	2510,00	a	2371,30	a	3327,50	a
		ZS	7148,80	a	2750,00	b	5397,50	a	4456,30	b
		SIC	2387,50	b	7301,30	a	4526,30	a	5162,50	a
T5-7a	5 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	OB	263,63	a	186,88	a	46,75	b	403,75	a
		ZS	9943,80	a	2587,50	b	5561,30	a	6970,00	a
		SIC	6392,00	b	15724,00	a	10936,00	a	11180,00	a
T5-7 b		OB	242,25	a	295,13	a	53,38	b	484,00	a
		ZS	9178,80	a	3328,80	b	5810,00	a	6697,50	a
		SIC	6930,00	b	14425,00	a	10633,00	a	10693,00	a
T5-7 c		OB	296,13	a	309,38	a	3,00	b	552,50	a
		ZS	9942,50	a	3761,30	b	6512,50	a	7191,30	a
		SIC	6775,00	b	14757,50	a	10543,80	a	10988,80	a
T9	50 mm x 60 min ⁻¹ d ⁻¹	OB	5656,30	a	2918,80	b	3317,50	a	5257,50	a
		ZS	9163,80	a	4027,50	b	6621,30	a	6570,00	a
		SIC	17980,00	a	19525,00	a	19530,00	a	17975,00	a
T15	4 x 5 mm x 12 min ⁻¹ d ⁻¹	OB	310,00	a	245,50	a	108,00	b	447,50	a
		ZS	9823,80	a	3150,00	b	6277,50	a	6696,30	a
		SIC	6718,00	b	13921,00	a	10226,00	a	10413,00	a
T16	50 mm x 120 min ⁻¹ d ⁻¹	OB	6108,00	a	3394,00	a	3820,00	a	5681,00	a
		ZS	11688,00	a	5650,00	b	8031,00	a	9306,00	a
		SIC	15578,80	b	19352,50	a	18273,80	a	16837,50	a
T17	4 x 5 mm x 30 min ⁻¹ d ⁻¹	OB	762,50	a	150,00	b	157,50	b	755,00	a
		ZS	13395,00	a	2470,00	b	7258,00	a	8608,00	a
		SIC	3974,00	b	16395,00	a	18246,30	a	18900,60	a

Analog zum Einfluß der Lockerungsmaßnahmen wurde der Einfluß der gehäckselten Zwischenfrucht auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß geprüft (Tab. 8).

Während der ersten beiden Beregnungen des Versuches T1-3 mit $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Abb. 28) war festzustellen, daß die Zwischenfrucht zu einer signifikanten Verringerung des Oberflächenabflusses gegenüber den Varianten ohne Zwischenfrucht geführt hat. In der dritten Beregnung dieses Versuches war dieser Effekt lediglich noch als Tendenz erkennbar. Es wurde ein signifikanter Einfluß der Zwischenfrucht auf den Zwischenschichtabfluß bei allen drei Beregnungen des Versuches T1-3 festgestellt, da bei den Varianten mit Zwischenfrucht ein höherer Abfluß gemessen wurde. Der Einfluß der Zwischenfrucht auf den Sickerwasserabfluß war bei den ersten beiden Beregnungen deutlich ausgeprägt. Dieser Effekt wiederholte sich jedoch beim Versuch T1-3 c nicht mehr (Abb. 28).

Betrachtet man nun den Einfluß der Zwischenfrucht auf das Abflußgeschehen bei verminderter Beregnungsintensität von $5 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$ wie im Versuch T5-7 in (Tab. 8), so stellt man zwar eine signifikante Reduzierung des Oberflächenabflusses, aber keine Unterschiede zwischen den Varianten im Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß fest.

Abbildung 29 zeigt, daß der Anbau einer Zwischenfrucht in diesem Modellversuch zu keiner Veränderung des Abflußverhaltens bei einer starken Beregnung mit $50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$ geführt hat (T9).

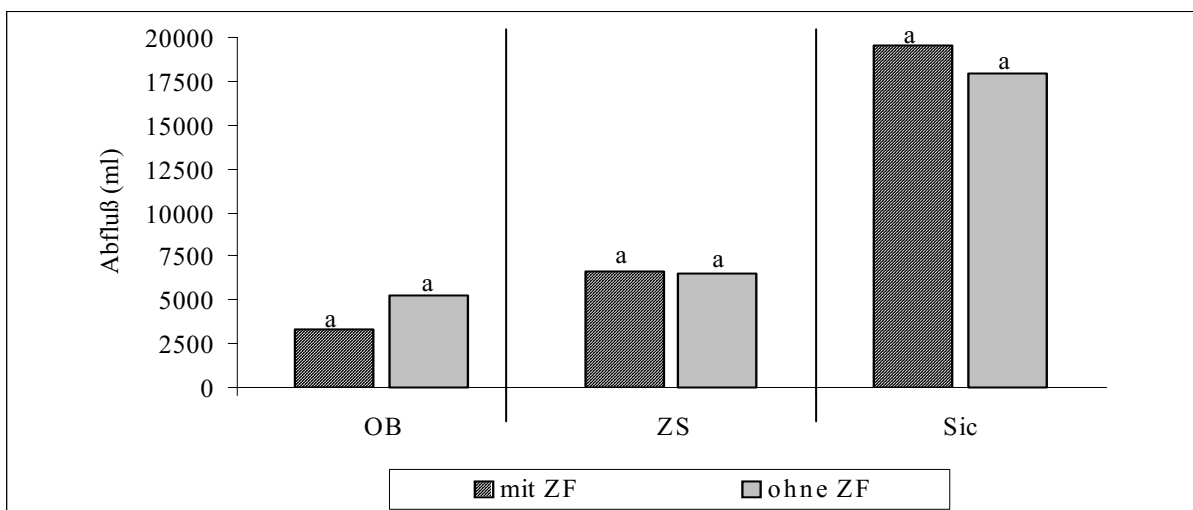


Abb. 29: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); T9, Beregnungsintensität: $50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

In Abbildung 30 ist der Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächenabfluß bei unterschiedlicher Beregnungsintensität dargestellt. Bei den Beregnungsversuchen T15 und T 17 wurde eine Niederschlagsintensität von 5 mm in 12 bzw. 30 min bei 4 Durchläufen simuliert. Beim Versuch T16 wurde mit einer Intensität von 50 mm x 120 min⁻¹d⁻¹ beregnet, der zweit höchsten Niederschlagsmenge bei den durchgeführten Beregnungen. Die Zwischenfrucht hat bei geringer Beregnungsintensität einen signifikanten Einfluß auf den Oberflächenabfluß ausgeübt und in beiden Fällen eine statistisch abgesicherte Reduzierung zur Folge. Bei hoher Intensität im Versuch T16 konnte dieser Einfluß dann nicht mehr statistisch abgesichert werden. Eine Reduzierung des Oberflächenabflusses ist hier wie auch im Versuch T9 (Abb. 29) nur noch tendenziell erkennbar. Wie Tabelle 8 zu entnehmen ist, ergaben diese Untersuchungen bei Zwischenschichtabfluß und Sickerwasseraustritt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Varianten.

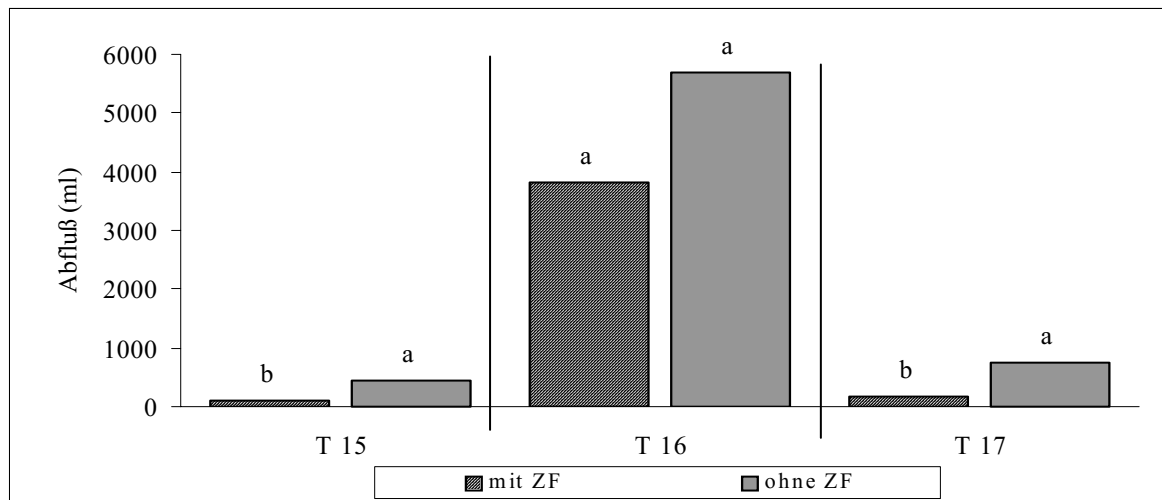


Abb. 30: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächenabfluß bei den Beregnungsversuchen T15, T16 und T17 (ml)

4.2.1.3 Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei natürlichem Niederschlag

Zwischen den einzelnen Beregnungsmaßnahmen im Jahre 2001 wurde der Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf das Abflußverhalten im Modellversuch auch bei natürlichem Regen geprüft.

Auf dem Versuchsfeld Poppelsdorf der Universität Bonn wurden 40 mm im Versuchszeitraum T10, 28 mm im Versuch T12 und 38 mm natürlicher Niederschlag im Versuchszeitraum T14 registriert. Diese Ereignisse unterschieden sich in der Niederschlagsdauer, in der Niederschlagssumme sowie auch in der Niederschlagsverteilung (Anhangtab. 25).

Beim Versuch T10 fielen etwa 36 vom 40 mm an zwei Tagen am Anfang und am Ende des vorgegebenen Zeitraumes. Beim Versuch T12 fiel fast die gesamte Niederschlagsmenge (26,7 mm) an einem Tag. Die Niederschläge des dritten Versuches T14 waren über die Versuchsdauer verteilt.

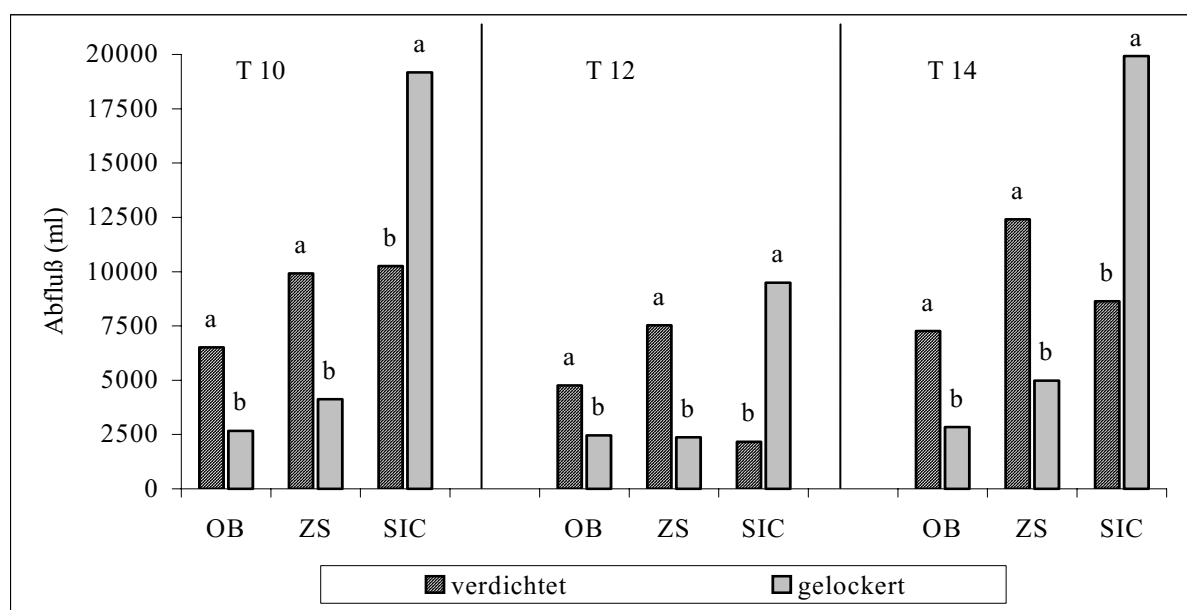


Abb. 31: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei natürlichem Regen (ml); T10, T12 und T14

Abbildung 31 zeigt bei allen drei Versuchen ein ähnliches Bild, trotz unterschiedlicher Niederschlagsmenge und -verteilung. Der Einfluß der Lockerung war bei den drei Versuchsterminen signifikant und führte zu einer Verringerung des Oberflächen- und Zwischenschichtabflusses in den gelockerten Varianten. Entsprechend wurde dann die Sickerwassermenge durch das Aufbrechen der Pflugsohle in allen Fällen signifikant erhöht. Bei den Terminen T10 und T14 (40 und 38 mm) wurden aufgrund der höheren Niederschläge

in allen Abflußarten auch tendenziell höhere Abflußmengen gemessen als bei dem Termin 12, wo nur 28 mm fielen.

In Abbildung 32 ist der Einfluß der Zwischenfrucht auf das Abflußverhalten dargestellt. Bei der statistischen Auswertung der Meßwerte wurden nicht so eindeutige Ergebnisse erzielt wie bei der Lockerung (Abbildung 31). Bei den Terminen T10 und T14 hat die Zwischenfrucht zu keiner signifikanten Reduzierung des Oberflächen- oder Zwischenschichtabflusses geführt. Beim Versuch 12 mit einer geringeren Niederschlagsmenge von 28 mm konnten hingegen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Jedoch wurden hier unerwartet geringere Abflußmengen bei den Varianten ohne Zwischenfrucht gemessen.

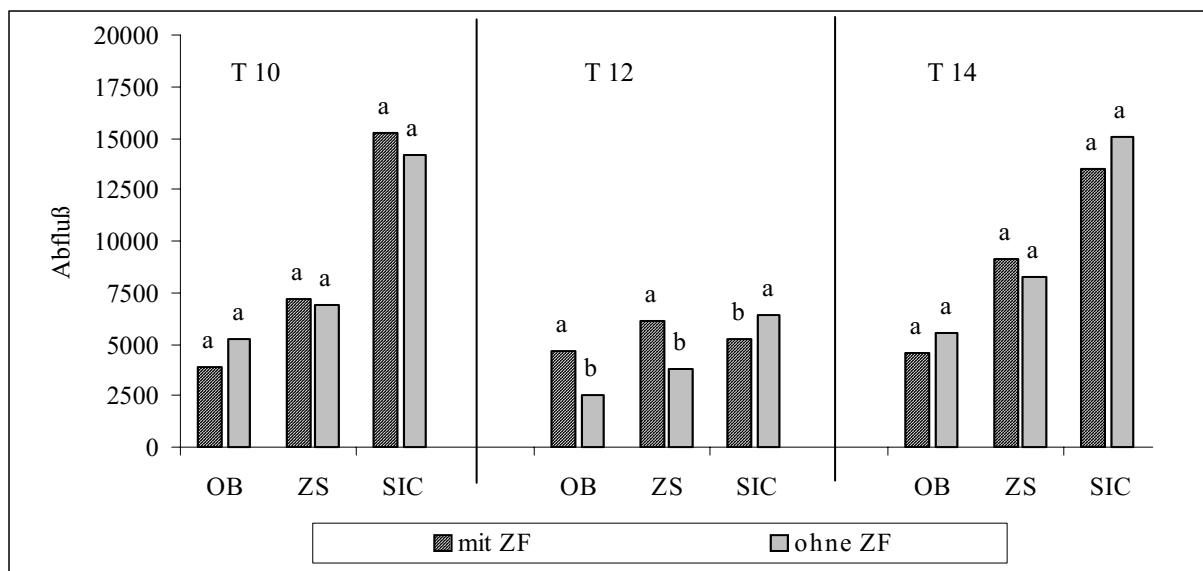


Abb. 32: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei natürlichem Regen (ml); T10, T12 und T14

4.2.1.4 Einfluß der Lockerung und der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei „Abtrocknungsversuchen“

Neben den Versuchen mit natürlichen Niederschlägen und den Beregnungsversuchen am Modell wurden auch Abflußmessungen bei abgedecktem Modell durchgeführt, so daß hier kein Niederschlag die Abflußmessungen beeinflussen konnte.

Diese „Abtrocknungsversuche“ (Tab. 5) wurden jeweils zweimal nach Beregnungsmaßnahmen (T4 und T8) und nach den Versuchen mit natürlichem Regen durchgeführt (T11 und T13). In den folgenden Abbildungen 33 und 34 sind die Meßwerte der Versuche T4, T8 und T11 dargestellt. Die Ergebnisse des Versuches T13 werden wegen eines Meßfehlers nicht berücksichtigt. Oberflächenwasser konnte hier wegen der fehlenden Beregnung bzw. der fehlenden Niederschläge nicht erfaßt werden.

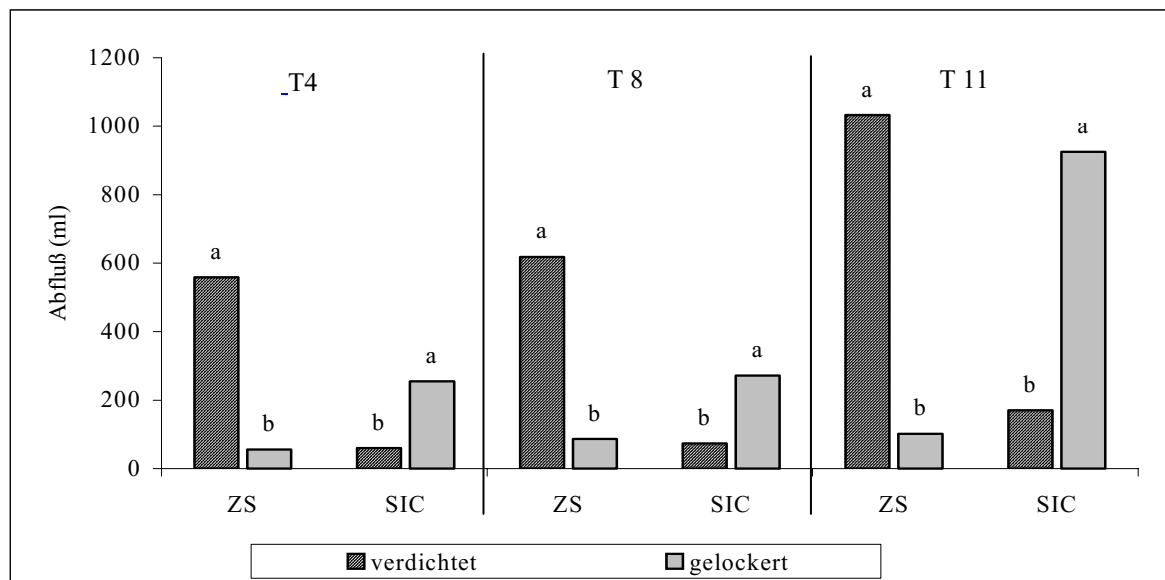


Abb. 33: Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei den „Abtrocknungsversuchen“ T4, T8 und T11 (ml)

Die Lockerung der Pflugsohle hatte bei den drei Abtrocknungsversuchen einen signifikanten Einfluß auf das Abflußgeschehen; sie führte zu einer Verringerung des Zwischenschichtabflusses und zu einer Erhöhung der Sickerwassermenge, sowohl nach den beiden Beregnungsversuchen (T1-3 und T5-7) als auch nach dem Versuch T10 mit 40 mm natürlichen Regen. In diesem Fall (T10) waren die gemessenen Abflußmengen insgesamt höher, da die Beregnungsintensität vor T4 und T8 entsprechend niedrig war (Tab. 5).

Der Einfluß der Zwischenfrucht führte hier jedoch zu keiner Veränderung der Abflußmengen (Abb 34).

