

Beurteilung des Einflusses
einer angepassten Ackernutzung
auf den Hochwasserabfluss

Vom Fachbereich Geowissenschaften und Geographie
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Geogr. Matthias Akkermann

geboren am 14.8.1970 in Hannover

2004

Hochwasserschutz / Bodenschutz / Oberflächenabfluss
flood control / soil conservation / runoff

Referent: Prof. Dr. Th. Mosimann

Korreferent: Prof. Dr. G. Kuhnt

Tag der Promotion: 8. Juni 2004

für Almut und Clara

Abstract

In recent years, frequent extreme flooding events which have caused considerable damage to buildings and infrastructure demonstrate clearly that flood prevention measures are necessary. Possible modifications of agricultural practices that can lead to a reduction in runoff have not yet been sufficiently explored. Such modifications are the topic of this study. The effects of tillage systems that take into account the local site conditions (“good agricultural practice”) are evaluated.

The evaluation of the effects of different tillage systems was based on a systematic review of all available scientific results as well as practical experiences. Mathematical models were used only to supplement the verbal evaluation, but they do not form its basis.

The effects of a modified tillage system can be summarised as follows: at the level of a single field, the reduction in surface runoff varies greatly. Under unfavourable conditions, the effects can be so small that the benefit for flood prevention becomes minute. By contrast, complete infiltration of precipitation water even during extreme rainfall events may be observed if the conditions are favourable. On average, a considerable reduction in surface runoff and an increase of regional retention capacities can be expected. The reduction in surface runoff under modified management regimes, i.e. soil conserving tillage including prevention of soil compaction, lies in the range of 10 to 50 % of the precipitation sum. On average, the reduction will be about 30 %.

Although the runoff reduction is not fully effective in streams and rivers due to subterranean runoff components, it is clearly recognisable. The magnitude of the reduction decreases with increasing size of the catchment area as other factors, e.g. the superimposition of runoff peaks, play a greater role. An exact quantification of the effects is not possible. However, it is highly probable that the runoff volume and the runoff peak during a flood event can be reduced by at least 12 % of the precipitation sum. Consequently, changes of the tillage system can have considerable effects on the volume and peak height of a flood event.

Kurzzusammenfassung

Die Häufigkeit extremer Hochwasserereignisse der letzten Jahre, die zum Teil zu erheblichen Schäden an Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen geführt haben, zeigen den Handlungsbedarf für Maßnahmen zum Hochwasserschutz auf. In diesem Zusammenhang noch unzureichend erforscht sind die Möglichkeiten im Bereich der Landbewirtschaftung, die zu einer Verringerung des Hochwasserabflusses beitragen könnten. Diese sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Es wurden die Wirkungen von Maßnahmen einer auf die standörtlichen Verhältnisse angepassten Ackernutzung bewertet, die der guten fachlichen Praxis entsprechen.

Die Beurteilung der Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen im Bereich der Ackernutzung erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf Grundlage einer verbal argumentativen, systematischen Auswertung aller verfügbaren Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen. Modellrechnungen werden nur ergänzend eingesetzt und bilden nicht die Grundlage der Bewertung.

Die Effekte, die sich aus einer angepassten Ackernutzung ergeben, können wie folgt beschrieben werden. Auf der Ebene der einzelnen Parzelle ist die Spannweite des Ausmaßes der möglichen Oberflächenabflussreduzierung sehr groß. Bei sehr ungünstigen Konstellationen der beteiligten Faktoren können die Effekte so gering sein, dass der Nutzen für den Hochwasserschutz gegen Null geht. Andererseits konnte auch eine vollständige Versickerung des Niederschlagswassers bei extremen Niederschlagsereignissen beobachtet werden. Im Durchschnitt kann von einer beträchtlichen Reduzierung des Oberflächenabflusses bzw. einem stark gestiegenen Gebietsrückhalt ausgegangen werden. Diese Oberflächenabflussreduzierung liegt bei einer angepassten Ackernutzung, also bei einer Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung einschließlich der Verminderung oder Vermeidung von Bodenverdichtungen in einer Größenordnung von 10 bis 50 % - im Mittel von 30 % der Niederschlagssumme.

Auch wenn durch unterirdische Abflusskomponenten diese Abflussreduzierung nicht zu 100 % im Fließgewässer wirksam wird, macht sie sich deutlich bemerkbar. Ihr Ausmaß nimmt mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes ab, da dann andere Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Überlagerung von Abflusswellen dominieren. Eine exakte Quantifizierung der Effekte kann nicht durchgeführt werden. Es kann aber mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass das Abflussvolumen und der Spitzenabfluss bei einem Hochwasserereignis um einen Betrag von mind. 12 % der Niederschlagssumme verringert werden kann. Das bedeutet, dass sich durch Änderungen in der Ackernutzung spürbare Effekte in Bezug auf Abflussvolumen und Abflussspitze eines Hochwassers ergeben.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	1
Kurzzusammenfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
1. Einleitung	8
2. Methodisches Vorgehen	11
3. Allgemeines zum Einfluss der Ackernutzung auf den Oberflächenabfluss	17
3.1 Enger Zusammenhang zwischen Ackernutzung, Bodenschutz und Oberflächenabfluss	17
3.2 Überblick über die Abflussbildung auf einer Parzelle.....	18
4. Ableitung von Teilzielen zur Steigerung der Infiltration und Minimierung des Oberflächenabflusses durch Bewirtschaftungsänderungen	21
4.1 Splash-Wirkung vermeiden / verringern.....	21
4.2 Verschlämmungen vermeiden / verringern.....	22
4.3 Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen.....	23
4.4 Bodengefüge stabilisieren.....	25
4.5 Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern.....	27
4.6 Makroporen erhalten / Makroporenbildung fördern	28
4.7 Bodenverdichtungen vermeiden.....	31
5. Literaturanalyse – Qualitative Bewertung von Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Steigerung der Infiltration	34
5.1 Konservierende Bodenbearbeitung.....	34
5.2 Bodenverdichtungen vermeiden bzw. verringern	54
5.3 Wahl der Kultur und Gestaltung der Fruchtfolge	72
6. Literaturanalyse - Dränagen und Hochwasserschutz	83

7.	Quantitative Bewertung von Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Oberflächenabflussreduzierung	90
7.1	Simulation - Abschätzung der Effekte einer Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung mit Hilfe des Erosionsmodells Erosion 3D.....	90
7.1.1	Modell: Erosion 3D	90
7.1.2	Simulationsszenarien.....	93
7.1.3	Simulationsergebnisse der Szenarien	97
7.1.4	Kritik am Modell und an den Simulationsannahmen.....	103
7.2	Literaturanalyse – Quantifizierung der Effekte von Änderungen in der Bewirtschaftung auf die Abflussreduzierung	105
8.	Beurteilung der Wirksamkeit und Wechselwirkungen von Maßnahmen auf der Flussgebietskala	109
9.	Fazit.....	121
10.	Zusammenfassung	130
11.	Literatur	133

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1	Schwerpunktsetzung der Kapitel in Bezug auf die beiden Betrachtungsdimensionen: Betrachtungsmaßstab (Einzelparzelle \leftrightarrow Einzugsgebiet / Flussgebiet) und Wertigkeit (Qualität \leftrightarrow Quantität).....	12
Abb. 2	Ablaufschema zum methodischen Vorgehen und Gliederung der Arbeit	13
Abb. 3	Prozess-Korrelations-Systemmodell der Abflusentstehung auf einzelnen Parzellen unter Berücksichtigung der Einflussnahme durch die Landbewirtschaftung.....	19
Abb. 4	Änderung des Gesamtporenvolumens sowie der Porengrößenverteilung in Abhängigkeit von der Bodenbelastung für verschiedene Bodenartengruppen (DVWK, 1997).....	32
Abb. 5	Systematik der Bodenbearbeitungsverfahren gemäß Definition der KTBL-ARBEITSGRUPPE (1993)	36
Abb. 6	Durchschnittliche Besiedlungsdichte der drei häufigsten Regenwurmart (Lumbricus terrestris, Allolobophora caliginosa und Allolobophora rosea) in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität (FRIEBE, 1994)	37
Abb. 7	Anzahl der angeschnittenen Regenwurmröhren pro m ² in 20 und 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität (FRIEBE, 1994)	37
Abb. 8	Vergleich der Volumenanteile der Regenwurmgänge in Prozent bezogen auf das Gesamtbodenvolumen eines gepflügten (-o-) und eines seit 4 Jahren ungepflügten (-•-) Bodens in Abhängigkeit von der Bodentiefe (vgl. Tab. 8) (EHLERS, 1975).....	39
Abb. 9	Einfluss der Bodenbearbeitungsintensität (konventionelle Bodenbearbeitung, konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat) auf verfahrenstechnische, betriebswirtschaftliche sowie ökologische Aspekte (nach TEBRÜGGE, 1994)	40
Abb. 10	Tendenzielle Tiefenwirkung des Bodendrucks in Abhängigkeit von dem Bodenbearbeitungsverfahren (BRUNOTTE & SOMMER, 1998).....	55
Abb. 11	Eindringwiderstand einer Parabraunerde aus Löß eines Waldstandortes im Vergleich zu einem ackerbaulich genutzten Standort (VAN DER PLOEG & SIEKER, 2000)	55
Abb. 12	Einfluss der Wirtschaftsweise und der mechanischen Belastung durch schweres Gerät auf das Porenvolumen (PV) bzw. die Lagerungsdichte (LD) von Lössböden an vier Standorten in Südniedersachsen (nach EHLERS, 2003).....	56
Abb. 13	Porenvolumina und Porengrößenverteilung bei unterschiedlichen Radlasten im Vergleich zu einer nichtbefahrenen Grasfläche (FENNER, 1997).....	59
Abb. 14	Beispiel für eine Reduzierung der Überrollhäufigkeit auf Kosten der Bodenbelastung und damit auf Kosten der Unterbodenverdichtung (FENNER, 1997)	62
Abb. 15	Oszillation des Grundwasserstandes aufgrund gesteigerter Evapotranspiration bei verschiedenen Hochmoor-Stadien im Jahresgang von Mai bis Oktober (EGGELSMANN, 1981b) .	85
Abb. 16	Vergleich gemessener Abfluss mit Dränagen mit berechnetem Abfluss bei einer hypothetischen Landnutzung ohne Dränagen (KAO, 1980).....	87
Abb. 17	3D-Darstellung des für die Modellierung verwendeten Standortgebietes	94
Abb. 18	Simulationsergebnisse: Vergleich der Oberflächenabflüsse bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung – Saatbettzustand, verschiedene Bodenbedingungen.....	98
Abb. 19	Vergleich der Oberflächenabflussreduzierung durch Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung – Saatbettzustand, bei unterschiedlichen Niederschlagshäufigkeiten, gemittelt über verschiedene Bodenbedingungen.....	100
Abb. 20	Simulationsergebnisse: Vergleich der Oberflächenabflüsse bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung – Bestockungsstadium, Bodenart Ut4.....	102
Abb. 21	Vergleich der Oberflächenabflussreduzierung durch Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung bei unterschiedlichen Niederschlagshäufigkeiten, Bestockungsstadium, Bodenart Ut4.....	102
Abb. 22	Prozentualer Anteil des infiltrierten Niederschlagswassers an der Gesamtniederschlagsmenge des jeweiligen Niederschlagsereignisses (Tab. 25) bei verschiedenen	