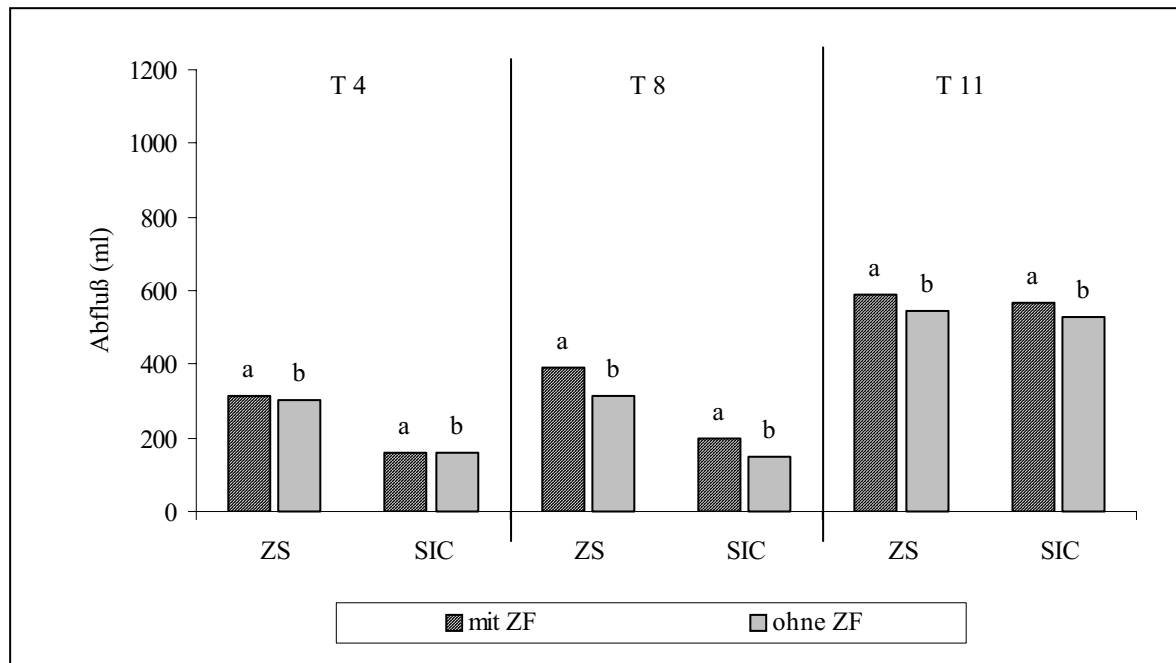


Abb. 34: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß bei den „Abtrocknungsversuchen“ T4, T8 und T11 (ml)

4.2.2 Physikalische Bodeneigenschaften

Jeweils am Ende der Abflußmessungen in den beiden Versuchsperioden 1999-2000 und 2000-2001 wurden zur Erfassung der Lagerungsdichte, des Porenvolumens und der Porenverteilung im Modell Stechzylinderproben entnommen, um zu prüfen, ob die Lockerung und der Anbau einer Zwischenfrucht einen Einfluß auf diese bodenphysikalischen Eigenschaften ausgeübt haben.

Die Auswertung der ersten Versuchsperiode 1999-2000 ergab, daß die Lockerung und der Zwischenfruchtanbau lediglich teilweise zu einer tendenziellen positiven Veränderung des Gesamtporenvolumens und der Porenverteilung geführt haben. Bei der Lagerungsdichte konnten jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. So führte die Lockerung zu einer signifikanten Verringerung der Lagerungsdichte, sowohl in der Oberkrume, als auch im Pflugsohlenbereich. Der Einfluß der Zwischenfrucht war ebenfalls signifikant und führte zu einer deutlichen Verringerung der Lagerungsdichte in beiden Tiefenbereichen.

In den Abbildungen 35 - 38 sind die Ergebnisse der Stechzylinderuntersuchungen in der Versuchsperiode 2000-2001 dargestellt. Die Lockerungsmaßnahme führte weder in der Oberkrume, noch im Pflugsohlenbereich zu einer statistisch absicherbaren Veränderung der Lagerungsdichte (Abb. 35). Hier wird jedoch deutlich, daß die Verdichtung zu einer höheren Lagerungsdichte gegenüber der Oberkrume geführt hat.

Das Gesamtporenvolumen wurde durch die Lockerung ebenfalls nicht signifikant beeinflusst. Hier hatte die Lockerung allerdings eine signifikante Erhöhung des Anteils an Mittelporen im Pflugsohlenbereich zur Folge. Die Unterschiede dieser Kennwerte zwischen Oberkrume und Pflugsohle waren jedoch gering.

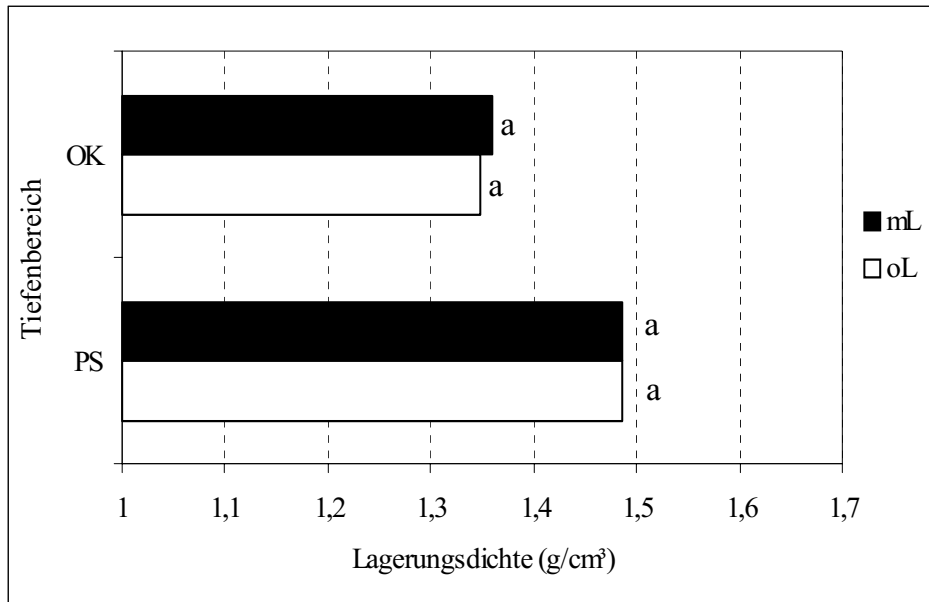


Abb. 35: Einfluß der Lockerung auf die Lagerungsdichte in der Oberkrume und im Pflugsohlenbereich (Modellversuch 2000-2001)

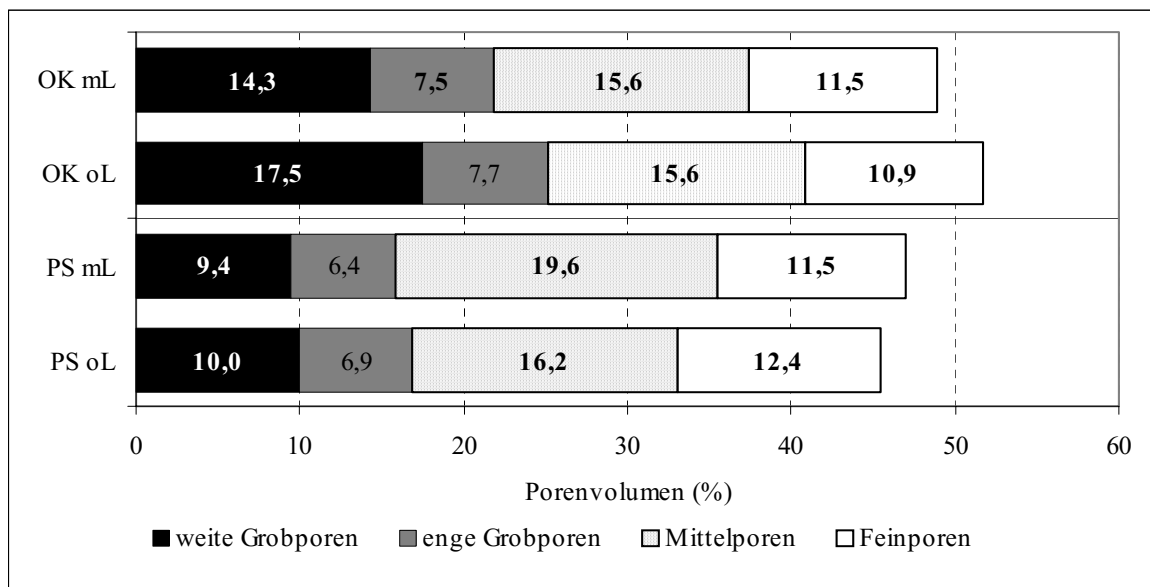


Abb. 36: Einfluß der Lockerung auf das Gesamtporenvolumen und die Porenverteilung in der Oberkrume und im Pflugsohlenbereich (Modellversuch 2000-2001)

Auch die Zwischenfrucht hat keinen signifikanten Einfluß auf die Lagerungsdichte in der Oberkrume ausgeübt (Abb. 37). Im Pflugsohlenbereich führte der Anbau der Zwischenfrucht jedoch zu einer Verringerung der Lagerungsdichte.

In Abbildung 38 ist erkennbar, daß die Zwischenfrucht in der Oberkrume keinen Einfluß auf das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung ausgeübt hat. Im Bereich der Pflugsohle führte der Anbau einer Zwischenfrucht zu einer signifikanten Veränderung des Gesamtporenvolumens. In der Porenverteilung wurden lediglich bei den weiten Grobporen signifikante Unterschiede ermittelt (Anhangtab. 29).

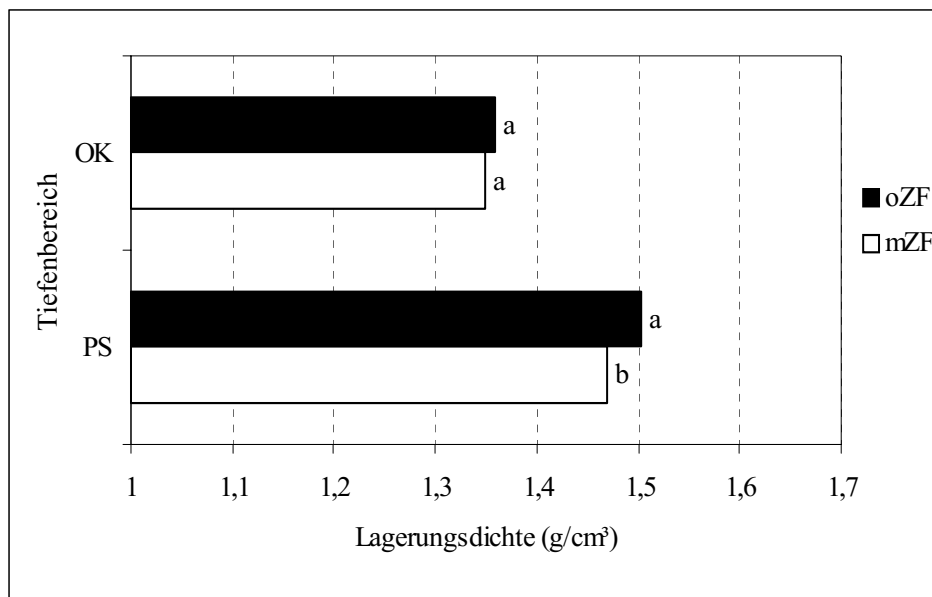


Abb. 37: Einfluß der Zwischenfrucht auf die Lagerungsdichte in der Oberkrume und im Pflugsohlenbereich (Modellversuch 2000-2001)

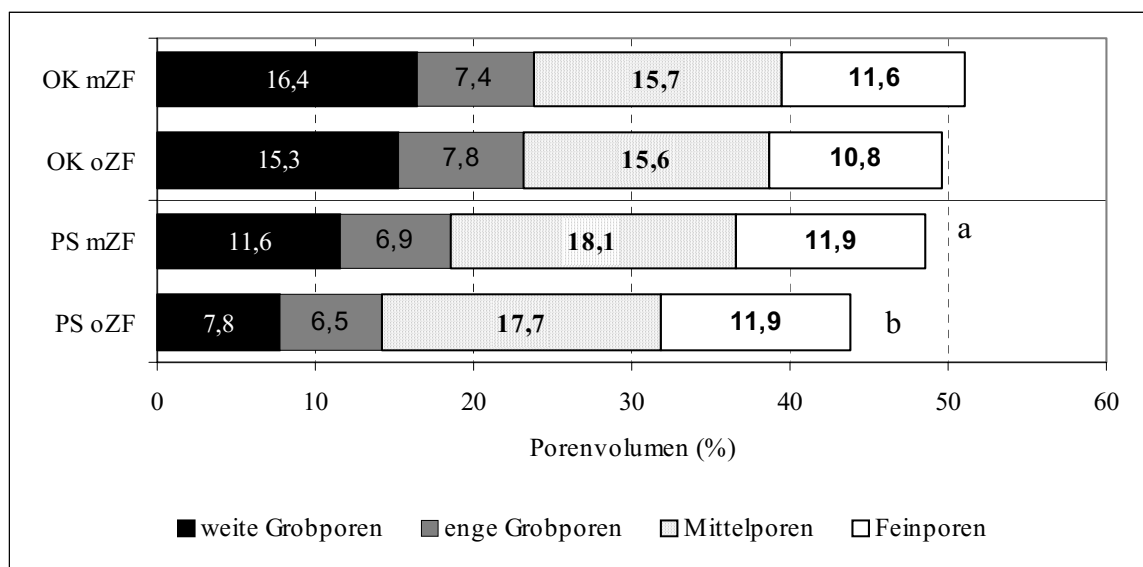


Abb. 38: Einfluß der Zwischenfrucht auf das Gesamtporenvolumen und die Porenverteilung in der Oberkrume und im Pflugsohlenbereich (Modellversuch 2000-2001)

4.3 Befragung und Eindringwiderstandsmessungen

Aus dem Fragenkatalog über das Bundesbodenschutzgesetz wurden drei Fragen ausgewählt, die sich mit dem Informationsstand der Betriebsleiter über das Gesetz befaßten. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die Herkunft der Informationen gelegt.

Eine große Anzahl der Betriebsleiter hat angegeben, aus Beratungsveranstaltungen, von Beratern oder aus der Fachpresse vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren zu haben (Abb. 39). Bei der Beantwortung dieser Frage waren Mehrfachnennungen möglich. Dabei ist zu bemerken, daß 11 % der Befragten angegeben haben, „noch gar nichts“ über das Bundesbodenschutzgesetz erfahren zu haben (Abb. 39), während sich aber 69 % der Befragten „grundsätzlich“ oder „im Großen und Ganzen“, 31 % der Betriebsleiter jedoch „unzureichend“ bzw. „nicht informiert“ fühlten (Abb. 40).

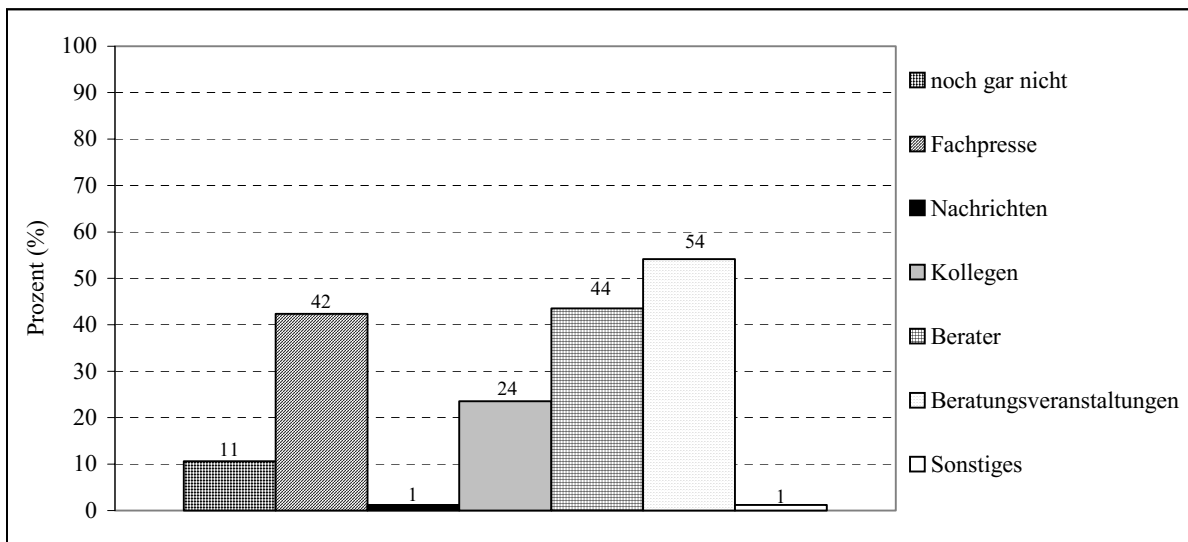


Abb. 39: Wie haben Sie vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren?

Abbildung 41 beantwortet die Frage „Inwiefern sehen Sie Konfliktpotential zwischen dem Bundesbodenschutzgesetz und Ihrer Bodenbewirtschaftung?“ Eine große Anzahl der Betriebsleiter (59 %) gab an, kein Konfliktpotential zu sehen, davon allerdings 20 % aufgrund mangelnder Kenntnis über das Bundesbodenschutzgesetz. 33 % der Befragten sahen bei Erosionsproblemen eventuelle Konflikte mit der Gesetzgebung und 8 % erwarteten Einschränkungen in ihrer Wirtschaftsweise.

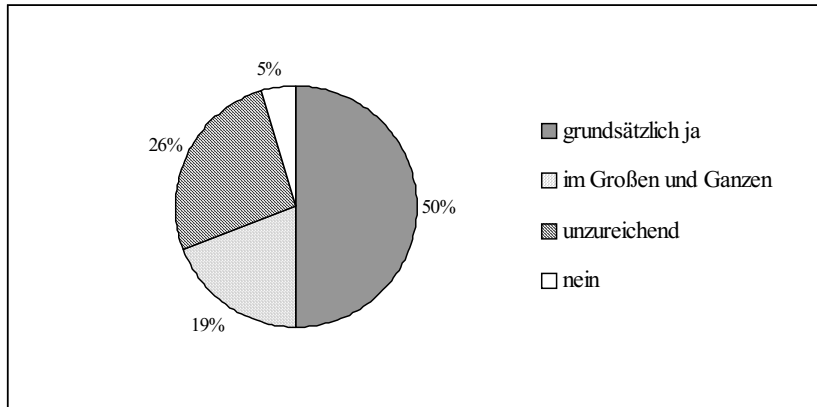


Abb. 40: Fühlen Sie sich über das Bundesbodenschutzgesetz informiert?

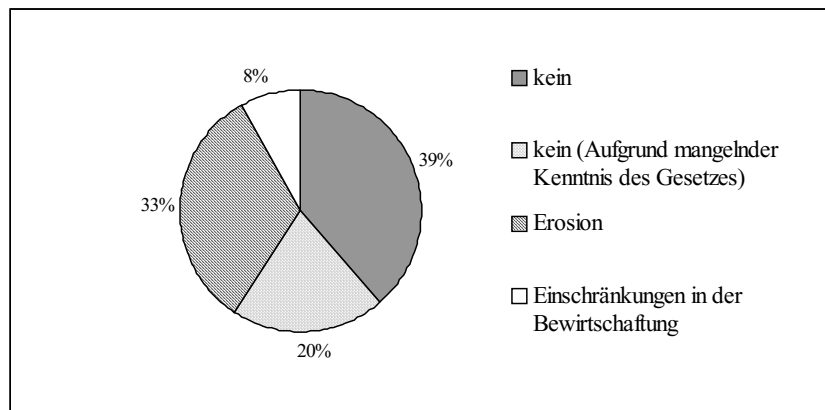


Abb. 41: Inwiefern sehen Sie Konfliktpotential zwischen dem Bundesbodenschutzgesetz und Ihrer Bodenbewirtschaftung?

Dem Fragenkomplex über Bodenschadverdichtungen wurden zwei Fragen entnommen. Die erste Frage betrifft die Kontrolle der Flächen durch den Betriebsleiter mit einfachen Methoden wie Spatendiagnose oder Handbodensonde (Abb. 42). Die Auswertung dieser Frage ergab, daß 50 % der Betriebsleiter ihre Flächen „gar nicht“ oder „zuletzt in der Ausbildung“ kontrolliert haben. 36 % führen „Stichproben“ durch und 14 % „regelmäßig“ eine Spatendiagnose oder kontrollieren ihre Flächen mit einer Handbodensonde.

Die zweite Frage betraf die eigene Einschätzung über das Vorkommen von Bodenschadverdichtungen auf den Betriebsflächen (Abb. 43). Dabei zeigte sich, daß 20 % der Befragten angaben, keine Anzeichen für Bodenverdichtungen auf ihren Flächen zu beobachten und erwartungsgemäß eine große Anzahl (76 %) lediglich im Vorgewende.

Ein relativ hoher Anteil der Befragten (21 % bzw. 15 %) sah Anzeichen dafür, daß an bestimmten Stellen oder gar auf ganzen Parzellen Schadverdichtungen vorliegen, ohne Berücksichtigung des Vorgewendes.

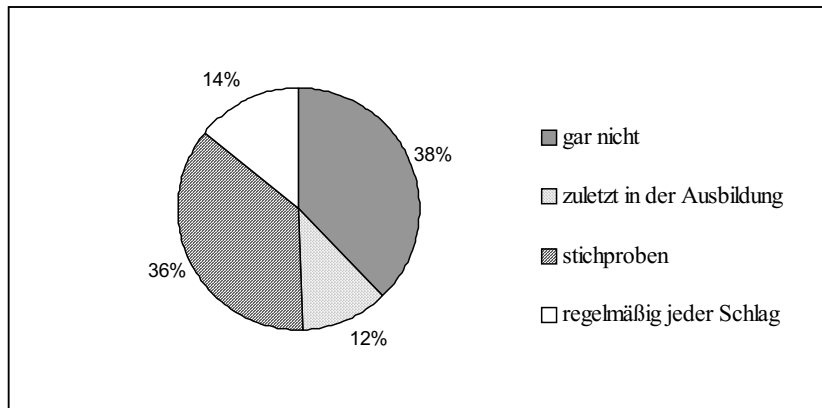


Abb. 42: Wie oft kontrollieren Sie Ihre Flächen mit Spaten oder Handbodensonde auf Bodenschadverdichtungen?