	Wiederkehrwahrscheinlichkeiten, arithmetisch gemittelt über verschiedene Bodenzustände (Tab. 22 und Tab. 23 - Saatbettzustand).....	104
Abb. 23	Absolute Niederschlagsmengen und absolute Infiltrationsmengen im Vergleich von konventioneller mit konservierender Bodenbearbeitung bei unterschiedlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeiten der Niederschlagsereignisse – arithmetisch gemittelt über verschiedene Bodenzustände (Tab. 22 und Tab. 23 - Saatbettzustand), sowie die dazugehörigen Niederschlagsmengen	104
Abb. 24	Infiltrationsverlauf von Beregnungsversuchen auf Ackerland mit konventioneller sowie mit konservierender Bodenbearbeitung (SCHMIDT ET AL., 2001)	107
Abb. 25	Schematisch dargestellte Beispiele von Einflussgrößen auf die Form der Ganglinie in einem Gewässer (auf der Grundlage von DYCK & PESCHKE, 1995).....	110
Abb. 26	Modellvorstellung der Infiltration und der Bodenwasserbewegung eines überstauten Mineralbodens, ohne Berücksichtigung von Preferential flow.....	113
Abb. 27	Vergleich der Variabilität des Mikroporensystems mit dem Makroporensystem nach dem Konzept der repräsentativen Elementarvolumina (repräsentative elementary volume = rev). (Beven & Germann, 1981)	114
Abb. 28	Makroporenfluss - Beispiele für die Variabilität des vertikalen Verteilungsmuster des Brilliant Blue Tracers bei drei verschiedenen Böden (nach FLURY & FLÜHLER, 1994).....	115
Abb. 29	Hohe räumliche Variabilität des Makroporenflusses innerhalb eines Bodens (nach FLURY & FLÜHLER, 1994).....	116
Abb. 30	Prozentuale Aufteilung der Abflusskomponenten (oben), sowie der Abflussganglinien Separation (unten) bei Schneeschmelze in einem Einzugsgebiet in Kanada (MAULÉ & STEIN, 1990).....	118
Abb. 31	Schematisch dargestellte Fließwege der Wasserbewegung in einem Boden mit Makroporen	120
Abb. 32	Stark vereinfachte, schematische Darstellung der Effekte einer Umstellung auf eine angepasste Ackernutzung (vor allem konservierende Bodenbearbeitung und Schutz vor Bodenverdichtungen).....	128

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1	Literatur-Auswertungs-Tabelle: Muster mit Tabellenkopf und Spalten-Nummern	15
Tab. 2	Legende der Literatur-Auswertungs-Tabellen (Tab. 9, 12 und 15)	16
Tab. 3	Oberflächenrauigkeit verschiedener Landnutzungen bzw. Bodenbedeckungen, angegeben als Rauigkeitsbeiwert n nach Manning (verändert nach MORGAN, 1999; aus: PETRYK & BOSMAJIAN, 1975; TEMPLE, 1982; ENGMAN, 1986).....	28
Tab. 4	Angaben verschiedener Autoren zum Durchmesser, Anzahl pro m ² und zur Tiefe von Makroporen (BEVEN, 1982).....	30
Tab. 5	Vergleich der Makroporenintensität bei verschiedenen Nutzungsintensitäten auf einem Maisacker in Zentral Iowa (ANKENY ET AL., 1991).....	33
Tab. 6	Gesamtbewertung der Maßnahmen zur konservierenden Bodenbearbeitung.....	34
Tab. 7	Einfluss der Grundbodenbearbeitung auf den Wasserabfluss nach langer Trockenheit (Ehlers, 1992).....	36
Tab. 8	Anzahl an Regenwurmgingängen pro m ² in einem gepflügten und in einem seit vier Jahren ungepflügten Acker in verschiedenen Tiefen (EHLERS, 1975)	38
Tab. 9	Literatur-Auswertungs-Tabelle zur konservierenden Bodenbearbeitung	52
Tab. 10	Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlungen – konservierende Bodenbearbeitung / Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung	53
Tab. 11	Gesamtbewertung der Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen	54
Tab. 12	Literatur-Auswertungs-Tabelle: Bodenverdichtungen verringern bzw. vermeiden.....	69

Tab. 13	Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlungen – Bodenverdichtungen durch indirekte und direkte Maßnahmen minimieren.....	71
Tab. 14	Gesamtbewertung der Maßnahmen zur Wahl der Kultur	72
Tab. 15	Gesamtbewertung der Maßnahmen zum Anbau von Zwischenfrüchten	74
Tab. 16	Literatur-Auswertungs-Tabelle: Wahl der Kultur und Gestaltung der Fruchtfolge.....	81
Tab. 17	Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlungen – Wahl der Kultur und Gestaltung der Fruchtfolge	82
Tab. 18	Wirkung der Dränage in acht kleinen Einzugsgebieten in Großbritannien auf den Hochwasserscheitelabfluss in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand und der Tiefenlage einer undurchlässigen Schicht (nach ROBINSON, 1989)	87
Tab. 19	Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlungen – Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Dränagen.....	89
Tab. 20	Modelleingangsgrößen des Erosionsmodells Erosion 3D (SCHMIDT ET AL., 1996)	92
Tab. 21	Modellausgabegrößen des Erosionsmodells Erosion 3D (VON WERNER & SCHMIDT, 1996).....	92
Tab. 22	Eingangsdaten für die Oberflächenabflusssimulation bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung, für verschiedene Bodenarten (MICHAEL ET AL., 1996).....	95
Tab. 23	Eingangsdaten für die Oberflächenabflusssimulation bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung, für verschiedene Bodenarten – Bodenartendateien (MICHAEL ET AL., 1996) .	96
Tab. 24	Eingangsdaten für die Oberflächenabflusssimulation bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung für die Bodenart Ut4 bei 100 % Bodenbedeckung kurz vor der Ernte (MICHAEL ET AL., 1996)	96
Tab. 25	Für die Szenarien verwendete Extremniederschläge (MICHAEL ET AL., 1996).....	97
Tab. 26	Effekte verschiedener Bestockungsgrade und Bodenbearbeitungsmethoden bei künstlicher Beregnung auf verschiedene Parameter des Oberflächenabflusses (MOSTAGHIMA ET AL., 1987).....	106
Tab. 27	Effekte verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden bei künstlicher Beregnung auf den Oberflächenabfluss / die Infiltration (Originaldaten aus SCHMIDT ET AL., 2001).....	106
Tab. 28	Die neun größten Scheitelabflüsse am Pegel Köln seit 1926 und die Abflussfüllen dieser Wellen oberhalb der jeweiligen Basisabflüsse (ENGEL, 1997).....	111
Tab. 29	Abflussreduzierung bei der konservierenden Bodenbearbeitungsvariante gegenüber der konventionellen - Ergebnis der Simulationsrechnungen von Kap. 7.1 (oben: Angaben absolut [mm] und unten: Angaben relativ [%]).....	122
Tab. 30	Abflussreduzierung der konservierenden Bodenbearbeitungsvariante zur konventionellen für Böden mit der Bodenart Ut4 - Ergebnis der Simulationsrechnungen von Kap. 7.1	122
Tab. 31	Angaben zur Abflussreduzierung der konservierenden Bodenbearbeitungsvariante gegenüber der konventionellen aus verschiedenen Quellen.....	124
Tab. 32	Abflussvolumina und Oberflächenabfluss des deutschen Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße unterhalb von Görlitz und oberhalb von Zittau für den simulierten Ist-Zustand und verschiedene simulierte Szenarien (DBU, 2002).....	126

1. Einleitung

Überschwemmungen von Flüssen haben in unseren von Naturkatastrophen relativ verschonten Breiten eine große Bedeutung. Sie richteten in der Vergangenheit große Schäden an. Allein durch das Jahrhunderthochwasser am Rhein im Dezember 1993 kamen 5 Menschen ums Leben. Der volkswirtschaftliche Schaden belief sich auf etwa 600 Mio. €. Zusammen mit dem Jahrhunderthochwasser von 1995 am Rhein ergab sich ein volkswirtschaftlicher Schaden allein in Deutschland von etwa 1 Mrd. €. Große Schäden wurden ebenfalls durch das Oderhochwasser von 1997 angeichtet. 2002 führte das Jahrhunderthochwasser der Elbe wieder zu extremen Schäden an Wohngebäuden und Infrastruktureinrichtungen (ca. 740 km Straßen, 180 Brücken und 500 km Eisenbahn wurden zerstört) und forderte zudem mindestens 15 Menschen das Leben.