Eine große Anzahl der Betriebsleiter (60 %) erachtete konservierende Bodenbearbeitungsverfahren hinsichtlich der Vermeidung von Bodenschadverdichtungen als „nicht besser“ geeignet bzw. „nicht geeignet“ (Abb. 44), die übrigen 40 % halten diese Verfahren für sehr gut geeignet.

Abbildung 45 stellt die Gründe dar, weshalb die befragten Betriebsleiter nicht auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren umstellen wollen. Hauptgrund ist demnach vor allem die Angst vor Krankheits- und Unkrautdruck. Etwa die Hälfte der Befragten glaubte, daß ihr bisheriges Verfahren gut funktioniert. 27 % bzw. 36 % gaben an, eine „unzureichende Beratung“ bzw. „keine Kenntnisse“ über konservierenden Bearbeitungsverfahren zu haben.

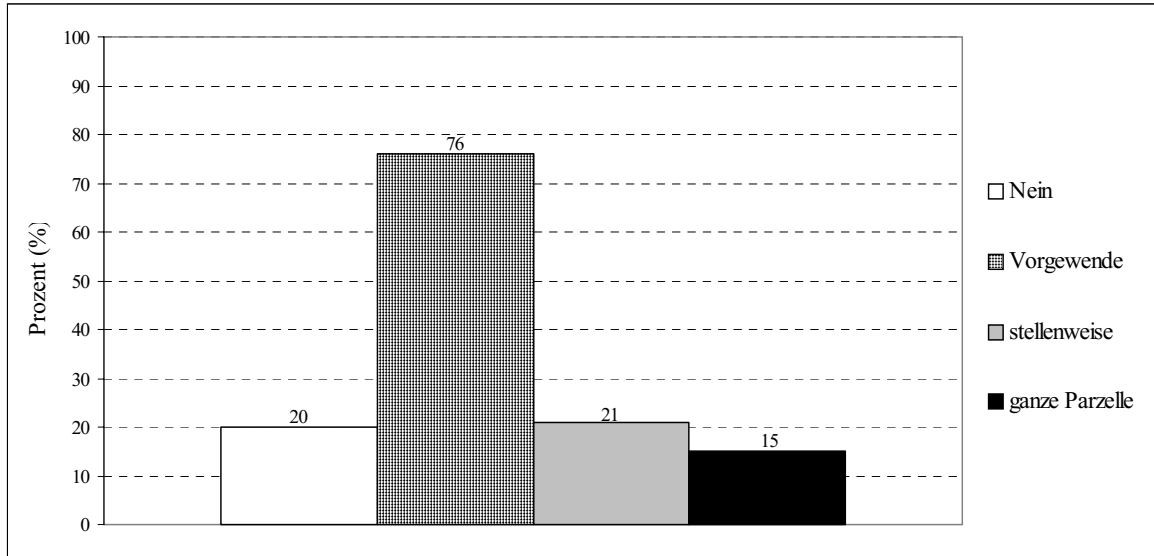


Abb. 43: Haben Sie auf Ihren Flächen Anzeichen für Bodenschadverdichtungen beobachten können?

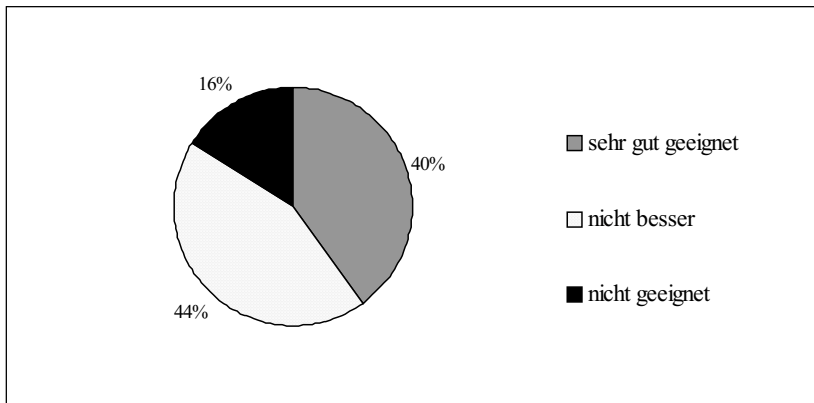


Abb. 44: Wie beurteilen Sie Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich der Vermeidung von Bodenschadverdichtungen?

Die zeitgleiche Durchführung der Befragung und der Eindringwiderstandsmessungen schloß eine Beeinflussung der Antworten durch die Kenntnis der Messungen aus.

Die Klassifizierung der Flächen (Tab. 6) hat ergeben, daß in den Regionen Euskirchen-Düren und Köln-Bonn die meisten Flächen im oberen Krumbereich (0-20 cm) „nicht“ oder nur „gering“ verdichtet sind. Im Raum Mettmann waren hingegen 12 % der Flächen in diesem Tiefenbereich „partiell“ verdichtet, ohne Berücksichtigung der Vorgewende (Abb. 46).

Die Flächen mit Werten $> 1,8$ MPa waren in den einzelnen Regionen ähnlich häufig verteilt. 60-70 % der Werte lagen im Bereich 1,8–2,3 MPa und jeweils 20 % sogar in der Stufe 2,3–2,8 MPa. Bei der Interpretation dieser Werte ist allerdings zu beachten, daß in den Räumen Euskirchen-Düren und Köln-Bonn eine geringere Anzahl von Meßkurven insgesamt Werte $> 1,8$ MPa erreichte als im Raum Mettmann (Abb. 46 und 47).

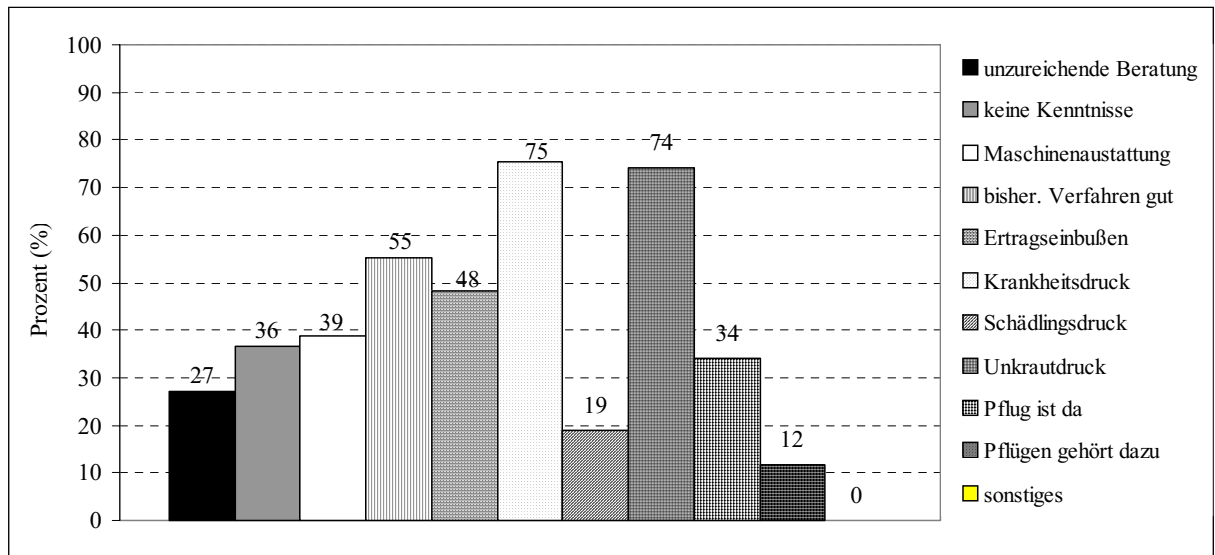


Abb. 45: Was hat Sie davon abgehalten, auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren umzustellen?

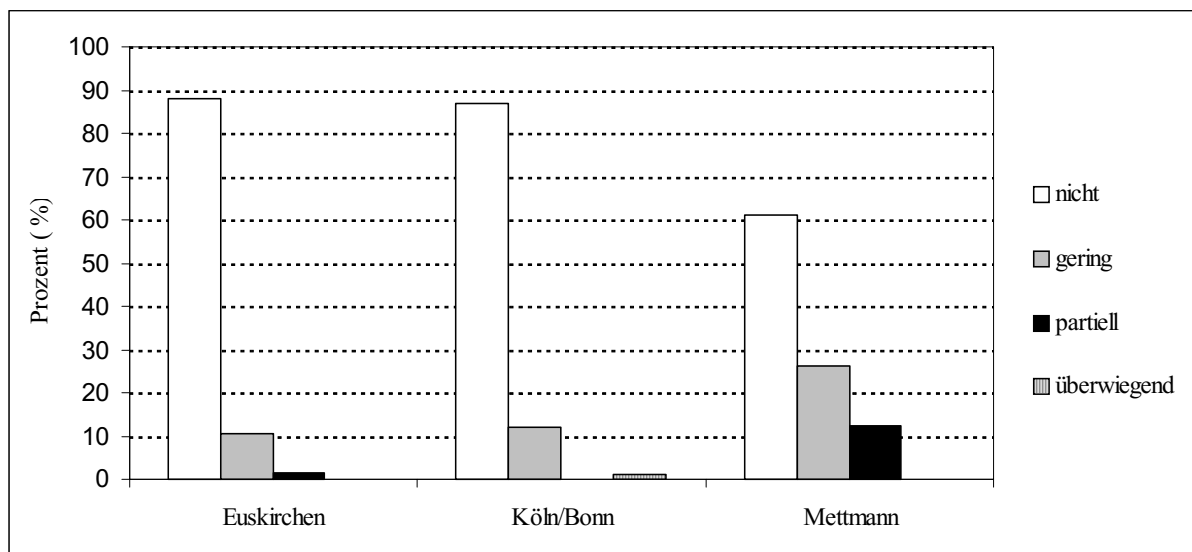


Abb. 46: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen mit Werten $> 1,8$ MPa (0-20 cm Tiefe)

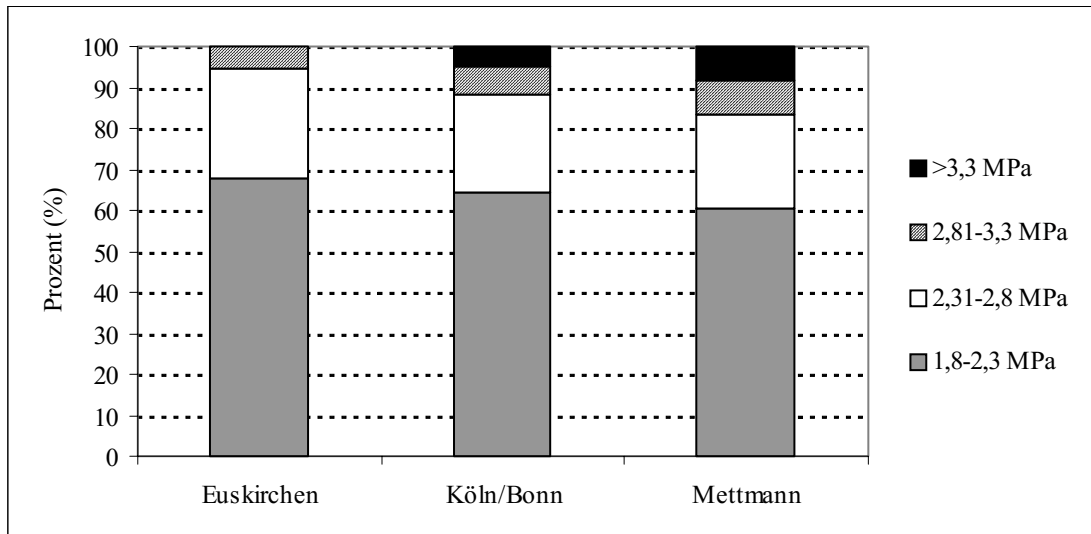


Abb. 47: Klassifizierung der Werte > 1,8 MPa im oberen Krustenbereich (0-20 cm Tiefe)

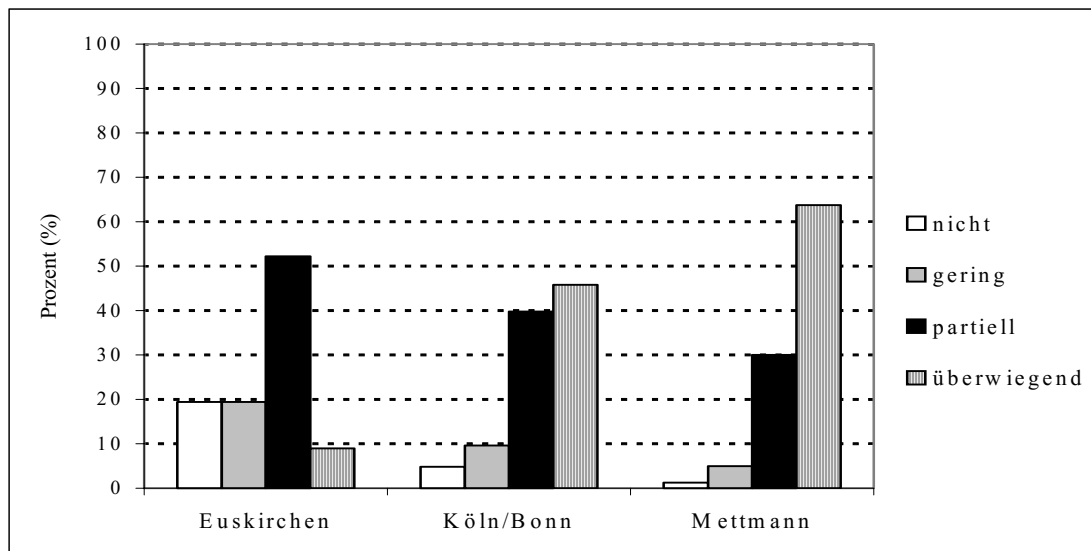


Abb. 48: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen mit Werten > 1,8 MPa in der Krustenbasis (20-45 cm Tiefe)

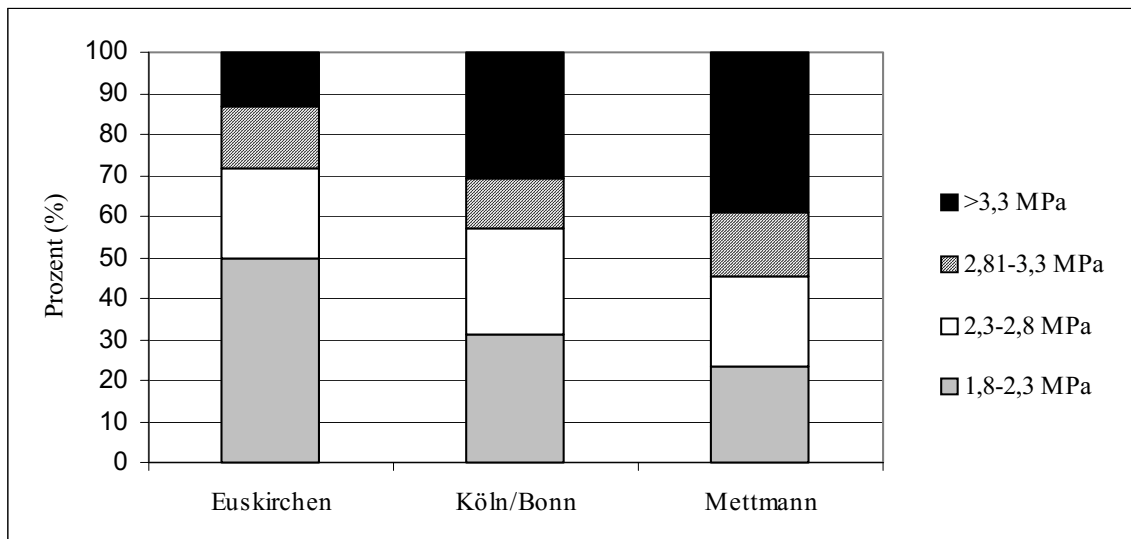


Abb. 49: Klassifizierung der Werte > 1,8 MPa in der Krumbasis (20-45 cm Tiefe)

Analog zur Auswertung des oberen Krumbereiches (0-20 cm Tiefe) ist in den folgenden Abbildungen 48 und 49 die Klassifizierung der Meßwerte für die Krumbasis (20-45 cm Tiefe) dargestellt. Der Krumbasisbereich wurde so gewählt, daß eine eventuell vorhandene Pflug- bzw. Schlepperradsole immer erfaßt werden konnte. Die Werte in der Krumbasis sind heterogener als die Werte im oberen Krumbereich. So ist Abbildung 48 zu entnehmen, daß der Anteil der „nicht“ bzw. „gering“ verdichteten Flächen in allen drei Regionen wesentlich geringer ist als in der Oberkrume, dafür aber die Anteile der „partiell“ bzw. „überwiegend“ verdichteten Flächen prozentual höher liegen. Betrachtet man diese in den einzelnen Regionen, so ist festzustellen, daß die Gesamtanteile dieser beiden Klassen („partiell“ und „überwiegend“) im Raum Euskirchen-Düren mit etwa 60 % geringer sind als im Raum Mettmann mit 95 %. Im Raum Mettmann liegt außerdem der Anteil der Flächen in der Klassifizierung „überwiegend verdichtet“ mit 65 % am höchsten.

Abbildung 49 ist die detaillierte Klassifizierung der Werte > 1,8 MPa in den drei Regionen zu entnehmen. Auch hierbei ist zu berücksichtigen, daß die absolute Anzahl der Meßwerte in den einzelnen Regionen unterschiedlich ist, und zwar im Raum Euskirchen-Düren am geringsten und im Raum Mettmann am höchsten. Um so mehr fällt ins Gewicht, daß im Raum Mettmann über 55 % der Werte im Verdichtungsbereich > 2,8 MPa liegen und davon allein 40 % in der höchsten Klasse mit Werten > 3,3 MPa.

5. Diskussion

Die Infiltration des Niederschlagswassers wird durch eine Krumbasisverdichtung (Pflugsohle) gestört. Das Wasser wird oberhalb der Verdichtung gestaut und dadurch werden Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß gefördert.

Ziel dieser Arbeit sind Untersuchungen zum Wasserabfluß, vor allem zum Zwischenschichtabfluß, der unterirdisch auf einer Krumbasisverdichtung abfließt und nicht senkrecht in den Boden infiltrieren kann. Der Zwischenschichtabfluß trägt zusammen mit dem Oberflächenabfluß zu einem schnelleren Ableiten des Niederschlags- und Bodenwassers in den Vorfluter bei und kann so die Hochwassergefahr erhöhen.

Darüber hinaus sollte die Frage geprüft werden, inwieweit ackerbauliche Maßnahmen zur Verringerung der Abflußkomponenten beitragen können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde einmal der Einfluß von Lockerungsmaßnahmen, d.h. das Aufbrechen von Krumbasisverdichtungen (Pflugsohlen) untersucht, wodurch eine Infiltration in tiefere Bodenschichten gefördert werden sollte. Eine weitere Maßnahme war der Anbau von Zwischenfrüchten. Durch ihren Wasserverbrauch und durch die erosionshemmende Wirkung der Pflanzen und Pflanzenreste können sie zu einer Verlangsamung des Abflusses von Niederschlagswasser in den Vorfluter beitragen.

Es wurden Freiland- und Modellversuche zur Messung des Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabflusses angelegt. Beim Modellversuch wurde in einer der Untersuchungsperioden ein Regensimulator eingesetzt, um Abflußmessungen unter kontrollierten Niederschlagsbedingungen durchführen zu können. Der Einsatz eines Regensimulators ermöglichte auch die Zeiterfassung bis zum Abflußbeginn aller Abflußkomponenten. Darüber hinaus wurden Abflußmessungen in so genannten „Abtrocknungsversuchen“ durchgeführt, bei denen der Abfluß nach einer Beregnung oder einem natürlichen Niederschlagsereignis ohne zusätzliche Wasserzufuhr gemessen werden konnte.

Der Modellversuch mit dem von KROMER und VÖHRINGER (1998) gebauten „Bonner Regensimulator“ wurde nach dem Versuchsplan in Abbildung 5 angelegt und nach dem Plan in Tabelle 5 berechnet.

Zusätzlich zu den Abflußmessungen im Freiland und am Modell wurde in drei ausgewählten Regionen in Nordrhein-Westfalen die Verbreitung von Bodenverdichtungen auf Ackererschlägen untersucht. Zeitgleich mit dieser Untersuchung wurde eine Befragung bei 85 landwirtschaftlichen Betrieben in Nordrhein-Westfalen durchgeführt, um den aktuellen Wissensstand der verantwortlichen Betriebsleiter über das Bundesbodenschutzgesetz und über das Vorkommen von Bodenverdichtungen auf ihren ackerbaulich genutzten Flächen zu erfassen.