Um Schäden durch Überschwemmungen entgegenzuwirken werden verschiedene Maßnahmen im Bereich des Hochwasserschutzes ergriffen. Hierbei dominieren Schutzmaßnahmen des technischen Hochwasserschutzes, wie beispielsweise der Bau von Deichen und Schutzmauern, die Anlage bzw. die gezielte Steuerung von Rückhaltebecken und Talsperren. Auch gewinnt nicht zuletzt durch die Vergegenwärtigung der Schäden der letzten großen Überschwemmungen die Beachtung des Bauverbotes hochwassergefährdeter Flächen wieder an Bedeutung. Alternative Schutzkonzepte, die auf eine Begrenzung der Abflusentstehung hinwirken, wurden in den letzten Jahren im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft entwickelt und mancherorts schon verwirklicht. Hierbei wird das auf versiegelten Flächen anfallende Regenwasser gezielt zur Versickerung gebracht oder zumindest gedrosselt abgeleitet.

Überschwemmungen von Flüssen können auch zukünftig nicht verhindert werden. Es besteht aber Handlungsbedarf, die Maßnahmen zum Hochwasserschutz zu erweitern, um zukünftig Personen- und Sachschäden zu verhindern bzw. weiter zu verringern. Verschiedene Untersuchungen vor allem aus der Erosionsforschung weisen darauf hin, dass durch Änderungen in den Anbauverfahren bei der Ackernutzung der Anteil des Oberflächenabflusses stark verringert werden kann. Da rund 34 % der Landesfläche der Bundesrepublik Deutschland Ackerland sind, ist es gut vorstellbar, dass allein aufgrund der Flächenrelevanz hier ein Beitrag zum Hochwasserschutz geleistet werden kann.

Es werden daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Möglichkeiten zur Steigerung der Retention von Niederschlagswasser auf ackerbaulich genutzten Flächen durch Verbesserung der Infiltrationsbedingungen und der Speichereigenschaften bewertet. Zielsetzung ist die Untersuchung des Beitrags einer angepassten Ackernutzung für den Hochwasserschutz.

Unter der angepassten Ackernutzung wird in diesem Zusammenhang eine an die standörtlichen Verhältnisse angepasste, nachhaltige Bewirtschaftung des Bodens verstanden. Eine Bewirtschaftung die, wie es im „Gesetz zum Schutz des Bodens“ (BBODSCHG, 1998) in §1 gefordert wird, „nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen“ hat. Diese Funktionserhaltung bzw. Wiederherstellung soll laut Gesetz durch die „gute fachliche Praxis“ bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung umgesetzt werden. Die Zielsetzung für die vorliegende Arbeit könnte damit auch wie folgt formuliert werden: Welchen Beitrag kann eine an die Anforderungen des BBODSCHG (1998) angepasste, großflächig umgesetzte, gute fachliche Praxis der Ackernutzung für den Hochwasserschutz leisten?

Hierzu wird im Einzelnen untersucht, welchen Beitrag die Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung auf die Reduzierung des Oberflächenabflusses liefert. Da die konservierende Bodenbearbeitung im Schutz vor Bodenerosion durch Wasser eine Schlüsselstellung einnimmt, wird davon ausgegangen, dass sie auch einen bedeutenden Beitrag für den Hochwasserschutz leisten kann.

Auch wird davon ausgegangen, dass das Vermeiden und Vermindern von Bodenverdichtungen positive Effekte für den Hochwasserschutz hat. Bodenverdichtungen bewirken eine Verringerung der Durchlässigkeit und Begrenzung der Infiltrationskapazität. Darüber hinaus reduzieren sie die Speichereigenschaften der Böden. Es wird geklärt, welchen Beitrag die Vermeidung bzw. Verminderung der Bodenverdichtungen für den Hochwasserschutz liefert.

Ebenso wird die Bedeutung der Wahl der Kultur und Gestaltung der Fruchtfolge in Bezug auf die Abflussreduzierung untersucht. Darüber hinaus wird das Abflussverhalten von dränierten zu undrännierten Flächen analysiert. Die Auswirkungen von Dränagen auf den Hochwasserabfluss werden dabei standortdifferenziert beschrieben, so dass auch diesbezüglich konkrete Hinweise für den hochwasserabflussreduzierenden Umgang gegeben werden können.

Die Basis für die Untersuchung der aufgeworfenen Fragen bildet eine sehr umfangreiche Literaturliteraturanalyse. Die Problemstellung ist zu komplex, als dass im Rahmen einer Dissertation eine sinnvolle Modellierung, geschweige denn ein Versuch neue Erkenntnisse liefern würde. Es wird vielmehr aus einer Vielzahl von Einzelinformationen, aus unterschiedlichen Forschungsrichtungen, eine sinnvolle Synthese durchgeführt, die verwertbare Ergebnisse liefert. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit stark strukturierte Literaturliteraturanalyse steht daher im Mittelpunkt und wird nur durch Simulationsrechnungen ergänzt.

Um die aufgeworfenen Fragen im Rahmen der vorliegenden Arbeit beantworten zu können, wird zunächst das Prozessgefüge zwischen Ackernutzung und Oberflächenabfluss herausgearbeitet. Es werden Teilziele abgeleitet und analysiert, die im Rahmen der Ackernutzung zu einer Steigerung der Infiltration und damit zu einer Minimierung des Oberflächenabflusses beitragen. Diese Teilziele bilden die Basis für die anschließende systematische Literaturliteraturanalyse, bei der konkrete Bewirtschaftungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer oberflächenabflussreduzierenden Wirkung untersucht werden. Die sich daraus ergebende Beurteilung der verschiedenen Maßnahmen hinsichtlich ihrer qualitativen Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss werden durch Angaben zur Aussagesicherheit, Umsetzbarkeit und ihrer heutigen Verbreitung ergänzt.

Im Anschluss an diesen qualitativen Teil schließt sich ein quantitativer Teil an. Dabei wird die Wirksamkeit der Oberflächenabflussreduzierung auf der Parzellenebene sowohl mit Hilfe von umfangreichen Simulationsrechnungen mit dem Erosionsmodell Erosion 3D, als auch mit Angaben aus bestehenden Forschungsergebnissen quantifiziert. Da aufgrund von unterirdischen Abflusskomponenten die hierbei ermittelte Oberflächenabflussreduzierung nicht vollständig im Gerinneabfluss wirksam wird, muss der Betrachtungsmaßstab von der Parzellenebene auf die Einzugsgebietsebene erweitert werden.

Hierzu wird das Prozess-Wirkungsgefüge auf der Einzugsgebietsebene vor allem im Hinblick auf unterirdische Abflusskomponenten analysiert. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Einflüsse des Preferential Flow's und auf das Ausdrücken von Altwasser gelegt. Aufgrund der Beurteilung

dieser Effekte erfolgt dann die Gesamtquantifizierung des Beitrags der angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss. Konsequenzen, die sich hieraus für den Hochwasserschutz ergeben, werden beschrieben.

2. Methodisches Vorgehen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss einer an die Belange des Bodenschutzes angepassten Ackernutzung für den Hochwasserschutz in Bezug auf konkrete Bewirtschaftungsmaßnahmen beurteilt und quantifiziert. Die Basis für diese Analyse bildet eine systematische, synthetische Auswertung der bestehenden Literatur.

Grundsätzlich hätte auch die Möglichkeit bestanden, eine Einzugsgebietsmodellierung durchzuführen, bei der die Effekte von Bewirtschaftungsänderungen simuliert worden wären. Hiervon wurde aber aus verschiedenen Gründen, die im Folgenden kurz erläutert werden, bewusst abgesehen. Für grobe Abschätzungen liegen entsprechende Simulationsergebnisse in der Literatur vor, auf die für die Quantifizierung von Effekten zurückgegriffen werden kann (z.B. DBU, 2002). Bei einer genaueren Einzugsgebietsmodellierung kann aufgrund der Komplexität der hierbei beteiligten Prozesse und den Prozessrückkopplungen, den nicht verfügbaren hoch aufgelösten Daten, die für diese Modellrechnung notwendig wären und der noch unzureichenden Prozesskenntnis in wesentlichen Teilbereichen nicht mit abgesicherten Ergebnissen gerechnet werden. Zudem kann durch die Wahl der Eingangs- und Randbedingungen in starkem Maße auf das Modellergebnis Einfluss genommen werden. Insgesamt wird heute in Teilbereichen zu viel modelliert. Oft werden für ähnliche Fragestellungen unterschiedliche Einzugsgebiets-Modelle erstellt, die aufgrund der unzureichenden Datenbasis nicht hinreichend kalibriert und validiert werden können. Gemessen an den Ergebnissen ist der Aufwand sehr hoch und zudem im Hinblick auf die Fragestellungen nicht immer effektiv. Auf das Problem der oft unzureichenden Übertragbarkeit von Modellen auf andere Gebiete sei hier nur hingewiesen.

Aus den dargelegten Gründen wird ersichtlich, dass eine eigene Modellierung von Bewirtschaftungseffekten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht als Basis für die Beurteilung der hochwasserermindernden Wirkung einer angepassten Ackernutzung herangezogen, sondern nur ergänzend eingebunden wird. Es wird die Stärke der fächerübergreifenden geographischen Disziplin genutzt, um eine strukturierte Auswertung der bestehenden unterschiedlichen Einzelinformationen aus verschiedenen Forschungsrichtungen durchzuführen, um dann eine angemessene Synthese auf Grundlage einer verbal argumentativen Abwägung erstellen zu können, die verwertbare Ergebnisse liefert. Die Literaturanalyse steht daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Mittelpunkt und wird nur durch eigene Simulationsrechnungen (Kap. 7.1) ergänzt.