5.1 Wirkung der Lockerungsmaßnahmen

Arbeitshypothese I:

Die mechanische Lockerung von Krumbasisverdichtungen fördert die Infiltration des Niederschlagswassers, verringert die Gefahr von Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß und verzögert so den Zufluß in den Vorfluter.

5.1.1 Freilandversuche

Die Versuche zur Messung der Abflußkomponenten mit besonderer Berücksichtigung des Zwischenschichtabflusses wurden auf ausgewählten Standorten in Nordrhein-Westfalen angelegt. Die Untersuchungen wurden während der Winterhalbjahre 1999-2000 und 2000-2001 durchgeführt. Die Böden des Versuchsstandortes Frankenforst wurden nach der Korngrößenanalyse und Einteilung entsprechend der AG BODEN, K4 in die Bodenart Tonschluffe (tu), Untergruppe Lu, eingestuft (Tab. 1). Der Boden des Standortes Wülfrath wurde ebenfalls als Tonschluff (tu), Untergruppe Ut4, klassifiziert. Somit sind diese schluffhaltigen Böden als verdichtungsanfällig einzustufen (FREDE, 1991). Die Flächen wurden bis zum Zeitpunkt der Untersuchungen alljährlich in den Getreide-/Zuckerrüben-Fruchtfolgen bzw. zu Mais gepflügt. Auf dem Standort Wülfrath wurde in der zweiten Untersuchungsperiode (2000-2001) Winterraps nach Getreide angebaut. Alle Böden der Versuchsflächen wiesen Pflugsohlenverdichtungen auf. Die Eindringwiderstandsmessungen auf diesen Flächen ergaben Meßwerte > 2.0 MPa im Bereich der Krumbasisverdichtung. Die Hangneigung der Flächen betrug 8-10 % in Frankenforst (Schlag 1), 12 % in Frankenforst (Schlag 8) und 13 % in Wülfrath. Somit erfüllten alle Flächen die Voraussetzungen für die Untersuchungen über den Einfluß von Lockerungsmaßnahmen auf den Zwischenschichtabfluß. Meßtechnisch bedingt wurde der Oberflächenabfluß vom Zwischenschichtabfluß getrennt und konnte so in die Untersuchungen integriert und beurteilt werden. Die Untersuchungen wurden nach den in den Abbildungen 1- 3 (Kapitel 3) dargestellten Versuchsplänen und Meßeinrichtungen durchgeführt.

Der Einfluß der Lockerungsmaßnahmen auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß ist in Kapitel 4.1.1.1 in den Abbildungen 8 bis 13 dargestellt. Bei den in allen Abbildungen aufgeführten Niederschlägen handelt es sich um die wöchentlich bis zum Meßtermin kumulierten Regenmengen. Die Abbildungen 8 bis 13 zeigen, daß sich die Schwankungen in den Niederschlagssummen der Standorte und Jahre in den unterschiedlichen Abflußmengen wider-

spiegeln. Lediglich an den letzten Meßterminen im März und April der entsprechenden Versuchsperioden konnte dieser Zusammenhang nicht festgestellt werden. Die zu diesen Meßterminen verminderten Abflußmengen sind vor allem auf den steigenden Wasserverbrauch der wachsenden Kulturen zurückzuführen.

Standort Frankenforst

Beim Oberflächenabfluß des Standortes Frankenforst (2000-2001) zeigten die gelockerten Varianten (mL) bei der Mehrzahl der Termine tendenziell geringere Abflußmengen als die ungelockerten Varianten (oL). An sieben Meßterminen führte die Lockerung zu einer signifikanten Verringerung des Oberflächenabflusses (Abb. 8).

Betrachtet man den Zwischenschichtabfluß in denselben Parzellen (Abb. 9), so stellt man zunächst fest, daß die Lockerung bei fast allen Terminen auch zu einer signifikanten Verringerung des Zwischenschichtabflusses führte. Besonders auffallend ist dabei, daß das mittlere Niveau des Zwischenschichtabflusses bei den Varianten ohne Lockerung deutlich höher war als das des entsprechenden Oberflächenabflusses. So liegt der Zwischenschichtabfluß über alle Termine hier bei 576 ml und der des Oberflächenabflusses nur bei 212 ml. Die Mittelwerte der Varianten „mit Lockerung“ lagen etwa auf gleichem Niveau. Daraus ergibt sich, daß die Lockerung auf diesem Standort unterschiedlich auf die Abflußkomponenten gewirkt hat. Der Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß ist deutlich stärker ausgeprägt als der auf den Oberflächenabfluß. Dieser Zusammenhang weist darauf hin, daß das in den Boden infiltrierende Wasser zunächst auf der Verdichtung gestaut und dann als Zwischenschichtabfluß weitergeleitet wird. Ein Aufbrechen der Krumbasisverdichtung kann also die Infiltration in tiefere Bodenschichten fördern.

Standort Wülfrath

Ähnlich wie auf dem Standort Frankenforst hat die Lockerung auch in Wülfrath (1999-2000) bei 8 von 23 Meßterminen zu einer signifikanten Verringerung des Oberflächenabflusses auf den gelockerten Varianten geführt. Die mittleren Abflußmengen über alle Termine lagen etwas höher als in Frankenforst. Ab Termin 19 wurden hier nur noch sehr geringe Abflußmengen gemessen trotz hoher Niederschläge (Abb. 10). Dies ist mit den großen Wachstumsraten und dem dadurch bedingten hohen Wasserverbrauch der Wintergerste ab März zu erklären. Durch den erhöhten Wasserverbrauch der Wintergerste kann der Boden dann auch wieder mehr Niederschlagswasser aufnehmen.

Bei 15 von 23 Meßterminen wurden an diesem Standort signifikant geringere Zwischenschichtabflußmengen auf den gelockerten Varianten gemessen. So konnte hier der gleiche Effekt erzielt werden wie auf dem Standort Frankenforst. In Wülfrath unterlag die Niederschlagsverteilung starken (Abb. 11). Auch hier konnten beim Zwischenschichtabfluß höhere

Abflußmengen als beim Oberflächenabfluß gemessen werden. Es wurde jedoch beobachtet, daß die Unterschiede im Zwischenschichtabfluß zwischen den Varianten auf einem höheren Niveau lagen. Die mittleren Abflußmengen über der Zwischenschicht der ungelockerten Varianten lagen hier bei 734 ml und der gelockerten Varianten bei 195 ml.

Wie in Frankenforst (1999-2000), so kam es auch hier zu einer Anstauung von Niederschlagswasser auf der Pflugsohle, das dann auf der Verdichtung verstärkt hangabwärts floß.

Auf dem Standort Wülfrath wurde auch der Frage nachgegangen, wie lange wirkt eine Lockerungsmaßnahme nach? So wurde der Versuch in der zweiten Untersuchungsperiode (2000-2001) wieder auf derselben Fläche, mit denselben Parzellen und in derselben Anordnung angelegt. Im Unterschied zur vorhergehenden Untersuchungsperiode wurde im Versuchszeitraum 2000-2001 keine Lockerung mehr durchgeführt.

Die Ergebnisse aus dem Untersuchungszeitraum 2000-2001 auf dem Standort Wülfrath sind in den Abbildungen 12 und 13 dargestellt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Abflußmenge und Niederschlag besonders deutlich. Der bereits in Frankenforst (1999-2000) und auch in Wülfrath (1999-2000) festgestellte Effekt des verminderten Abflusses bei verstärktem Wachstum der Kulturpflanze (hier Winterraps) konnte auch hier wieder beobachtet werden.

Beim Oberflächenabfluß konnte lediglich an 3 von 25 Meßterminen ein signifikanter Einfluß der Lockerung festgestellt werden. Die Abflußmengen der beiden Versuchsvarianten waren hier weitgehend gleich, so daß die Lockerung hierbei kaum zur Wirkung kam.

Der Zwischenschichtabfluß zeigte - wie beim Oberflächenabfluß - nur an wenigen Terminen (3 von 25) signifikante Unterschiede. Es sind jedoch tendenziell höhere Abflußmengen in den Varianten ohne Lockerung erkennbar.

Dieser veränderte Versuch ohne erneute Lockerung läßt die Schlußfolgerung zu, daß Lockerungsmaßnahmen lediglich im ersten Anwendungsjahr zu einer Verringerung des Abflusses führen, das gilt insbesondere für den Zwischenschichtabfluß.

In den Abbildungen 14 bis 19 sind die Ergebnisse der Stechzylinderuntersuchungen auf den Standorten Frankenforst und Wülfrath dargestellt. Die Proben wurden jeweils aus drei Tiefen entnommen: Aus der Oberkrume (OK, 4-8 cm), aus dem Pflugsohlenbereich (PS, zwischen 25 und 35 cm) und aus dem Unterboden (UB, 35-45 cm) unterhalb der Krumenbasisverdichtung.

Die Untersuchungen am Ende der jeweiligen Versuchsperioden ergaben bei der Lagerungsdichte keine signifikanten Unterschiede. Bei einigen Varianten konnte die erwartete Verringerung der Lagerungsdichte durch die Lockerung lediglich tendenziell in der Oberkrume und im Pflugsohlenbereich festgestellt werden (Abb. 14, 16 und 17).

Die Untersuchungen des Porenvolumens ergaben auf keinem Standort signifikante Unterschiede zwischen den Varianten, das gilt auch für die Porengrößenverteilung. Die Untersuchungen auf dem Standort Frankenforst hinsichtlich der Porenverteilung ergaben kein einheitliches Bild. Auf dem Standort Wülfrath kam es zu einer Verschiebung der Größenverteilung in den beiden Untersuchungsjahren. So zeigen die Abbildungen 18 und 19, daß sich die zunächst einheitliche Verteilung der Porengrößen in der Untersuchungsperiode 1999-2000 nach der nächsten Periode verschoben hat. Bemerkenswert ist hier die für den Wasserhaushalt ungünstige Erhöhung der Feinporen bei gleichzeitiger Verringerung der Mittelporen. Aus den Untersuchungsergebnissen zu Lagerungsdichte und Porenvolumen lassen sich für die Fragestellung dieser Arbeit keine Rückschlüsse ziehen.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die hier durchgeführten Lockerungsmaßnahmen zu unterschiedlichen Veränderungen im Abflußverhalten des Niederschlagswassers geführt haben. Der Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß war bei beiden Standorten deutlich stärker ausgeprägt als der auf den Oberflächenabfluß. Dieser Zusammenhang weist darauf hin, daß das in den Boden infiltrierende Wasser auf der Verdichtung gestaut und als Zwischenschichtabfluß weitergeleitet wird. Die niedrigeren Zwischenschichtabflußmengen der gelockerten Varianten in der ersten Versuchsperiode zeigen weiterhin, daß ein Aufbrechen der Krumenbasisverdichtung zu einer besseren Infiltration in tiefere Bodenschichten führen kann.

Durch den Versuch auf dem Standort Wülfrath in der zweiten Versuchsperiode (2000-2001) konnte gezeigt werden, daß Lockerungsmaßnahmen lediglich im ersten Anwendungsjahr zu einer Verringerung des Abflusses führen. Dies gilt insbesondere für den Zwischenschichtabfluß

5.1.2 Modellversuch

5.1.2.1 Abflußbeginn

Im Modellversuch konnte neben dem Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß auch der Sickerwasserabfluß gemessen werden. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, wurde durch den Einsatz des Regensimulators weiterhin die Zeiterfassung bis zum Abflußbeginn der jeweiligen Abflußkomponenten ermöglicht. In den Abbildungen 22 und 23 sowie in Tabelle 7 sind die Untersuchungsergebnisse über den Einfluß der Lockerungsmaßnahmen auf den Beginn des Abflusses dargestellt.

Die Lockerung hat bei keinem Beregnungsversuch zu einer signifikanten Verzögerung des **Oberflächenabflusses** geführt, d.h. der Zeitpunkt bis zum Abflußbeginn des Oberflächenwassers war bei allen Varianten innerhalb eines Beregnungsversuches immer gleich. Zwischen den Beregnungsversuchen bestanden jedoch Unterschiede. Betrachtet man die Termine T5-7 a-c, T15 und T17 in Abbildung 23 bzw. Tabelle 7, so stellt man fest, daß hier erst nach mehr als 12 min der Abfluß bei allen Varianten begann. Dagegen wurden bei Versuchen mit höherer Beregnungsintensität kürzere Zeiträume gemessen; bei der höchsten Intensität (T9, $50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1}$) lagen sie zwischen 1,6 und 2 min. Bei gleicher Wassermenge in 120 min (T16) wurde dann wieder mehr als die doppelte Zeit bis zum Abflußbeginn gemessen. Es konnte zwar ein Zusammenhang zwischen Abflußbeginn und Beregnungsintensität festgestellt werden, jedoch ohne Unterschiede zwischen den Varianten.

Beim **Zwischenschichtabfluß** ergaben die Untersuchungen im ersten Beregnungsversuch mit $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1}$ (T1-3 a-c) signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Hier hat die Lockerung zu einer Verzögerung des Zwischenschichtabflusses um etwa 5 min geführt. Dieses Ergebnis wiederholte sich beim zweiten Versuch mit einer wesentlich geringeren Beregnungsintensität ($5 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1}$). Darüber hinaus konnte hier eine deutlich größere Verzögerungsspanne festgestellt werden, ebenso bei den Versuchen T15 und T 17. Dabei wurde mit insgesamt jeweils 20 mm eine ähnlich hohe Beregnungsintensität simuliert wie im Versuch T1-3 a-c, allerdings unterteilt in vier Beregnungsdurchläufe mit 12 bzw. 30 min.

Bei Versuchen mit hoher Beregnungsintensität (50 mm) konnte hingegen kein Unterschied zwischen den Varianten festgestellt werden. Das deutet darauf hin, daß Unterschiede im Beginn des Zwischenschichtabflusses, vor allem Unterschiede in der Verzögerung, nicht nur von der Niederschlagsmenge abhängig sind, sondern auch von der Niederschlagsverteilung. Bei hoher Niederschlagsintensität fließt mehr Wasser oberflächlich ab und kann nicht mehr infiltrieren. So kommt bei hoher Beregnungsintensität auch noch ein Einfluß der infiltrierten Wassermenge hinzu.

Der positive Effekt der Lockerung wird auch bei den Messungen des **Sickerwasserabflusses** deutlich. So hat die Lockerung - außer bei der Beregnung T9 - zu einer signifikanten Zeitverkürzung bis zum Beginn des Sickerwasserabflusses geführt. Das bedeutet, daß das infiltrierte Wasser bei den gelockerten Varianten viel schneller vertikal abgeleitet wird als bei den ungelockerten Varianten. Bei Versuch T9 mit der höchsten Beregnungsintensität ($50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1}$) kam es jedoch zu keiner signifikanten Verzögerung. Das ist u.a. auf die geringen Infiltrationsraten bei dieser Beregnungsintensität zurückzuführen. Auch hier ist ein Zusammenhang zwischen infiltrierter Wassermenge und Abflußbeginn des Sickerwassers unverkennbar.

Insgesamt hat die Lockerung in den meisten Beregnungsversuchen einen positiven Einfluß auf den Abflußbeginn ausgeübt. Das Aufbrechen der Verdichtung hat vor allem zu einer Verzögerung des Zwischenschichtabflusses und einer schnelleren vertikalen Ableitung des infiltrierten Wassers geführt.

5.1.2.2 Abflußmengen

Der Einfluß der Lockerung auf den **Oberflächenwasserabfluß** war nicht bei allen Beregnungsintensitäten gleich stark ausgeprägt (Tab. 8). Der erste Versuch T1-3 wurde mit der gleichen Intensität (25 mm x 30 min-1) dreimal wiederholt (a-c). Bei den ersten zwei Wiederholungen (a und b) konnte ein signifikanter Einfluß der Lockerung auf das Oberflächenwasser festgestellt werden. Die Lockerung führte hier zu einer Minderung der Abflußmenge. Bei der dritten Versuchswiederholung (c) war dieser Einfluß nur noch tendenziell erkennbar (Abb. 25).

In der ersten Wiederholung des Versuches T 5-7 konnten ebenfalls tendenzielle Unterschiede zwischen den Varianten gemessen werden. Bei Termin T17 mit einer ähnlich großen Beregnungsmenge (25 mm) wie bei T1-3, aber mit einer anderen Verteilung, war der Einfluß der Lockerung signifikant, sie führte hier zu einer Verminderung des Abflusses. Bei Termin T15 mit der gleichen Beregnungsmenge wie bei Termin T17 - aber einer anderen Verteilung - war dieser positive Einfluß nur noch tendenziell erkennbar (Abb. 27; Tab. 8). Der Beregnungsversuch mit der höchsten Intensität (T9) zeigte einen deutlichen positiven Einfluß der Lockerung auf den Oberflächenabfluß (Abb. 26). Lediglich die Versuchswiederholungen b und c des Beregnungsversuches T5-7 führten zu leicht höheren Oberflächenabfluß bei den gelockerten Varianten.

Die Versuche mit natürlichen Niederschlägen waren durch große Regenmengen gekennzeichnet. Bei den Terminen T10 und T12 fielen jeweils 40 mm bzw. 28 mm Niederschlag in sehr kurzer Zeit. Bei allen Versuchen mit natürlichen Niederschlägen (T10, T12 und T14) führte die Lockerung zu einer signifikanten Verringerung des Oberflächenabflusses (Abb. 31).

Insgesamt hat sich gezeigt, daß die Lockerung einen positiven Einfluß auf die Versickerung des Niederschlages in die obere Bodenschicht hatte, obwohl das nicht bei allen Versuchen so deutlich erkennbar war. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei hoher Beregnungsintensität auch entsprechend große Wassermengen oberflächlich abfließen (T1-3; T9 und T16). Dies deutet darauf hin, daß große Niederschlagsmengen in kurzer Zeit nicht so schnell aufgenommen werden können und das Wasser dann auf der Bodenoberfläche verstärkt horizontal abfließt.

Der Einfluß der Lockerung auf den **Zwischenschichtabfluß** war im Vergleich zum Oberflächenabfluß eindeutiger. So führte die Lockerung sowohl bei den Beregnungsversuchen als auch bei den Versuchen mit natürlichen Niederschlägen zu einer signifikanten Verringerung des Zwischenschichtabflusses. Wie bei der Diskussion der Untersuchungsergebnisse über den Oberflächenabfluß gezeigt wurde, konnte bei unterschiedlicher Beregnungsintensität nicht immer eine gleich große Infiltrationsmenge festgestellt werden, da die Höhe des Abflusses je nach Niederschlag und Intensität unterschiedlich war. Aus der Betrachtung des Zwischenschichtabflusses wird ersichtlich, daß die Lockerung - unabhängig von der Höhe der infiltrierten Wassermenge - stets einen positiven Einfluß auf die vertikale Versickerung ausgeübt hat. Bei Verdichtungen sind signifikant größere Zwischenschichtabflußmengen gemessen worden, und zwar auch bei hoher Beregnungsintensität (T9). Dies ist besonders wichtig, da hier nur relativ geringere Mengen des Niederschlagswassers auf den verdichteten Varianten infiltriert sind (Tab. 8).

Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der „**Abtrocknungsversuche**“ (Abb. 33), wobei die Versuchskästen während des Zeitraums von einer Woche abgedeckt wurden. So konnten die Abflußmengen ohne weiteren Wasserzufluß durch Niederschläge festgestellt werden. Abbildung 33 ist zu entnehmen, daß bei allen drei Abtrocknungsversuchen signifikant höhere Zwischenschichtabflußmengen bei den verdichteten Varianten gemessen wurden. So führte auch hier die Lockerung zu einer höheren Versickerung des noch im Boden befindlichen Niederschlagswassers.

Dieser positive Einfluß der Lockerungsmaßnahmen wird bei der Betrachtung der **Sickerwasserabflußmengen** besonders deutlich.

Die Lockerung hat zu größeren Sickerwasserabflußmengen geführt, außer bei Beregnungstermin T9, hier wurde jedoch ein tendenziell gleichgerichteter Einfluß festgestellt. Das bedeutet, daß - unabhängig von der Niederschlagsmenge und vom jeweiligen infiltrierten Anteil - bei den ungelockerten Varianten deutlich weniger Wasser vertikal versickern konnte. Dies konnte auch bei den Abtrocknungsversuchen festgestellt werden (Abb. 33).

Ebenso wie bei den bodenphysikalischen Untersuchungen der Freilandversuche konnte auch bei dem Modellversuch kein deutlicher Einfluß der Lockerung auf die **Lagerungsdichte** und das **Porenvolumen** festgestellt werden (Abb. 35 und 36). Die Ergebnisse der Stechzylinderuntersuchungen ergaben jedoch, daß die Lagerungsdichte der tieferen Bodenschicht (PS) höher lag als die der Oberkrume (OK). Allerdings konnten hier keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Das Gesamtporenvolumen der unteren Bodenschicht war im Pflugsohlenbereich (PS) nur geringfügig kleiner.

Als **Fazit** der Untersuchungen über den Einfluß von Lockerungsmaßnahmen auf das Abflußverhalten des Niederschlagswassers ist festzuhalten:

In den Freilandversuchen und am Modell wurde ein positiver Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß nachgewiesen. Bei den gelockerten Varianten wurde weniger Zwischenschichtabfluß gemessen als bei den ungelockerten. Dieser Zusammenhang weist darauf hin, daß das zunächst in den Boden infiltrierende Wasser auf einer vorhandenen Verdichtung gestaut und dann als Zwischenschichtabfluß weitergeleitet wird. Die geringen Zwischenschichtabflußmengen der gelockerten Varianten zeigen, daß das Aufbrechen der Krumbasisverdichtung zu einer besseren Wasserinfiltration in tiefere Bodenschichten führt.

In dem Freilandversuch auf dem Standort Wülfrath konnte gezeigt werden, daß die Lockerungsmaßnahmen lediglich im Anwendungsjahr zu einer Verringerung des Abflusses führen. Dies gilt insbesondere für den Zwischenschichtabfluß.

Im Modell hat die Lockerung in den meisten Berechnungsversuchen einen positiven Einfluß auf den Abflußbeginn ausgeübt. Das Aufbrechen der Verdichtung hat auch hier zu einer Verzögerung vor allem des Zwischenschichtabflusses und zu einer schnelleren vertikalen Ableitung des infiltrierten Wassers geführt. Es konnte weiterhin festgestellt werden, daß bei höherer Niederschlagsintensität auch entsprechend große Mengen an Oberflächenwasser abfließen. Dies deutet darauf hin, daß große Niederschlagsmengen in kurzer Zeit nicht so schnell aufgenommen werden und das Wasser auf der Bodenoberfläche bei Hanglage verstärkt horizontal abfließt. Es wurde weiterhin festgestellt, daß - unabhängig von der Niederschlagsmenge und dem infiltrierten Anteil - auf den ungelockerten Varianten deutlich weniger Wasser vertikal versickern konnte.

5.2 Wirkung des Zwischenfruchtanbaus

Arbeitshypothese II:

Der Anbau von Zwischenfrüchten vermindert durch den Schutz des Bodens und durch die Bildung einer Mulchschicht aus Pflanzenresten die Gefahr des horizontalen Wasserabflusses und verzögert damit den Abfluß in den Vorfluter.

Auf dem Versuchsstandort Vinxel (1999-2000) wurde der Einfluß einer Zwischenfrucht auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß geprüft. Wie bereits in Kapitel 4.1.1.2 erwähnt wurde, konnten hier aufgrund der nur geringen Niederschlagsmengen während des Versuchszeitraumes keine verlässlichen Ergebnisse erzielt werden.

Der Einfluß einer Zwischenfrucht auf den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß wurde daher gemeinsam mit dem Einfluß der Lockerung im Modellversuch untersucht. Der Modellversuch wurde mit den Einflußgrößen „Lockerung“ und „Zwischenfrucht“ angelegt und verrechnet. So gelten hier dieselben Versuchsbedingungen, die in Kapitel 5.1 bei der Lockerung beschrieben worden sind.

5.2.1 Modellversuch

5.2.1.1 Abflußbeginn

In Abbildung 24, Kapitel 4.2.1.1, sind die Ergebnisse des ersten Beregnungstermins T1-3 (a-c) hinsichtlich des Einflusses der Zwischenfrucht auf den Abflußbeginn dargestellt. Bei dieser dreifachen Wiederholung mit einer Beregnungsintensität von $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1}$ konnte ein signifikanter Einfluß der Zwischenfrucht auf den Beginn des **Oberflächenabflusses** in allen Versuchswiederholungen festgestellt werden. Hier hat die gehäckselte Zwischenfrucht als Mulchschicht die erwartete Verzögerung des Oberflächenabflusses gegenüber der Varianten ohne Mulch bewirkt. Tabelle 7, kann entnommen werden, daß sich dieser Effekt bei anderen Beregnungsterminen (T15, T16 und T17) wiederholt hat. Während die Verzögerung beim ersten Beregnungsversuch T1-3 etwa 3 min betrug, konnte bei den Versuchen T15-T17 eine Verlangsamung von 8 bis 12 min gemessen werden. Bei den Beregnungsläufen T5-7 und T9 war der Einfluß der Zwischenfrucht nur noch tendenziell erkennbar. Bei dem Beregnungsversuch mit der höchsten Intensität (T9) betrug der Unterschied weniger als 1 min.

Insgesamt hat hier die Mulchschicht zu der gewünschten Verlangsamung des Oberflächenabflusses und damit zu einer Verzögerung des Abflusses geführt.

5.2.1.2 Abflußmengen

In Tabelle 8 und in den Abbildungen 28, 29, 30, 32 und 34 ist der Einfluß der Zwischenfrucht auf die Abflußkomponenten erkennbar.

Die Zwischenfrucht hat bei fast allen Terminen zu einer signifikanten Verringerung des **Oberflächenabflusses** geführt. Nur bei den beiden Beregnungsversuchen mit hoher Intensität (T9 und T16) waren diese Unterschiede bei vergleichsweise großen Abflußmengen nur noch tendenziell erkennbar.

Auch bei den Versuchen mit hohem natürlichem Niederschlag (T10 und T14, Abb. 32) konnte ein tendenziell verminderter Abfluß festgestellt werden. Dadurch wurden die Ergebnisse der Beregnungsversuche T9 und T16 bestätigt. Bei Versuch T12 (Abb. 32) mit 28 mm

natürlichem Niederschlag konnte dieser Verminderungseffekt jedoch nicht festgestellt werden.

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, daß eine Mulchschicht aus Zwischenfrüchten auch den Oberflächenabfluß bei unterschiedlicher Niederschlagsintensität verringert.

Hinsichtlich des **Zwischenschichtabflusses** wäre eine lockernde Wirkung der Zwischenfruchtwurzeln zwar denkbar, aber dieser Effekt wurde bei keinem Beregnungsversuch und keinem Versuch mit natürlichem Niederschlag festgestellt. Bei den „Abtrocknungsversuchen“ waren die Abflußmengen über die Zwischenschicht gleich. Die vorhergehenden Ergebnisse ergeben kein einheitliches Bild, so daß über den Einfluß der Zwischenfrucht auf den Zwischenschichtabfluß keine Aussage getroffen werden kann. Beim **Sickerwasserabfluß** wurden lediglich zum ersten Beregnungstermin T1-3 a-c und bei Termin 12 signifikante Unterschiede festgestellt.

Die Stechzylinderuntersuchungen ergaben bei der Lagerungsdichte und beim Porenvolumen im Bereich der Pflugsohle eine signifikante Verringerung durch die Zwischenfrucht (Abb. 37). Hier konnte auch eine signifikante Erhöhung des Porenvolumens und eine für die Infiltration positive Veränderung der Porenanteile durch die Zwischenfrucht festgestellt werden. Dies würde die vorangestellte Annahme bestätigen und die Unterschiede in den Abflußmessungen erklären.

Als **Fazit** ist festzuhalten, daß die Zwischenfrucht als Mulchschicht eine Verlangsamung des Oberflächenabflusses und damit eine Verzögerung des Abflusses bewirkt hat. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, daß eine Mulchschicht neben der o.g. verzögernden Wirkung auch eine Verringerung des Oberflächenabflusses zur Folge hat.

5.3 Eindringwiderstandsmessungen

Arbeitshypothese III:

Als eine Folge der wendenden Bodenbearbeitung sind Krumbasisverdichtungen weit verbreitet, sie fördern den Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß. Mit Hilfe von Penetrometermessungen kann, bei Einhaltung meßtechnischer Vorgaben, die Verbreitung von Bodenverdichtungen schnell und sicher erfaßt werden.

Um die Verbreitung von Bodenverdichtung, vor allem von Pflugsohlenverdichtungen, in Nordrhein-Westfalen zu untersuchen, wurden in den Regionen Euskirchen-Düren, Köln-Bonn und Mettmann Eindringwiderstandsmessungen auf insgesamt 85 landwirtschaftlichen Betrieben durchgeführt. Dabei wurden stets stark belastete Vorgewende und Fahrgassen ausgelassen, um die Messungen auf der Fläche nicht zu beeinflussen.

Die drei Regionen unterscheiden sich vor allem in den Jahresniederschlägen. So gilt die Region Euskirchen-Düren als niederschlagsarm, die Region Mettmann als niederschlagsreich. Die Region Köln-Bonn nimmt eine Mittelstellung ein.

Die Böden der drei Regionen unterscheiden sich aus ackerbaulicher Sicht kaum. So handelt es sich in den Regionen Euskirchen-Düren und Mettmann um feinsandige bis schluffige Lehme, in der Region Köln-Bonn um schluffige Lehme. Für die Auswertung wurden Flächen, die in der Bodenart von diesen Gruppen abwichen, nicht berücksichtigt. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurden die Eindringwiderstandsmessungen bei 80-90% Feldkapazität während der Winterhalbjahre 1999-2000 und 2000-2001 durchgeführt. Somit waren die Voraussetzungen für die Vergleichbarkeit von Eindringwiderstandsmessungen hinsichtlich Bodenart und Bodenfeuchte erfüllt.

Bei den Messungen wurde der in Kapitel 3.3.3 beschriebene Penetrologger eingesetzt.

Es wurden pro landwirtschaftlicher Betrieb drei bis vier Flächen ausgewählt und untersucht. Die gemessenen Werte wurden nach dem im Kapitel 3.3 ?beschriebenen Schema eingeteilt und bewertet.

Die in der Krumenbasis (20-45 cm) ermittelten Werte und damit die Verbreitung von Pflugsohlenverdichtungen in Nordrhein-Westfalen sind den Abbildungen 48 und 49 zu entnehmen. Darüber hinaus sind in den Abbildungen 46 und 47 die im oberen Krumenbereich (0-20 cm) gewonnenen Ergebnisse dargestellt.

In Abbildung 48 ist die Klassifizierung der Werte aus der Krumenbasis für die drei Regionen dargestellt. In der Anzahl der Messungen mit Werten $> 1,8$ MPa ergaben sich große Unterschiede zwischen den Regionen.

Im Raum Euskirchen-Düren wurden 40 % der Flächen als „nicht“ oder „gering verdichtet“ und somit als unproblematisch eingestuft. Der Anteil der „nicht“ oder „gering verdichteten“ Flächen nahm in Köln-Bonn - im Vergleich zu Euskirchen-Düren - ab. Hier wurden lediglich 15 % in diese Klassen eingestuft, in der Region Mettmann nur noch 7 %.

Der Anteil der „partiellen“ Verdichtungen war im Raum Euskirchen-Düren mit 52 % am höchsten. In Raum Köln-Bonn und Mettmann lag dieser Anteil bei 40 % bzw. 30 %. Somit ist festzustellen, daß nach der hier angewandten Klassifizierung in Euskirchen-Düren und in Köln-Bonn nahezu die Hälfte und in Mettmann ein Drittel der Flächen stellenweise

Verdichtungen aufwiesen. Zieht man die Ergebnisse der nächsten Verdichtungsstufe hinzu („überwiegend“), so erhöhen sich die jeweiligen Anteile der Flächen, die ernstzunehmende Verdichtungen aufweisen. In Raum Euskirchen-Düren lag der Anteil der „überwiegend“ verdichteten Flächen mit 9 % am niedrigsten. Besonders viele Flächen wurden in den Regionen Köln-Bonn (45%) und Mettmann (63 %) als „überwiegend“ verdichtet klassifiziert. Demnach weisen im Raum Köln-Bonn 85 % der untersuchten Flächen partielle oder flächenhafte Verdichtungen auf, im Raum Mettmann sind es 93 % und im Raum Euskirchen-Düren ca. 60 %.

Die Betriebe wurden zufällig in den drei Regionen ausgewählt und ihre Bewirtschaftungsform im Rahmen einer Befragung erfaßt. Sie unterschieden sich nicht in der Art der Bodenbearbeitung, von wenigen Ausnahmen abgesehen. So war der Anteil der Betriebe, die reduziert oder sogar pfluglos wirtschaften, sehr gering (2 Betriebe pro Region). Betriebe, die nur gelegentlich auf den Pflug verzichten oder erst im Untersuchungszeitraum auf ein konservierendes System umgestellt haben, wurden bei den Betrieben „mit Pflugeinsatz“ eingestuft. Zwischen Größe und Gewicht der eingesetzten Maschinen, Fruchtfolgen - vor allem Zuckerrübenanteile -, Bereifung und Erntetechnik wurden keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Betrieben festgestellt. Das bedeutet, daß die Bodenbearbeitung der Flächen in allen drei Regionen unter vergleichbaren „technischen“ Bedingungen erfolgte.

In Abbildung 49 ist die Klassifizierung der Werte $>1,8$ MPa in der Krumbasis dargestellt. Diese Einteilung erlaubt eine genauere Beurteilung der vorangegangenen Ergebnisse in Abbildung 48. Die Einstufung erfolgte in 0,5 MPa-Schritten ab 1,8 MPa.

Im Raum Euskirchen lagen etwa 70 % der Werte in den unteren Bereichen bis 2,8 MPa, wobei diese Werte hinsichtlich der Bodenverdichtung an sich schon hoch sind. 30 % der Meßwerte in dieser Region lagen in den höchsten Verdichtungsstufen $>2,8$ MPa. Die Einstufung in den Regionen Köln-Bonn und Mettmann war hinsichtlich der Stärke der Verdichtung noch ungünstiger. In Raum Mettmann lagen mehr als die Hälfte der Werte in den höchsten Verdichtungsstufen $>2,8$ MPa.

In den Abbildung 46 und 47 sind die Ergebnisse für den oberen Krumbereich dargestellt. Hier wurden die meisten Flächen als „nicht“ oder „gering“ verdichtet eingestuft bei großen Anteilen der Stufen 1,8 - 2,3 MPa. Lediglich in der Region Mettmann wiesen etwa 12 % der Flächen partielle Verdichtungen im oberen Krumbereich auf.

Geht man von gleichen oder sehr ähnlichen Bedingungen hinsichtlich Bodenart, Bodenfeuchte, Bodenbearbeitung und weiteren Belastungsparametern aus, dann ist ein Vergleich der

drei Regionen durchaus möglich. Es stellt sich die Frage nach den Gründen für das vergleichsweise verstärkte Vorkommen von Krumenbasisverdichtungen in den Regionen Köln-Bonn und Mettmann. Dazu kommt die Stärke der Verdichtung, die in diesen beiden Regionen deutlicher ausgeprägt war als in der Region Euskirchen-Düren.

Als **Fazit** ist festzuhalten:

Der relativ hohe Anteil der „partiell“ oder „überwiegend“ verdichteten Flächen weist auf eine große Verbreitung der Bodenverdichtungen in den ausgewählten Regionen hin.

In allen drei Regionen ist die Krumenbasis stärker verdichtet als die Oberkrume. Dies weist auf eine Verbreitung von Pflugsohlen- bzw. Schlepperradverdichtungen hin.

Vor allem in der Krumenbasis treten Verdichtungen in den Regionen Mettmann und Köln-Bonn häufiger und stärker auf als in der Region Euskirchen-Düren.

Die einzelnen Regionen unterscheiden sich, wie bereits dargestellt, hauptsächlich in der Höhe der Jahresniederschläge. So ist hier denkbar, daß die stärkere Verdichtung, vor allem in der Region Mettmann, durch die Niederschlagshöhe bedingt ist. Die geringere Verdichtung in der Region Euskirchen-Düren ist dadurch erklärbar, daß die Bodenfeuchtebedingungen für eine Bodenbearbeitung hier häufiger günstiger sind als in den niederschlagsreicheren Gebieten Köln-Bonn und Mettmann.

5.4 Befragung

Arbeitshypothese IV

Hinsichtlich der Verbreitung von Bodenverdichtungen auf Ackerstandorten und der Vermeidungsstrategien sowie darüber hinaus über das geltende Bundesbodenschutzgesetz besteht Informations- und Beratungsbedarf.

Die in Kapitel 3.3.2 beschriebene Befragung landwirtschaftlicher Betriebsleiter wurde in denselben Betrieben durchgeführt wie die Eindringwiderstandsmessungen. Die Messungen wurden nach der Befragung durchgeführt, so daß die Ergebnisse der Untersuchungen nicht die Befragung beeinflussen konnten.

Aus dem Fragenkomplex wurden insgesamt 7 Fragen aus folgenden drei Themenbereichen ausgewählt: Bundesbodenschutzgesetz, Bodenverdichtungen und konservierende Bodenbearbeitungsverfahren. Die Fragen und ihre Auswertung sind den Abbildungen 39 bis 45 zu entnehmen.

Mit den Fragen über das Bundesbodenschutzgesetz sollte der Informationsstand der Betriebsleiter ermittelt werden. Bei der Frage „Wie haben Sie vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren“ in Abbildung 39 waren Mehrfachnennungen möglich. Hieraus geht hervor, daß die befragten Betriebsleiter hauptsächlich durch die landwirtschaftliche Beratung vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren haben. Der Anteil der Betriebsleiter, die nach eigenen Angaben „noch gar nicht“ vom Gesetz erfahren haben, lag bei 11 %.

Bei der weiteren Betrachtung kann man den Informationsgrad deutlicher eingrenzen. Wie Abbildung 40 zeigt, fühlen sich 31 % der Befragten „unzureichend“ oder „nicht informiert“. Dies übersteigt somit den Prozentsatz derer, die in der vorigen Frage „noch gar nicht“ vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren hatten. Annähernd 70 % fühlen sich jedoch informiert.

Abbildung 41 zeigt, daß etwa 60 % kein Konfliktpotential zwischen ihrer Wirtschaftsweise und dem Bundesbodenschutzgesetz sehen. Jedoch muß hier darauf hingewiesen werden, daß 20 % davon keine Konflikte aufgrund „mangelnder Kenntnis“ des Gesetzes angaben. Im Sinne dieser Arbeit ist von Interesse, daß 33 % der Befragten das Problem „Erosion“ als möglichen Konfliktpunkt angegeben haben.

Der zweite Fragenkomplex betraf das Thema Bodenverdichtungen. Die Auswertung der Frage nach der Kontrollhäufigkeit der Flächen auf Bodenverdichtungen ergab, daß die eine Hälfte der Betriebsleiter ihre Flächen regelmäßig kontrolliert und die andere Hälfte weder Spatenanalysen noch Prüfungen mit einer Bodensonde (Handpenetrometer) durchführt.

Die Frage nach Anzeichen von Bodenschadverdichtungen geht näher auf die Lokalisierung von Schadverdichtungen ein. So gaben 76 % an, Bodenverdichtungen am Vorgewende zu beobachten; 20 % gaben an, keine Verdichtungen zu beobachten.

Die bereits dargestellten Ergebnisse der Penetrometermessungen ergaben jedoch hohe Anteile an Flächen, die im Bereich der Krumenbasis Verdichtungen aufwiesen. Die Auswertung der Frage in Abbildung 43 zeigt, daß hierbei die Angaben der Betriebsleiter nicht mit den Messungen des Eindringwiderstandes übereinstimmen.

Der dritte Fragenkomplex befaßte sich mit der Beurteilung konservierender Bodenbearbeitungssysteme. Etwa 60 % der Befragten teilten diese Verfahren in die Kategorien „nicht besser“ oder „ungeeignet“ ein (Abb. 44). Die weiterführende Frage in Abbildung 45 zeigt die Gründe, weshalb Betriebsleiter von der Einführung solcher Verfahren absehen. Es wird ersichtlich, daß Angst vor Ertragseinbußen, erhöhtem Krankheits- und Unkrautdruck eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung spielen. Etwa die Hälfte der Befragten sind mit ihren bisherigen Verfahren zufrieden. 27 % gaben in dieser Frage eine unzureichende Beratung an und 36 % hatten keine Kenntnisse über die unterschiedlichen Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung.

Fazit: Die Auswertung des Fragebogens deutet darauf hin, daß hinsichtlich der Kenntnisse über das Bodenschutzgesetz, über Bodenverdichtungen und über Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung noch hoher Beratungsbedarf besteht. Dies ist besonders bemerkenswert vor dem Hintergrund, daß das Bundesbodenschutzgesetz bereits vor 4 Jahren in Kraft getreten ist. Vor allem die Kenntnisse über das Gesetz, aber auch genauere Informationen über den Zustand der Flächen, können aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Befragung als nicht befriedigend bezeichnet werden.