Differenzierung in zwei Betrachtungsdimensionen

Bei der Beurteilung des Einflusses einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss werden innerhalb der vorliegenden Arbeit zwei Betrachtungsdimensionen, wie in Abb. 1 dargestellt, unterschieden. Die eine Dimension differenziert den Betrachtungsmaßstab in Einzelparzelle und Einzugsgebiet bzw. Flussgebiet. Diese Unterscheidung ist für das systematische Vorgehen wichtig, da im ersten Schritt die Verbesserung der Infiltrationsbedingungen und die Reduzierung des Oberflächenabflusses untersucht werden und die Bewirtschaftungsmaßnahmen sich an Parzellen ausrichten. Die unterirdischen Abflussvorgänge wie beispielsweise der Präferential Flow und das Ausdrücken von Altwasser sowie der Abflussbildungsprozess im

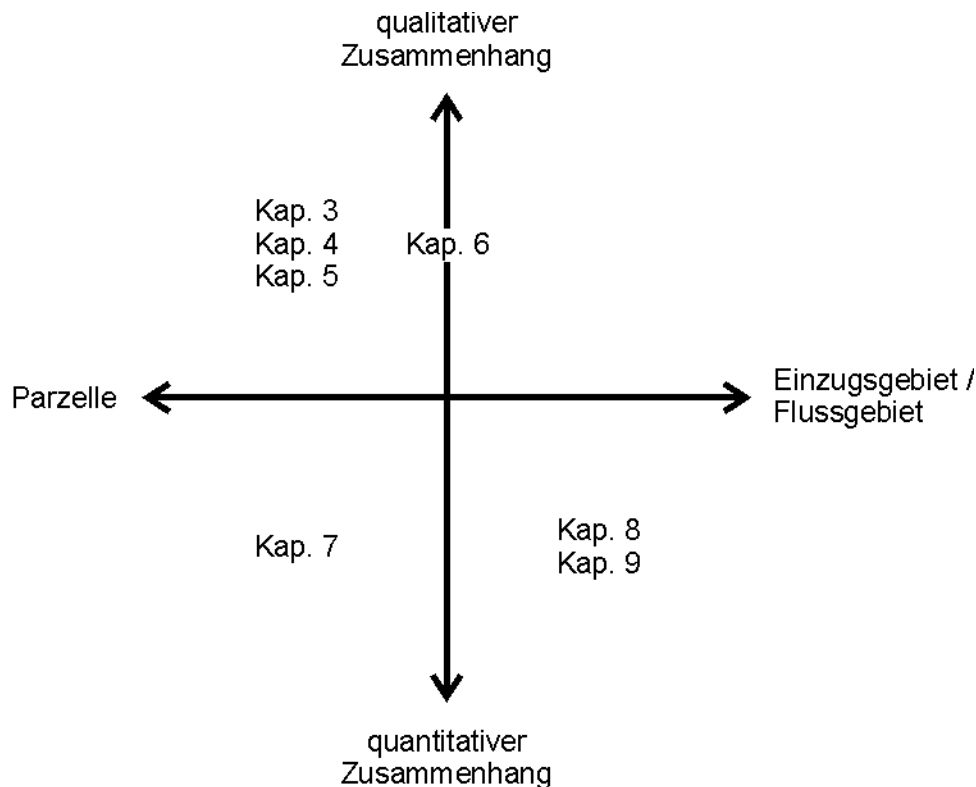


Abb. 1 Schwerpunktsetzung der Kapitel in Bezug auf die beiden Betrachtungsdimensionen: Betrachtungsmaßstab (Einzelparzelle \leftrightarrow Einzugsgebiet / Flussgebiet) und Wertigkeit (Qualität \leftrightarrow Quantität)

Gewässernetz werden erst im zweiten Schritt der Untersuchung auf der Einzugsgebietsebene mitberücksichtigt. Die in den verschiedenen Kapiteln ausgewertete Literatur beinhaltet eine entsprechende Gültigkeit in Bezug auf die jeweiligen Maßstabsebenen.

Die zweite Betrachtungsdimension unterscheidet die Wertigkeit in Bezug auf qualitative und quantitative Aussagen. Bevor die verschiedenen behandelten Maßnahmen der angepassten Ackernutzung in ihren Effekten für den Hochwasserschutz quantifiziert werden, wird der qualitative Zusammenhang detailliert herausgearbeitet. In Abb. 1 kann die Schwerpunktsetzung der verschiedenen Kapitel in Bezug auf die beiden Betrachtungsdimensionen abgelesen werden.

Überblick über das Methodische Vorgehen und die Gliederung der Arbeit

Das methodische Vorgehen und die Gliederung der Arbeit können dem Ablaufschema in Abb. 2 entnommen werden. Dargestellt sind sowohl die verschiedenen Kapitel mit ihren Inhalten als auch deren Verknüpfung untereinander. Darüber hinaus wird ersichtlich, wie die einzelnen Kapitel aufeinander aufbauen.