6. Schlußfolgerungen für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

Bei der Frage, inwiefern die untersuchten ackerbaulichen Maßnahmen zur Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens und somit zur Verringerung der Hochwassergefahr beitragen können, lassen die Ergebnisse dieser Arbeit hinsichtlich der Umsetzung in die Praxis und der Bedeutung für den vorsorgenden Hochwasserschutz folgende Schlußfolgerung zu:

Schlußfolgerung 1:

Die Ergebnisse der Freilandversuche und des Modellversuches zeigen deutlich, daß die Wasserinfiltration bei vorhandener Krumenbasisverdichtung durch eine mechanische Unterbodenlockerung verbessert werden kann. Diese verbesserte Infiltration konnte durch die Verringerung des Oberflächen- und insbesondere des Zwischenschichtabflusses in der ersten Versuchsphase der Freilandversuche unmittelbar nach den Lockerungsmaßnahmen nachgewiesen werden. Die positiven Auswirkungen der Lockerung auf die Versickerung wurden durch die Ergebnisse des Modellversuches bestätigt. Dieser Zusammenhang läßt aber auch den Umkehrschluß zu, daß die Wasserinfiltration bei vorhandener Krumenbasisverdichtung eingeschränkt und das Niederschlagswasser verstärkt oberirdisch oder über die Zwischenschicht abgeleitet wird.

Die Untersuchungen ergaben jedoch auch, daß die durchgeführten Lockerungsmaßnahmen unmittelbar nach der Anwendung einen stärkeren Einfluß auf das Abflußverhalten ausgeübt haben als in der zweiten Versuchsperiode ohne erneuten Lockerungsmaßnahmen. Hier konnte dann kein Einfluß mehr der Lockerung auf den Oberflächenabfluß festgestellt werden; der Einfluß auf den Zwischenschichtabfluß war nur noch tendenziell erkennbar. Diese Feststellung weist auf die geringe Nachhaltigkeit der mechanischen Lockerung hin. Aus diesem Grunde wäre eine regelmäßige Unterbodenlockerung notwendig, unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher und bodenkundlicher Aspekte jedoch nicht zu empfehlen. Der Meliorationsbedürftigkeit und -fähigkeit stark verdichteter Böden wird damit jedoch nicht widersprochen.

Schlußfolgerung 2:

Im Modellversuch hatte die Zwischenfrucht als Mulchschicht die erwünschte Wirkung auf den Oberflächenabfluß. So wurde diese Abflußkomponente bei unterschiedlicher Niederschlagsintensität deutlich verringert. Darüber hinaus konnte die Mulchschicht den Abflußbeginn verzögern. In dieser Frage bestätigen die Ergebnisse dieser Arbeit zahlreiche

vorangegangene Untersuchungen über die Wirkung von Zwischenfrüchten und Mulchschichten.

Die Zwischenfrucht hat zwar im Bereich der Pflugsohle zu einer Erhöhung des Porenvolumens und zu einer positiven Veränderung der Porenanteile zu Gunsten der Grobporen geführt, aber die Ergebnisse dieser Arbeit lassen keinen Einfluß der Zwischenfrucht auf den Zwischenschichtabfluß erkennen.

Sowohl die Verzögerung und Verminderung des Oberflächenabflusses wie auch die „lockernde“ Wirkung der Zwischenfrucht wirken sich positiv auf das Abflußgeschehen aus. Der Anbau von Zwischenfrüchten kann daher im Sinne der Fragestellung dieser Arbeit als geeignete und ergänzende pflanzenbauliche Maßnahme zum vorsorgenden Hochwasserschutz angesehen werden.

Schlußfolgerung 3:

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, daß Krumbasisverdichtungen zu einem verstärkten Wasserabfluß führen und ihre Vermeidung bzw. Beseitigung durchaus einen Beitrag zum vorsorgenden Hochwasserschutz leisten können. Die Untersuchungsergebnisse zeigen aber auch, daß Krumbasisverdichtungen in Nordrhein-Westfalen weit verbreitet sind. Die gewählte Vorgehensweise bei der Messung des Eindringwiderstandes erlaubt die Klassifizierung der Verdichtungen als „Pflugsohlenverdichtungen“. Weiterhin konnte festgestellt werden, daß zwischen den einzelnen Regionen Unterschiede sowohl in der Verbreitung als auch in der Ausprägung der Pflugsohlenverdichtungen bestehen. Diese Unterschiede können aus ackerbaulicher Sicht lediglich durch die unterschiedlichen Niederschlagsbedingungen in den drei Regionen erklärt werden, denn die untersuchten Flächen variierten weder in der Bewirtschaftung noch in den Bodeneigenschaften stark voneinander. Dadurch wird die Bedeutung der Anpassung des Bearbeitungszeitpunktes an die Bodenfeuchteverhältnisse besonders herausgestellt. Die Unterschiede in der Verbreitung und in der Ausprägung von Krumbasisverdichtungen technogenen Ursprungs dürfen jedoch nicht die Bedeutung des Vorkommens von Pflugsohlen in allen drei untersuchten Regionen mindern. Pflugsohlenverdichtungen kommen auch in Gebieten mit geringeren Jahresniederschlägen verstärkt vor. Deshalb gilt für die Praxis ein verstärkter Einsatz bodenschonender Bearbeitungsverfahren unter Berücksichtigung der jeweiligen Standortbedingungen.

7. Zusammenfassung

Die Entstehung von Hochwasser wird durch viele Faktoren beeinflusst, u.a. durch die häufig diskutierten Verluste an Auen- und Feuchtgebieten, durch den Ausbau von Flüssen und durch Flächenversiegelungen. Dabei wird allerdings die Bedeutung des Wasseraufnahmevermögens landwirtschaftlich genutzter Flächen nicht immer gebührend berücksichtigt. In Nordrhein-Westfalen werden ca. 52 % der Gesamtfläche landwirtschaftlich genutzt (LANDESAMT FÜR DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK NORDRHEIN-WESTFALEN, 2002). Somit spielt der Zustand der Ackerböden hinsichtlich Wasseraufnahme, Rückhaltevermögen und Infiltrationsfähigkeit eine wesentliche Rolle beim Entstehungsprozeß des Hochwassers. Werden diese Eigenschaften gestört, z.B. durch Bodenverdichtungen, dann kommt es zu einem schnelleren Abfließen des Niederschlagswassers; Ackerböden sind damit an der Bildung von Hochwasser beteiligt (DYCK und PESCHKE, 1995). Vorsorgender Hochwasserschutz sollte also bei der Erhaltung bzw. Wiederherstellung des Wasserrückhalte- und Speichervermögens des landwirtschaftlich genutzten Bodens ansetzen (HACH und HÖLTL, 1989).

Ziel dieser Arbeit war die quantitative Erfassung von Wasserabfluß in Abhängigkeit von Unterbodenlockerungsmaßnahmen bzw. von Zwischenfrüchten. Von besonderem Interesse war dabei der unterirdisch auf Bodenverdichtungen im Bereich der Krumbasis abfließende „Zwischenschichtabfluß“. Darüber hinaus sollte die lokale Verbreitung von anthropogen bedingten Krumbasisverdichtungen (Pflugsohlen) in Nordrhein-Westfalen untersucht werden.

Zur Erfassung von Oberflächen- und Zwischenschichtabfluß wurden Meßeinrichtungen auf ackerbaulich genutzten Standorten installiert. Geprüft wurde der Einfluß von Lockerungsmaßnahmen und Zwischenfruchtanbau auf das Abflußverhalten. Diese Fragestellung wurde ergänzend auch in einem Modellversuch untersucht, der zusätzlich die Erfassung des Sickerwassers als weitere Abflußkomponente ermöglichte. Durch den Einsatz eines Regensimulators im Modellversuch konnten die Einflüsse von Lockerungsmaßnahmen und Zwischenfrüchten unter kontrollierten Niederschlagsbedingungen geprüft werden.

Um die Verbreitung von Bodenverdichtungen in Nordrhein-Westfalen zu untersuchen, wurden auf jeweils 3 bis 4 Flächen von 85 landwirtschaftlichen Betrieben Penetrometermessungen sowie eine Befragung der Betriebsleiter durchgeführt. Die Betriebe liegen in den Regionen Euskirchen-Düren, Köln-Bonn und Mettmann. Der Fragebogen umfaßte neben Bodenverdichtungen auch die Themen Bundesbodenschutzgesetz und konservierende Bodenbearbeitung.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Unterbodenlockerung führte in den Freilandversuchen zu Veränderungen im Abflußverhalten des Niederschlagswassers. Der Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß war deutlich stärker ausgeprägt als der Einfluß auf den Oberflächenabfluß. Der geringere Zwischenschichtabfluß der gelockerten Varianten weist auf die bessere Infiltration des Niederschlagswassers in tiefere Bodenschichten hin. Dieser Effekt konnte jedoch nur in der ersten Versuchsperiode (1999-2000) festgestellt werden. In der zweiten Versuchsperiode (2000-2001) hatte die vorjährige Lockerung des Bodens keine Wirkung mehr.
- Im Modellversuch führte die Lockerung bei den meisten Beregnungsmaßnahmen zu einer Verzögerung des Abflußbeginns über der Zwischenschicht (simulierte Pflugsohle) bzw. zu einem schnelleren vertikalen Wasserabfluß. Es wurde festgestellt, daß - unabhängig von der Höhe der Beregnung bzw. des natürlichen Niederschlages - bei den gelockerten Versuchsvarianten deutlich mehr Wasser versickern konnte. Dementsprechend waren dann der Zwischenschichtabfluß geringer und der Sickerwasseranteil höher.
- Die Zwischenfrucht als Mulchschicht bewirkte sowohl eine Verzögerung des Oberflächenabflusses, als auch eine Verringerung der Menge des Oberflächenwassers. Beim Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt.
- Auf der Basis von Penetrometermessungen wurde ein hoher Anteil der untersuchten Flächen als „partiell“ oder „überwiegend“ verdichtet klassifiziert. In allen drei untersuchten Regionen weist die Krumenbasis stärkere Verdichtungen auf als die Oberkrume, ein Hinweis für die Verbreitung von Pflugsohlen. Krumenbasisverdichtungen traten nach den vorliegenden Untersuchungen in den Räumen Mettmann und Köln-Bonn stärker auf als im Raum Euskirchen-Düren. Die einzelnen Regionen unterscheiden sich hauptsächlich in der Niederschlagshöhe. Die stärkere Belastung des Bodens im Raum Mettmann kann mit den dort herrschenden Bodenfeuchtebedingungen zum Bearbeitungszeitpunkt begründet werden.
- Die Ergebnisse der Befragung deuten darauf hin, daß hinsichtlich der Kenntnisse über das Bundesbodenschutzgesetz, über Bodenverdichtungen und Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung noch Beratungsbedarf besteht. Die Einschätzung der befragten Betriebsleiter über Bodenverdichtungen auf ihren Flächen stimmen nicht mit den Ergebnissen der Penetrometermessungen überein.

8. Literaturverzeichnis

- AG BODEN (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl. (K4). Hannover
- AUERSWALD, K. (1993): Bodeneigenschaften und Bodenerosion. Wirkungswege bei unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben. Verl. Gebr. Bornträger, Berlin.
- BARSCH, D.; WIMMER, H. (1998): Hangrutschen in Mitteleuropa – die Bedeutung der Suberosion aufgrund der Untersuchungen am Hollmuth bei Heidelberg. Heidelberger Geographische Arb., 66.
- BECHER, H. (1978): Wasserspannungsabhängiger Eindringwiderstand von Modellböden. Z. Pflanzenernähr. u. Bodenkde, 141.
- BEINING, A. M. (2001): Zwischenschichtabfluß in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung. Diplomarbeit am Institut für Pflanzenbau, Univ. Bonn.
- BEISECKER, R. (1994): Einfluß langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löß- und eines Sandbodens. Bodenökologie und Bodengenese, 12. Berlin.
- BEVEN, K und GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. Water Resources Research, 18 (5).
- BLUME, H. P. (1990): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung; vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. Ecomed Verlagsges. mbH, Landsberg/Lech.
- BML (2001): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Land und Forstwirtschaft in Deutschland. Daten und Fakten 2001. Bonn.
- BORCHERT, H. UND GRAF, R. (1987): Zum Vergleich von Penetrometermessungen, durchgeführt bei unterschiedlichem Wassergehalt. Z. Pflanzenernähr. u. Bodenkde, 151.
- BOTSCHKE, J. (1999): Zum Bodenerosionspotential von Oberflächen- und Zwischenabfluß. Bonner bodenkundl. Abhandlung, 29.
- BRONSTERT, A. (1994): Modellierung der Abflußbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Mitt. d. Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, 46. Karlsruhe.
- CRAMER, B. (2002): Bodenverdichtungen in ausgewählten Regionen in NRW – Penetrometermessungen und Umfrageergebnisse. Diplomarbeit am Institut für Pflanzenbau, Univ. Bonn.
- DEUTSCHER WETTERDIENST: (1999-2001): Agrarmeteorologische Wochenberichte für Nordrhein-Westfalen. Selbstverl., Bonn.
- DEUTSCHER WETTERDIENST: (1999-2001): Witterungsreport. Tägl. und monatl. Niederschlagshöhen, Tageswerte der Lufttemperatur. Selbstverl., Bonn.

- DEXTER, A. R. (1986): Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled see-bed and a compacted sub-soil. Effects of seed-bed-aggregate size and sub-soil strenght on wheat toots. Plant and soil, 95.
- DICKEY, E. C., SHELTON, D. P., LAFLEN, J.M. UND MICKELSON R. H. (1984): Tillage, residue and erosion on moderately sloping soils. Trans. of the ASAE, 26.
- DIESERENS, E. (1994): Methode zur Beurteilung der Bodenverdichtung. Agrarforschung, 1.
- DIN 4049 (1979): Hydrologie, quantitative Begriffe. Teil 1; 54. Beuth – Verl. Berlin u. Köln.
- DUMBECK, G. (1984): Einfluß außerordentlicher Druckbelastung auf das Bodengefüge und die Durchwurzelung. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundliche Gesellschaft, 40.
- DUMBECK, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Diss. Gießen.
- DÜRR, H.-J.; PETELKAU, H.; SOMMER, C. (1995): Literaturstudie Bodenverdichtung. Agrarforsch., 1(6).
- DYCK, S. UND PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verl. für das Bauwesen, Berlin.
- EHLERS, W. (1983): Bodenphysikalische Forschung in der Bundesrepublik Deutschland. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges., 38.
- ELLISON, W. D. (1952): Raindrop energie and soil erosion. Emp. J. of exper. Agric., 20.
- FLÜGEL, W. A. (1979): Untersuchungen zum Problem Interflow. Messungen der Bodenfeuchte, der Hangbewegung, der Grundwassererneuerung und des Anflußverhaltens im Versuchsgebiet Hollmuth/Kleiner Odenwald. Heidelberger Geographische Arb., 56.
- FLURY, M.; FLÜHLER, H.; JURY, W. UND LEUENBERGER, J. (1994): Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. Water Resource Research, 30.
- FRANKEN, H. UND WOLFGARTEN, H. -J. (1991): Minderung der Bodenerosion durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen – Vortr. 43. Hochschultg. der Landwirtschaftl. Fak. Univ. Bonn.
- FREDE, H.-G (1991): Gefügebildende Wirkungen natürlicher Kräfte auf schluffreichen Böden. Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Bd 2: Bodengefüge.
- FRIEDRICH, G.; SADOWSKI, S.; CRAMER, B; UND FRANKEN, H. (2002): Penetrometermessungen zur Erfassung von Bodenverdichtungen, Befragung über Bodenverdichtungen und Bodenschutz in ausgewählten Regionen in NRW. 14. Wiss. Fachtg. Landwirtschaftl. Fak. Univ. Bonn: Schadverdichtungen in Ackerböden.
- FRIELINGHAUS, M.; DEUMLICH, D. UND BARKURSKY, D. (1990): Umfang der Wasser- und Winderosion und Reduzierungsmöglichkeiten zum Schutz von Böden und Gewässer. Feldwirt., 31.

- GEOLOGISCHES LANDESAMT NORDRHEIN-WESTFALEN, (1997): Bodenkarte BK 50, Bl. L5308, Bonn.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT NORDRHEIN-WESTFALEN, (1997): Bodenkarte BK 50, Bl. L4707, Mettmann.
- GÖTTLE, A. (1996): Zukunftsweisender Hochwasserschutz in Deutschland - Forderungen, Voraussetzungen, Lösungen. Z. Kulturtech. und Landentwicl., 37.
- GRÖBLINGHOF, F. UND ENTRUP, N. (1994): Schutz durch Zwischenfrüchte. Agrarübersicht, 6.
- HACH, G. UND HÖLTL, W. (1989): Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Wasserrückhalte- Wassereinhalt- und Speicherfähigkeit in der Landschaft. Z. Kulturtech. und Landschaftsentwickl., 30.
- HARRACH, T. und VORDERBRÜGGE, TH. (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Bd 2. P. Parey Verl. , Berlin.
- HARTGE, K.H. und HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3. überarbeitete Aufl. , F. Enke Verl. , Stuttgart.
- HERTLE, M.R. (1989): Der Einfluß von Bedeckung und Durchwurzelung auf die Erosionsdisposition des Bodens. Diplomarbeit am Institut für Pflanzenbau, Univ. Bonn.
- HIGGINS, C. G. und COATES, D. R. (1990): Groundwater Geomorphology. The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms. Geol. Soc. of Amer. Spec.Paper 252, Boulder, Colorado.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 5. Aufl.,F. Enke Verl., Stuttgart.
- HORN, R.: (1984): Die Vorhersage des Eindringwiderstandes von Böden anhand von multiplen Regressionsanalysen. Z. Kulturtech. u.Flurber. , 25.
- KEHL, M. (1997): Experimentelle Laboruntersuchungen zur Dynamik der Wassererosion verschieden texturierter Ackerböden Nordrhein-Westfalens. Bonner bodenkundl. Abhandl. , Bd 21. Bonn
- KRAHMER, U. (1997): Penetrometermessungen auf rekultivierten Böden. Scriptum Arbeitsergebnisse aus dem Geol. Landesamt NRW; 2.
- KROMER, K.-H. und VÖHRINGER, R. (1998): Konstruktion und Bau einer Bewässerungseinrichtung zur Simulation von natürlichem Regen. Forschungsber. GS 1132 im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Univ. Bonn.

- KTBL (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlußfolgerungen für die Gute fachliche Praxis. Arbeitspapier 266.
- KÜHNER, S. (1998): Bodenverdichtung – Grundlage für eine nachhaltige Landbewirtschaftung aus bodenkundlicher Sicht. Dt. Verb. für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Heft 4/1998. Wirtschafts- und Verlagsges. Gas und Wasser mbH, Bonn.
- KUNTZE, H. (1994): Bodenkunde. Physikalische Bodeneigenschaften. Der Boden, ein poröses System. 5. Aufl. . E. Ulmer Verl., Stuttgart.
- KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G. UND SCHWERDTFEGGER, G. (1994): Bodenkunde. 5. Aufl. . E. Ulmer –Verl., Stuttgart.
- LANDESAMT FÜR DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK (2001): Landesdatenbank Nordrhein-Westfalen (LDB NRW), Standardtabellen – Katasterflächen nach Nutzungsarten. Statistische Berichte, Düsseldorf.
- LATTANZI, A. R., MEYER, L. D. UND BAUMGARDNER, M. F. (1974): Influence of mulch rate and soil steepness on interrill erosion. Soil Sci. Soc. Amer. J., 38.
- LINDENTHAL, M. (2001): Modellversuch zur Messung des Zwischenschichtabflusses. Diplomarb. am Institut für Pflanzenbau, Univ. Bonn.
- MANNERING, J. V. UND MEYER, L. D. (1963): The effects of various of surface mulch on infiltration and erosion. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27.
- MATTHEß, G. UND UBELL, K. (1983): Lehrbuch de Hydrologie. Bd 1; Verl. Gebrüder Bornträger, Berlin u. Stuttgart.
- MERZ, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluß-Vorgangs in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität. Mitt. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, 56. Karlsruhe.
- MOORE, I. D. (1981): Infiltration equation modified für surface effects. J. Irigation and Drainage, 107.
- MORGAN, R. (1999): Bodenerosion und Bodenerhaltung. G. Thieme Verl. . Stuttgart.
- MOSLEY, M.P, (1979): Streamflow generation in a forested watershed. New Zeland. Water Resour. Res. 15.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1993): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. 4. Aufl. . DLG-Verl., Frankfurt a. M.
- MURER, E.; KLANGHOFER, E. UND SCHWARZ, J. (1991): Ein EDV- Programm zur Auswertung der Eindringwiderstände aus Penetrometermessungen. Wasser und Boden, 43.
- NITZSCH, W. v. (1938): Porengrößen im Boden. Ihre Beziehung zu Bodenbearbeitung und Wasserhaushalt; RKTL-Schriften, H 85, Berlin

- PETELKAU, H. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtungen. In: Bodenbearbeitung und Bodenschutz; KTBL-Arbeitspapier, 266.
- POESEN, J. (1981): Rainwash experiments on the erodibility of loose sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6.
- QUIST, D. (1985): Bodenerosion – Schäden, Ursachen und Schutzmaßnahmen, Ifoam, 52
- REINTJES, M. (1989): Der Einfluß von Humusgehalt und Hangneigung auf die Erodibilität von Böden. Diplomarbeit Institut für Pflanzenbau, Univ. Bonn. RICHARDS, K. S.; ARNETT, R. UND ELLIS, S. (1984): *Geomorphology and soils*. London.
- RODDA, J. C. (1976): *Facets of hydrology*. London - New York - Sydney - Toronto
- ROTH, C. H. (1998): Physikalische Ursachen der Wassererosion in: BLUME, H. P. et. al. *Handbuch der Bodenkunde*, 5. Ergänzungslieferung. Stand November 1998. 2.
- SCHEFFER, F. UND SCHACHTSCHABEL, P. (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14 Aufl. F. Enke Verl. , Stuttgart.
- SCHULZ, H. (1991): Entwicklung und Erprobung einer Schnellbestimmungsmethode zur Messung von Bodenverdichtungen. *Endber. . 34*. Bayer, Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
- SCHWERTMANN, U. (1982): Bodenerosion und Flurbereinigung. *Z. Kulturtech. u. Flurber. , 23*.
- SELBY, M. J. (1982) *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, Oxford.
- SEMMELE, H. UND HORN, R. (1995): Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentypischen und maschinenspezifischen Grenzwerten. *Bodenverdichtung; KTBL-Schrift*, 362.
- SOMMER, C. (1987): Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zur ihrer Vermeidung. *Landtechn. , 8*.
- SOMMER, C. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung – ein Konzept zur Lösung agrarrelevanten Bodenschutzprobleme. *Landbauforsch. Völkerode. Sh. 191*. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft; Braunschweig.
- SOMMER, C. (1999): *Bodenbearbeitung und Bodenschutz*. etv-Landwirtschaftsverl.
- SOMMER, C., BRUNOTTE, J. UND ORTMEIER, B. (1995): Einführung von Verfahren der Konservierenden Bodenbearbeitung in die Praxis. *Abschlußber. FuE Vorhaben 87 UM 01*. KTBL, Darmstadt.
- SOMMER, C.; BRANDHUBER, R.; BRUNOTTE, J. UND BUCHNER, W. (2001): *Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen in: Gute Fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion*, BMVEL.

- WOHLRAB, B.; ERNSTBERGER, H.; MEUSER, A. UND SOKOLLEK, V. (1992): Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. Verl. P. Parey, Hamburg u. Berlin.
- WOLFGARTEN, H. -J. (1989): Acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen zur Verminderung der Bodenerosion und Nitratverlagerung im Zuckerrübenanbau. Diss. Bonn.
- WORRESCHK, B. (1985): Beitrag zur Berechnung der Abflußbildung in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Mitt. Leichtweiß-Institut f. Wasserbau 85, Braunschweig.
- WÜRFEL, T. (1999): Weniger Oberflächenabfluß. Landwirtschaft ohne Pflug. Sonderausgabe Agritechnika 99.
- ZUIDEMA, P. K. (1985): Hydraulik der Abflußbildung während Starkniederschlägen. Diss. , ETH, Zürich.

9. Anhang

- Anhangtabelle 1: Niederschläge (mm) Frankenforst und Vinxel im Versuchszeitraum 1999-2000
- Anhangtabelle 2: Mittlere Oberflächen- und Zwischenschichtabflüsse (ml) im Versuchszeitraum 1999-2000; Frankenforst
- Anhangtabelle 3: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächenabfluß (ml); Frankenforst 2000-2001
- Anhangtabelle 4: Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß (ml); Frankenforst 2000-2001
- Anhangtabelle 5: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächenabfluß (ml); Wülfrath 1999-2000
- Anhangtabelle 6: Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß (ml); Wülfrath 1999-2000
- Anhangtabelle 7: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächenabfluß (ml); Wülfrath 2000-2001
- Anhangtabelle 8: Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß (ml); Wülfrath 2000-2001
- Anhangtabelle 9: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Frankenforst 1999-2000
- Anhangtabelle 10: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Frankenforst 2000-2001
- Anhangtabelle 11: Einfluß der Zwischenfrucht auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Vinxel 1999-2000
- Anhangtabelle 12: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Wülfrath 1999-2000
- Anhangtabelle 13: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Wülfrath 2000-2001
- Anhangtabelle 14: Einfluß der Lockerung auf den Beginn des Abflusses (min) Berechnungstermin T1-3 (a-c) bei $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- Anhangtabelle 15: Einfluß der Lockerung auf den Beginn des Abflusses (min); Berechnungstermin T5-7 (a-c) bei $5 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- Anhangtabelle 16: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Beginn des Abflusses (min); Berechnungstermin T1-3 (a-c) bei $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- Anhangtabelle 17: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Berechnungstermin T1-3 (a-c) bei $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

- Anhangtabelle 18: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Berechnungstermin T9 bei $50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- Anhangtabelle 19: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Berechnungstermin T15 bei $4 \times 5 \text{ mm} \times 12 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- Anhangtabelle 20: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Berechnungstermin T1-3 (a-c) bei $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- Anhangtabelle 21: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Berechnungstermin T9 bei $50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- Anhangtabelle 22: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Berechnungstermin T15, T16 und T17
- Anhangtabelle 23: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml) bei natürlichem Regen; Termine T10, T12 und T14
- Anhangtabelle 24: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml) bei natürlichem Regen; Termine T10, T12 und T14
- Anhangtabelle 25: Niederschlag und Niederschlagsverteilung der Versuche T10, T12 und T14 bei natürlichem Regen
- Anhangtabelle 26: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml) bei natürlichem Regen; Termine T10, T12 und T14
- Anhangtabelle 27: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml) bei natürlichem Regen; Berechnungstermine T4, T8 und T11
- Anhangtabelle 28: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Modellversuch 2000-2001
- Anhangtabelle 29: Einfluß der Zwischenfrucht auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Modellversuch 2000-2001
- Anhangtabelle 30: Wie haben Sie vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren?
- Anhangtabelle 31: Fühlen Sie sich über das Bundesbodenschutzgesetz informiert?
- Anhangtabelle 32: Inwiefern sehen Sie Konfliktpotential zwischen dem Gesetz und Ihrer Bodenbewirtschaftung?
- Anhangtabelle 33: Wie oft kontrollieren Sie Ihre Flächen mit Spaten oder Bodensonde auf Bodenschadverdichtungen?

- Anhangtabelle 34: Haben Sie auf Ihren Flächen Anzeichen für Bodenschadverdichtungen beobachten können?
- Anhangtabelle 35: Wie beurteilen Sie Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich der Vermeidung von Schadverdichtungen?
- Anhangtabelle 36: Was hat Sie davon abgehalten, auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren umzustellen?
- Anhangtabelle 37: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen mit Werten $> 1,8$ MPa im oberen Krumbereich (0-20 cm Tiefe) (Angaben in %)
- Anhangtabelle 38: Klassifizierung der Werte $> 1,8$ MPa im oberen Krumbereich (0-20 cm Tiefe) (Angaben in %)
- Anhangtabelle 39: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen mit Werten $> 1,8$ MPa in der Krumbasis (20-45 cm Tiefe) (Angaben in %)
- Anhangtabelle 40: Klassifizierung der Werte $> 1,8$ MPa in der Krumbasis (20-45 cm Tiefe) (Angaben in %)

**Anhangtabelle 1: Niederschläge (mm)
Frankenforst und Vinxel im Versuchszeit-
raum 1999-2000**

Datum	NS (mm)	Datum	NS (mm)
01.11.99	6	26.12.99	2,4
04.11.99	1	27.12.99	6
06.11.99	4	28.12.99	3
08.11.99	6	29.12.99	4
09.11.99	3	02.01.00	2
10.11.99	2	04.01.00	5
11.11.99	10	06.01.00	1
12.11.99	1	09.01.00	0,5
13.11.99	4	13.01.00	1
15.11.99	5	15.01.00	0,5
18.11.99	1	16.01.00	1
19.11.99	1	18.01.00	4
21.11.99	2	19.01.00	1
22.11.99	2,5	24.01.00	4
25.11.99	1,5	28.01.00	6
29.11.99	3	06.02.00	6
01.12.99	3	08.02.00	2
02.12.99	2	10.02.00	7
04.12.99	3	12.02.00	10
05.12.99	8	15.02.00	12
08.12.99	3	17.02.00	24
10.12.99	11	24.02.00	11
11.12.99	5	04.03.00	14
12.12.99	5	06.03.00	11
13.12.99	1	16.03.00	9
15.12.99	3	18.03.00	1
19.12.99	3	24.03.00	22
21.12.99	2	28.03.00	5
22.12.99	5	02.04.00	7
23.12.99	8	03.04.00	7

**Anhangtabelle 2: Mittlere Oberflächen- und
Zwischenschichtabflüsse (ml) im Versuchs-
zeitraum 1999-2000; Frankenforst**

Datum	OB		ZS	
	oL	mL	oL	mL
03.11.99	0,04	0	0	0
12.11.99	1,99	0,38	1,55	0,5
18.11.99	0,41	0,76	0	0,08
25.11.99	0,41	1,27	0	0,03
02.12.99	0,02	0	0	0
09.12.99	0	0	0	0
16.12.99	0,43	0,07	0,54	0,04
23.12.99	0,24	0	0,34	0
30.12.99	0,39	0,04	0,16	0,03
06.01.00	0	0	0	0
12.11.00	0,2	0,16	0	0
20.01.00	0,44	0,29	0,02	0
29.01.00	0,27	0	0,09	0
03.02.00	0	0	0	0
11.02.00	0,44	0	0,31	0,03
19.02.00	1,27	0,39	2,22	0,46
23.02.00	0,16	0,01	0,24	0,4
02.03.00	0	0	0	0
09.03.00	0	0	0,42	0,04
16.03.00	0	0	0,12	0
23.03.00	0	0	0	0
06.04.00	0	0	0	0,11

Anhangtabelle 3: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächenabfluß (ml); Frankenforst 2000-2001

Termin	oL		mL		Datum	NS
1	145,00	a	135,00	a	03.11.99	5
2	163,25	a	136,25	a	12.11.99	8
3	152,00	a	114,50	b	18.11.99	4
4	268,25	a	193,75	b	25.11.99	11
5	252,00	a	217,00	a	02.12.99	8
6	202,75	a	174,50	a	09.12.99	12
7	252,75	a	195,75	b	16.12.99	12
8	145,75	a	124,50	a	23.12.99	4
9	323,75	a	247,00	b	30.12.99	16
10	284,25	a	189,75	a	06.01.00	19
11	307,75	a	215,25	b	12.01.00	14
12	5,00	a	3,00	a	20.01.00	2
13	526,00	a	407,25	b	29.01.00	32
14	355,00	a	302,25	b	03.02.00	21
15	420,25	a	260,00	a	11.02.00	26
16	196,50	a	162,75	a	19.02.00	15
17	374,75	a	260,25	a	23.02.00	22
18	4,00	a	3,25	b	02.03.00	4
19	155,50	a	151,75	a	09.03.00	9
20	184,25	a	157,25	a	16.03.00	28
21	60,25	a	29,75	b	23.03.00	14
22	95,50	a	81,25	a	30.03.00	23
23	16,00	a	15,00	a	06.04.00	9

Anhangtabelle 4: Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß (ml); Frankenforst 2000-2001

Termin	oL		mL		Datum	NS
1	417,75	a	189,00	a	03.11.99	5
2	456,25	a	155,25	b	12.11.99	8
3	366,00	a	172,00	b	18.11.99	4
4	551,50	a	183,50	a	25.11.99	11
5	524,00	a	175,75	b	02.12.99	8
6	631,00	a	193,50	b	09.12.99	12
7	921,00	a	173,25	b	16.12.99	12
8	435,25	a	197,00	b	23.12.99	4
9	686,50	a	252,50	b	30.12.99	16
10	633,50	a	264,50	b	06.01.00	19
11	660,75	a	184,75	b	12.01.00	14
12	45,75	a	15,25	b	20.01.00	2
13	1195,25	a	233,00	b	29.01.00	32
14	1136,00	a	129,00	b	03.02.00	21
15	1004,80	a	113,50	b	11.02.00	26
16	650,75	a	128,75	b	19.02.00	15
17	1136,00	a	129,00	b	23.02.00	22
18	46,25	a	17,75	a	02.03.00	4
19	345,75	a	171,00	b	09.03.00	9
20	417,75	a	94,00	b	16.03.00	28
21	266,00	a	104,75	b	23.03.00	14
22	393,75	a	89,00	b	30.03.00	23
23	329,50	a	99,25	b	06.04.00	9

Anhangtabelle 5: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächenabfluß (ml); Wülfrath 1999-2000

Termin	oL		mL		Datum	NS
1	44,50	a	30,00	b	29.11.99	6
2	211,50	a	180,50	a	06.11.99	10
3	21,50	a	6,50	a	12.11.99	4
4	424,75	a	262,75	b	20.11.99	24
5	276,25	a	56,25	b	28.11.99	6
6	316,00	a	182,00	b	06.12.99	9
7	351,00	a	309,30	a	13.12.99	38
8	233,50	a	150,25	b	18.12.99	8
9	721,25	a	446,75	b	25.12.99	42
10	355,75	a	190,00	b	03.01.00	12
11	223,75	a	209,00	a	08.01.00	16
12	99,00	a	53,75	a	17.01.00	6
13	171,50	a	103,50	b	24.01.00	9
14	462,75	a	410,25	a	30.01.00	26
15	186,50	a	149,75	a	06.02.00	12
16	436,00	a	232,50	b	13.02.00	27
17	471,00	a	399,75	b	22.02.00	24
18	546,75	a	528,50	a	27.02.00	36
19	67,50	a	44,50	a	04.03.00	24
20	67,75	a	32,00	a	13.03.00	17
21	26,00	a	5,75	a	19.03.00	7
22	22,75	a	21,25	a	26.03.00	11
23	39,13	a	16,94	a	01.04.00	7

Anhangtabelle 6 Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß (ml); Wülfrath 1999-2000

Termin	oL		mL		Datum	NS
1	553,50	a	159,00	b	29.11.99	6
2	564,75	a	101,50	b	06.11.99	10
3	668,80	a	118,00	b	12.11.99	4
4	553,00	a	144,00	a	20.11.99	24
5	634,75	a	119,25	b	28.11.99	6
6	520,50	a	121,30	b	06.12.99	9
7	1098,50	a	192,75	b	13.12.99	38
8	888,80	a	151,80	b	18.12.99	8
9	1792,30	a	245,30	b	25.12.99	42
10	685,00	a	270,00	a	03.01.00	12
11	722,25	a	231,25	b	08.01.00	16
12	502,20	a	86,50	a	17.01.00	6
13	520,80	a	125,50	b	24.01.00	9
14	1125,00	a	319,00	a	30.01.00	26
15	706,80	a	680,30	a	06.02.00	12
16	754,50	a	228,50	b	13.02.00	27
17	1289,30	a	369,80	b	22.02.00	24
18	1117,00	a	292,50	b	27.02.00	36
19	739,75	a	241,75	b	04.03.00	24
20	432,25	a	115,25	b	13.03.00	17
21	319,30	a	59,80	a	19.03.00	7
22	581,00	a	83,50	a	26.03.00	11
23	134,81	a	43,63	a	01.04.00	7

Anhangtabelle 7: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächenabfluß (ml); Wülfrath 2000-2001

Termin	oL		mL		Datum	NS
1	122,50	a	97,75	a	15.10.00	7
2	376,75	a	244,00	a	23.10.00	12
3	647,25	a	644,00	a	30.10.00	36
4	290,00	a	216,25	a	05.11.00	14
5	272,00	a	249,50	a	12.11.00	16
6	268,00	a	265,75	a	22.11.00	10
7	286,75	a	273,00	a	25.11.00	19
8	276,50	a	247,50	a	05.12.00	8
9	418,00	a	347,50	b	11.12.00	23
10	114,75	a	113,25	a	16.12.00	6
11	1,75	a	0,25	a	26.12.00	0
12	336,00	a	294,00	a	02.01.01	13
13	865,50	a	760,25	a	10.01.01	42
14	5,50	a	1,25	a	19.01.01	0
15	415,00	a	241,00	a	26.01.01	32
16	535,00	a	396,50	a	02.02.01	11
17	696,75	a	453,00	b	10.02.01	32
18	293,75	a	226,00	a	16.02.01	9
19	275,25	a	150,50	b	26.02.02	9
20	267,50	a	201,25	a	03.03.01	12
21	111,75	a	105,25	a	10.03.01	13
22	119,50	a	117,50	a	17.03.01	16
23	338,50	a	253,75	a	23.03.01	42
24	161,50	a	148,00	a	31.03.01	20
25	160,75	a	130,50	b	07.04.01	18

Anhangtabelle 8: Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß (ml); Wülfrath 2000-2001

Termin	oL		mL		Datum	NS
1	363,50	a	247,00	a	15.10.00	7
2	685,00	a	270,00	a	23.10.00	12
3	1175,30	a	866,50	a	30.10.00	36
4	756,00	a	541,00	a	05.11.00	14
5	646,25	a	279,75	b	12.11.00	16
6	465,30	a	325,00	a	22.11.00	10
7	557,00	a	373,00	a	25.11.00	19
8	504,75	a	259,25	b	05.12.00	8
9	798,25	a	269,25	b	11.12.00	23
10	121,00	a	101,25	a	16.12.00	6
11	44,25	a	8,00	a	26.12.00	0
12	430,00	a	197,00	a	02.01.01	13
13	981,00	a	512,00	a	10.01.01	42
14	125,25	a	42,75	a	19.01.01	0
15	387,75	a	332,00	a	26.01.01	32
16	771,80	a	317,00	b	02.02.01	11
17	769,00	a	409,30	a	10.02.01	32
18	640,80	a	318,80	a	16.02.01	9
19	419,50	a	116,80	a	26.02.02	9
20	271,00	a	194,75	a	03.03.01	12
21	283,50	a	174,00	a	10.03.01	13
22	242,25	a	101,50	b	17.03.01	16
23	225,50	a	180,50	a	23.03.01	42
24	423,00	a	195,50	a	31.03.01	20
25	340,50	a	124,80	a	07.04.01	18

Anhangtabelle 9: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.- %) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Frankenforst 1999-2000

Frankenforst 1999-2000		OK		PS		UB	
Weite Grobporen	mL	5,54	a	8,38	a	7,67	a
	oL	9,97	a	6,65	a	5,00	a
Enge Grobporen	mL	3,87	a	3,58	a	3,53	a
	oL	5,35	a	3,40	a	3,95	a
Mittelporen	mL	10,58	a	11,74	a	14,34	a
	oL	9,57	a	9,57	a	11,51	a
Feinporen	mL	24,32	a	23,51	a	19,91	a
	oL	23,08	a	24,94	a	22,28	a
Porenvolumen	mL	44,30	a	47,21	a	45,45	a
	oL	47,97	b	44,55	a	42,74	a
Lagerungsdichte	mL	1,41	b	1,51	a	1,59	a
	oL	1,51	a	1,46	a	1,52	a

Anhangtabelle 10: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.- %) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Frankenforst 2000-2001

Frankenforst 2000-2001		OK		PS		UB	
Weite Grobporen	mL	6,49	a	3,93	a	4,45	a
	oL	10,25	a	3,35	a	4,13	a
Enge Grobporen	mL	5,73	a	5,47	a	5,10	a
	oL	5,50	a	5,19	a	6,65	a
Mittelporen	mL	18,88	a	17,27	a	21,65	a
	oL	19,43	a	19,17	a	9,69	a
Feinporen	mL	15,15	a	17,52	a	15,75	a
	oL	13,88	a	15,43	a	25,94	a
Porenvolumen	mL	45,99	a	44,19	a	48,22	a
	oL	49,07	a	43,14	a	44,85	a
Lagerungsdichte	mL	1,45	a	1,54	a	1,53	a
	oL	1,51	a	1,56	a	1,46	a

Anhangtabelle 11: Einfluß der Zwischenfrucht auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.- %) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Vinxel 1999-2000

Vinxel 1999-2000		OK		PS		UB	
Weite Grobporen	mZF	9,14	a	6,59	a	5,88	a
	oZF	9,21	a	7,81	a	5,38	a
Enge Grobporen	mZF	3,98	a	3,51	a	3,90	a
	oZF	4,34	a	4,00	a	4,62	a
Mittelporen	mZF	7,90	a	7,95	a	15,53	a
	oZF	8,80	a	8,12	a	12,11	a
Feinporen	mZF	25,20	a	26,35	a	18,99	a
	oZF	24,87	a	25,48	a	20,16	a
Porenvolumen	mZF	46,22	a	44,39	a	44,30	a
	oZF	47,22	a	45,40	a	42,32	b
Lagerungsdichte	mZF	1,49	a	1,55	a	1,56	a
	oZF	1,45	a	1,53	a	1,57	a

Anhangtabelle 12: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.- %) und Lagerungsdichte (g/cm³); Wülfrath 1999-2000

Wülfrath 1999-2000		OK		PS		UB	
Weite Grobporen	oL	12,57	a	12,38	a	11,95	a
	mL	12,91	a	11,32	a	10,69	a
Enge Grobporen	oL	3,58	a	3,45	a	2,81	a
	mL	3,40	a	3,57	a	3,00	a
Mittelporen	oL	28,47	a	28,90	a	30,18	a
	mL	30,37	a	31,19	a	27,27	a
Feinporen	oL	5,73	a	5,53	a	4,72	a
	mL	3,59	b	5,07	a	7,00	a
Porenvolumen	oL	50,35	a	49,80	a	49,66	a
	mL	50,27	a	51,61	a	47,97	a
Lagerungsdichte	oL	1,44	a	1,43	a	1,53	a
	mL	1,45	a	1,42	a	1,53	a

Anhangtabelle 13: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm³); Wülfrath 2000-2001

Wülfrath 2000-2001		OK		PS		UB	
Weite Grobporen	mL	10,74	a	3,30	a	6,72	a
	oL	9,62	a	4,28	a	4,92	a
Enge Grobporen	mL	3,74	a	4,28	a	6,23	a
	oL	7,31	a	4,53	a	5,55	a
Mittelporen	mL	18,12	a	20,35	a	14,97	a
	oL	16,66	a	18,83	a	17,28	a
Feinporen	mL	14,02	a	12,50	a	14,72	a
	oL	12,96	a	14,74	a	15,34	a
Porenvolumen	mL	46,62	a	40,42	a	42,64	a
	oL	46,56	a	42,38	a	43,13	a
Lagerungsdichte	mL	1,44	a	1,50	a	1,49	a
	oL	1,43	a	1,54	a	1,53	a

Anhangtabelle 14: Einfluß der Lockerung auf den Beginn des Abflusses (min); Beregnungstermin T1-3 (a-c) bei 25 mm x 30 min⁻¹ d⁻¹

Termin		oL		mL	
1-3 a	BeOB	3,38	a	3,00	a
	BeZS	5,88	b	14,63	a
	BeSic	21,75	a	11,75	b
1-3 b	BeOB	3,50	a	3,62	a
	BeZS	7,00	b	15,25	a
	BeSic	21,50	a	14,00	b
1-3 c	BeOB	3,12	a	3,63	a
	BeZS	6,88	b	14,87	a
	BeSic	20,13	a	13,00	b

Anhangtabelle 15: Einfluß der Lockerung auf den Beginn des Abflusses (min);
Berechnungstermin T5-7 (a-c) bei 5 mm x 60 min⁻¹ d⁻¹

Termin		oL		mL	
5-7 a	BeOB	12,63	a	13,63	a
	BeZS	32,50	b	59,13	a
	BeSic	67,25	a	32,88	b
5-7 b	BeOB	13,50	a	13,50	a
	BeZS	35,13	a	58,88	b
	BeSic	70,38	a	31,13	b
5-7 c	BeOB	13,50	a	13,50	a
	BeZS	35,13	b	58,88	a
	BeSic	70,38	a	31,13	b

Anhangtabelle 16: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Beginn des Abflusses (min);
Berechnungstermin T1-3 (a-c) bei 25 mm x 30 min⁻¹ d⁻¹

Termin		mit ZF		ohne ZF	
1-3 a	BeOB	5,00	a	1,38	b
	BeZS	11,00	a	9,50	b
	BeSic	16,88	a	16,63	a
1-3 b	BeOB	5,50	a	1,63	b
	BeZS	11,75	a	10,50	a
	BeSic	17,63	a	17,88	a
1-3 c	BeOB	4,88	a	1,88	b
	BeZS	13,38	a	8,38	b
	BeSic	16,50	a	16,63	a

Anhangtabelle 17: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Berechnungstermin T1-3 (a-c) bei 25 mm x 30 min⁻¹ d⁻¹

Termin		oL		mL	
1-3 a	OB	3832,50	a	2438,80	b
	ZS	6147,50	a	2835,00	b
	Sic	2036,30	b	7306,30	a
1-3 b	OB	4147,50	a	2463,80	b
	ZS	7078,80	a	2527,50	b
	Sic	2265,6	b	8127,5	a
1-3 c	OB	3188,8	a	2510	a
	ZS	7148,8	a	2750	b
	Sic	2387,5	b	7301,3	a

Anhangtabelle 18: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Berechnungstermin T9 bei 50 mm x 60 min⁻¹ d⁻¹

Termin		oL		mL	
T9	OB	5656,30	a	2918,80	b
	ZS	9163,80	a	4027,50	b
	Sic	17980,00	a	19525,00	a

Anhangtabelle 19: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Beregnungstermin T15 bei $4 \times 5 \text{ mm} \times 12 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

Termin		oL		mL	
T15	OB	310,00	a	245,50	a
	ZS	9823,80	a	3150,00	b
	Sic	6718,00	b	13921,00	a

Anhangtabelle 20: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Beregnungstermin T1-3 (a-c) bei $25 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

Termin		mit ZF		ohne ZF	
1-3 a	OB	2345,00	b	3926,30	a
	ZS	5161,30	a	3821,30	b
	Sic	4255,00	b	5087,50	a
1-3 b	OB	2480,00	b	4131,30	a
	ZS	5268,80	a	4337,50	b
	Sic	4751,9	b	5641,3	a
1-3 c	OB	2371,3	a	3327,5	a
	ZS	5397,5	a	4456,3	b
	Sic	4526,3	a	5162,5	a

Anhangtabelle 21: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Beregnungstermin T9 bei $50 \text{ mm} \times 60 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$

Termin		mZF		oZF	
T9	OB	3317,50	a	5257,50	a
	ZS	6621,30	a	6570,00	a
	Sic	19530,00	a	17975,00	a

Anhangtabelle 22: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml); Beregnungstermin T15, T16 und T17

Termin	Intensität	mZF		oZF	
T15	$4 \times 5 \text{ mm} \times 12 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$	108,00	b	447,50	a
T16	$50 \text{ mm} \times 120 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$	3820,00	a	5681,00	a
T17	$4 \times 5 \text{ mm} \times 30 \text{ min}^{-1} \text{ d}^{-1}$	157,5	b	755	a

Anhangtabelle 23: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml) bei natürlichem Regen; Beregnungstermine T10, T12 und T14

Termin		oL		mL	
T10	OB	6510,00	a	2671,30	b
	ZS	9917,50	a	4131,30	b
	SIC	10254,00	b	19169,00	a
T12	OB	4755,00	a	2467,50	b
	ZS	7531,30	a	2376,30	b
	SIC	2171,30	b	9485,00	a
T14	OB	7266,30	a	2851,30	b
	ZS	12408,00	a	4978,00	b
	SIC	8639,00	b	19933,00	a

Anhangtabelle 24: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml) bei natürlichem Regen; Beregnungstermine T10, T12 und T14

Termin		mit ZF		ohne ZF	
T10	OB	3903,80	a	5277,50	a
	ZS	7147,50	a	6901,30	a
	SIC	15230,00	a	14193,00	a
T12	OB	4692,50	a	2530,00	b
	ZS	6090,00	a	3817,50	b
	SIC	5242,50	b	6413,80	a
T14	OB	4558,80	a	5558,80	a
	ZS	9123,00	a	8263,00	a
	SIC	13480,00	a	15091,00	a

Anhangtabelle 25: Niederschlag und Niederschlagsverteilung der Versuche T10, T12 und T14 bei natürlichem Regen

T10 (40 mm)	Datum	NS (mm)
	13.06.01	0
	14.06.01	10,7
	15.06.01	0
	16.06.01	2,6
	17.06.01	1,2
	18.06.01	25,5

T12 (28,4 mm)	Datum	NS (mm)
	27.06.01	0
	28.06.01	1,7
	29.06.01	0
	30.06.01	0
	01.07.01	26,7
	02.07.01	0
03.07.01	0	

T14 (38,4 mm)	Datum	NS (mm)
	12.07.01	2,6
	13.07.01	1,7
	14.07.01	5,6
	15.07.01	15,3
	16.07.01	0
	17.07.01	0,8
	18.07.01	0,7
	19.07.01	0,6
	20.07.01	2,4
	21.07.01	8,7
22.07.01	0	
23.07.01	0	

Anhangtabelle 26: Einfluß der Lockerung auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml) bei natürlichem Regen; Beregnungstermine T10, T12 und T14

Termin		mL		oL	
T4	ZS	558,75	a	56,00	b
	SIC	60,38	b	254,63	a
T8	ZS	617,50	a	86,25	b
	SIC	73,75	b	272,00	a
T11	ZS	1032,50	a	101,13	b
	SIC	170,00	b	925,00	a

Anhangtabelle 27: Einfluß der Zwischenfrucht auf den Oberflächen-, Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß (ml) bei natürlichem Regen; Beregnungstermine T4, T8 und T11

Termin		mit ZF		ohne ZF	
T4	ZS	311,63	a	303,13	b
	SIC	157,25	b	157,75	a
T8	ZS	390,00	a	313,75	b
	SIC	198,38	b	147,38	a
T11	ZS	591,13	a	542,50	b
	SIC	568,75	b	526,25	a

Anhangtabelle 28: Einfluß der Lockerung auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.- %) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Modellversuch 2000-2001

Modellversuch 2000-2001		OK		PS	
Weite Grobporen	mL	14,27	a	9,44	a
	oL	17,49	a	9,96	a
Enge Grobporen	mL	7,52	a	6,43	a
	oL	7,71	a	6,94	a
Mittelporen	mL	15,60	a	19,60	a
	oL	15,63	a	16,16	b
Feinporen	mL	11,51	a	11,46	a
	oL	10,92	a	12,41	a
Porenvolumen	mL	48,89	a	46,92	a
	oL	51,75	a	45,47	a
Lagerungsdichte	mL	1,36	a	1,49	a
	oL	1,35	a	1,49	a

Anhangtabelle 29: Einfluß der Zwischenfrucht auf Porenvolumen, Porenverteilung (Vol.-%) und Lagerungsdichte (g/cm^3); Modellversuch 2000-2001

Modellversuch 2000-2001		OK		PS	
Weite Grobporen	mZF	16,43	a	11,63	a
	oZF	15,33	a	7,77	b
Enge Grobporen	mZF	7,38	a	6,91	a
	oZF	7,84	a	6046	a
Mittelporen	mZF	15,66	a	18,1	a
	oZF	15,57	a	17,66	b
Feinporen	mZF	11,62	a	11,95	a
	oZF	10,81	a	11,92	a
Porenvolumen	mZF	51,09	a	48,58	a
	oZF	49,54	a	43,81	b
Lagerungsdichte	mZF	1,35	a	1,47	b
	oZF	1,36	a	1,50	a

Anhangtabelle 30: Wie haben Sie vom Bundesbodenschutzgesetz erfahren?

Antwort	%
Noch gar nicht	11
Durch die Fachpresse	42
Durch die Nachrichten	1
Durch Kollegen	24
Durch Berater	44
Bei Beratungsveranstaltungen	54
Sonstiges	1

Anhangtabelle 31: Fühlen Sie sich über das Bundesbodenschutzgesetz informiert?

Antwort	%
Grundsätzlich ja	49
Im Großen und Ganzen	19
Unzureichend	26
Nein	5

Anhangtabelle 32: Inwiefern sehen Sie Konfliktpotential zwischen dem Gesetz und Ihrer Bodenbewirtschaftung?

Antwort	%
Kein	40
Kein (Aufgrund mangelnder Kenntnis des Gesetzes)	21
Erosion	34
Einschränkungen in der Bewirtschaftung	8

Anhangtabelle 33: Wie oft kontrollieren Sie Ihre Flächen mit Spaten oder Bodensonde auf Bodenschadverdichtungen?

Antwort	%
Gar nicht	38
Zuletzt in der Ausbildung	12
Stichproben	36
Regelmäßig jeder Schlag	14

Anhangtabelle 34: Haben Sie auf Ihren Flächen Anzeichen für Bodenschadverdichtungen beobachten können?

Antwort	%
Nein	20
Lediglich im Vorgewende	76
Stellenweise	21
Auf ganze Parzelle	15

Anhangtabelle 35: Wie beurteilen Sie Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich der Vermeidung von Schadverdichtungen?

Antwort	%
Sehr gut geeignet	40
Nicht besser	44
Nicht geeignet	16

Anhangtabelle 36: Was hat Sie davon abgehalten, auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren umzustellen?

Antwort	%
Unzureichende Beratung	27
Keine Kenntnisse über solche Verfahren	36
Maschinenaustattung	39
Das bisherige Verfahren ist gut	55
Angst vor Ertragseinbußen	48
Angst vor Krankheitsdruck	75
Angst vor Schädlingsdruck	19
Angst vor Unkrautdruck	74
Der Pflug ist da	34
Pflügen gehört dazu	12
Sonstiges	0

Anhangtabelle 37: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen mit Werten > 1,8 MPa im oberen Krumenbereich (0-20 cm Tiefe) (Angaben in %)

Region	nicht	gering	partiell	überwiegend
Euskirchen-Düren	88,06	10,45	1,49	0,00
Köln-Bonn	86,75	12,05	0,00	1,20
Mettmann	61,25	26,25	12,5	0

Anhangtabelle 38: Klassifizierung der Werte > 1,8 MPa im oberen Krumenbereich (0-20 cm Tiefe) (Angaben in %)

Region	1,8-2,3 MPa	2,31-2,8 MPa	2,81-3,3 MPa	>3,3 MPa
Euskirchen-Düren	67,57	27,03	5,40	0,00
Köln-Bonn	64,29	23,81	7,14	4,76
Mettmann	60,50	22,69	8,40	8,40

Anhangtabelle 39: Klassifizierung der Flächen nach Anzahl der Messungen mit Werten > 1,8 MPa in der Krumenbasis (20-45 cm Tiefe) (Angaben in %)

Region	nicht	gering	partiell	überwiegend
Euskirchen-Düren	19,40	19,40	52,24	8,96
Köln-Bonn	4,82	9,64	39,76	45,78
Mettmann	1,25	5	30	63,75

Anhangtabelle 40: Klassifizierung der Werte > 1,8 MPa in der Krumenbasis (20-45 cm Tiefe) (Angaben in %)

Regionen	1,8-2,3 MPa	2,3-2,8 MPa	2,81-3,3 MPa	>3,3 MPa
Euskirchen-Düren	50,00	21,94	15,11	12,95
Köln-Bonn	31,02	25,91	12,41	30,66
Mettmann	23,24	22,26	15,38	39,12

10. Liste der Posterpräsentationen, Vorträge und Veröffentlichungen

- **Posterpräsentationen:**

- im Landtag NRW (2001)
- in der Landesvertretung NRW in Brüssel (2001)
- anlässlich der 100-Jahr Feier des Instituts für Pflanzenbau (2001)

- **Vorträge:**

- **Franken, H. und Friedrich, G. (2001):** Penetrometermessungen zur Erfassung von Bodenverdichtungen, Befragung über Bodenverdichtungen und Bodenschutz in ausgewählten Regionen in NRW. 14. wissenschaftlichen Fachtagung an der Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.

- **Veröffentlichungen:**

- **Friedrich, G., Sadowski, S., Cramer, B und Franken, H. (2002):**
Penetrometermessungen zur Erfassung von Bodenverdichtungen, Befragung über Bodenverdichtungen und Bodenschutz in ausgewählten Regionen in NRW. Tagungsband der 13. und 14. Wissenschaftlichen Fachtagung:
Fusarium-Befall und Mykotoxinbelastung von Getreide;
Schadverdichtungen in Ackerböden. Teil 2, S. 114-124. Bonn

11. Kurzfassung

Landbewirtschaftung und Hochwasserschutz

- Vorsorgender Hochwasserschutz durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen -

Der Zustand landwirtschaftlich genutzter Flächen ist für die Aufnahme und Retention des Niederschlagswassers und somit auch für das Abflußverhalten von entscheidender Bedeutung. Eine Erhöhung der Wasserinfiltration durch ackerbauliche Maßnahmen kann zu einer verbesserten Speicherfähigkeit des Bodens und so zu einer Entlastung der Vorfluter führen. Ziel dieser Arbeit war die quantitative Erfassung von Wasserabfluß in Abhängigkeit von Unterbodenlockerungsmaßnahmen bzw. von Zwischenfrüchten. Von besonderem Interesse war dabei der unterirdisch auf Bodenverdichtungen im Bereich der Krumbasis abfließende „Zwischenschichtabfluß“. Darüber hinaus sollte die lokale Verbreitung von anthropogen bedingten Krumbasisverdichtungen (Pflugsohlen) in Nordrhein-Westfalen untersucht werden.

In Freiland- und Modellversuchen wurde der Einfluß von Lockerungsmaßnahmen und Zwischenfrüchten auf das Abflußverhalten untersucht. Durch den Einsatz eines Regensimulators im Modellversuch konnte die Wirkung dieser ackerbaulichen Maßnahmen unter kontrollierten „Niederschlagsbedingungen“ geprüft werden.

Um die Verbreitung von Bodenverdichtungen in Nordrhein-Westfalen zu erfassen, wurden Befragungen der Betriebsleiter und Penetrometermessungen in 85 landwirtschaftlichen Betrieben in den Regionen Euskirchen-Düren, Köln-Bonn und Mettmann durchgeführt.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Unterbodenlockerung führte in den Freilandversuchen zu Veränderungen im Abflußverhalten des Niederschlagswassers. Der Einfluß der Lockerung auf den Zwischenschichtabfluß war deutlich stärker ausgeprägt als der Einfluß auf den Oberflächenabfluß. Der geringere Zwischenschichtabfluß der gelockerten Varianten weist auf die bessere Infiltration des Niederschlagswassers in tiefere Bodenschichten hin. Dieser Effekt konnte jedoch nur in der ersten Versuchsperiode (1999-2000) festgestellt werden. In der zweiten Versuchsperiode (2000-2001) hatte die vorjährige Lockerung des Bodens keine Wirkung mehr.
- Im Modellversuch führte die Lockerung bei den meisten Beregnungsmaßnahmen zu einer Verzögerung des Abflußbeginns über der Zwischenschicht (simulierte Pflugsohle) bzw. zu einem schnelleren vertikalen Wasserabfluß. Es wurde festgestellt, daß - unabhängig von der

Höhe der Beregnung bzw. des natürlichen Niederschlages - bei den gelockerten Versuchsvarianten deutlich mehr Wasser versickern konnte. Dementsprechend waren dann der Zwischenschichtabfluß geringer und der Sickerwasseranteil höher.

- Die Zwischenfrucht als Mulchschicht bewirkte sowohl eine Verzögerung des Oberflächenabflusses, als auch eine Verringerung der Menge des Oberflächenwassers. Beim Zwischenschicht- und Sickerwasserabfluß wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt.
- Auf der Basis von Penetrometermessungen wurde ein hoher Anteil der untersuchten Flächen als „partiell“ oder „überwiegend“ verdichtet klassifiziert. In allen drei untersuchten Regionen weist die Krumenbasis stärkere Verdichtungen auf als die Oberkrume, ein Hinweis für die Verbreitung von Pflugsohlen. Krumenbasisverdichtungen traten nach den vorliegenden Untersuchungen in den Räumen Mettmann und Köln-Bonn stärker auf als im Raum Euskirchen-Düren. Die einzelnen Regionen unterscheiden sich hauptsächlich in der Niederschlagshöhe. Die stärkere Belastung des Bodens im Raum Mettmann kann mit den dort herrschenden Bodenfeuchtebedingungen zum Bearbeitungszeitpunkt begründet werden.
- Die Ergebnisse der Befragung deuten darauf hin, daß hinsichtlich der Kenntnisse über das Bundesbodenschutzgesetz, über Bodenverdichtungen und Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung noch Beratungsbedarf besteht. Die Einschätzung der befragten Betriebsleiter über Bodenverdichtungen auf ihren Flächen stimmen nicht mit den Ergebnissen der Penetrometermessungen überein.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, daß ackerbauliche Maßnahmen zu einer verbesserten Wasserinfiltration und somit zu einem erhöhten Speichervermögen des Bodens führen können. Krumenbasisverdichtungen (Pflugsohlen) sind in Nordrhein-Westfalen unterschiedlich stark verbreitet. Die Bedeutung von Krumenbasisverdichtungen für den Zwischenschichtabfluß konnte hier nachgewiesen werden; eine Beseitigung bzw. eine Vermeidung von Bodenverdichtungen an der Krumenbasis führt zu einem verbesserten Wasserhaushalt. Eine Beseitigung bzw. Vermeidung von Bodenverdichtungen durch ackerbauliche Maßnahmen kann sicher nicht allein Hochwasser vermeiden, aber sie kann einen erheblichen Beitrag zum vorsorgenden Hochwasserschutz leisten.