Kap. 3 bildet die inhaltliche Basis der vorliegenden Arbeit, da in ihm die prozessualen Wirkungszusammenhänge auf der Parzellenebene analysiert werden. Aus diesem Prozessgefüge werden Teilziele abgeleitet, die in Kap. 4 hinsichtlich ihrer oberflächenabflussminimierenden Wirkung beurteilt werden. Die Teilziele bilden die Basis für die anschließende systematische Literaturlanalyse in Kap. 5.

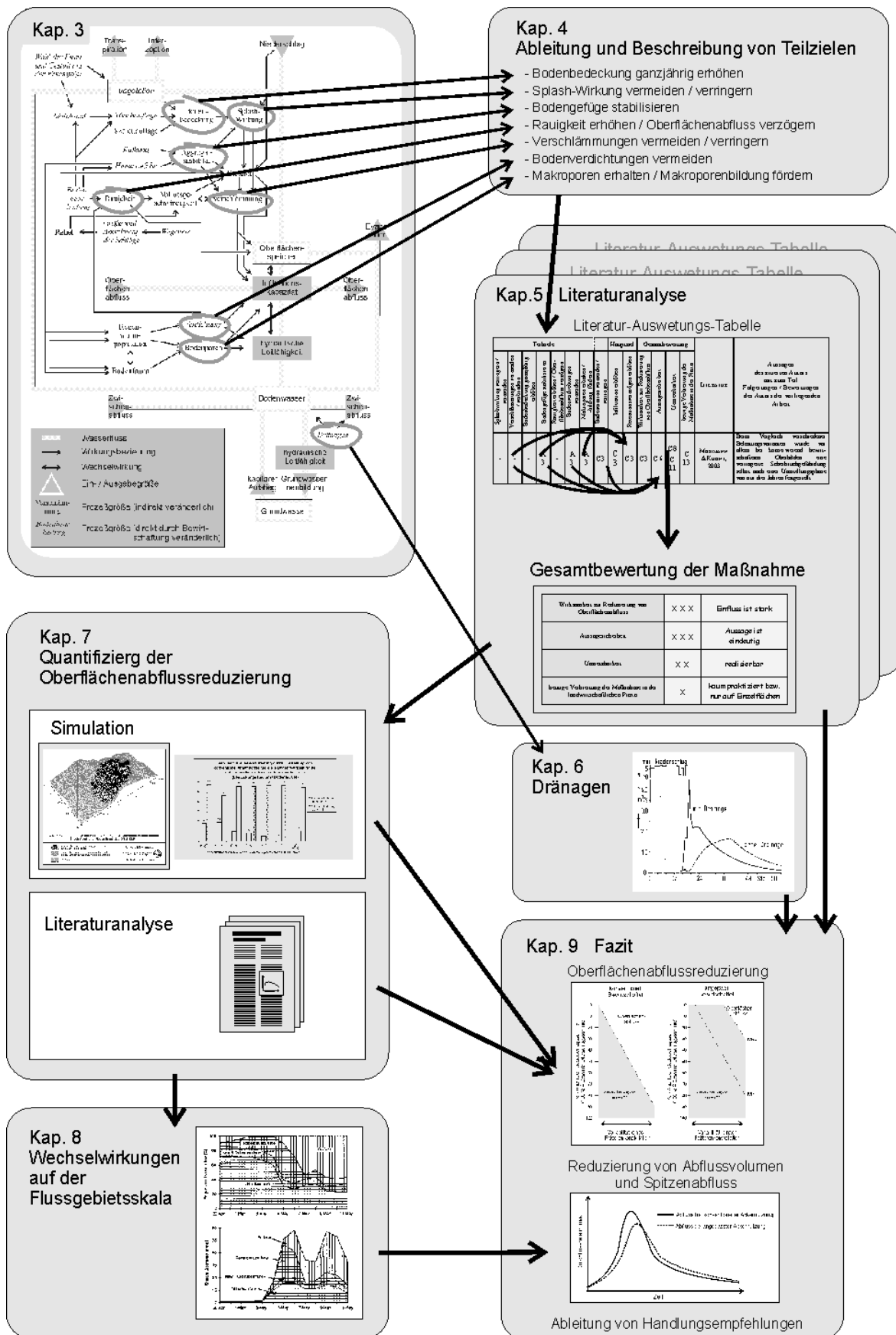


Abb. 2 Ablaufschema zum methodischen Vorgehen und Gliederung der Arbeit

In Kap. 5 werden konkrete Bewirtschaftungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer oberflächenabflussreduzierenden Wirkung untersucht. Die Auswirkungen der jeweiligen Maßnahmen werden innerhalb der Literatur-Auswertungs-Tabellen in Bezug auf die Teilziele und anschließend auf ihre oberflächenabflussreduzierende Wirkung bewertet. Das Kapitel bildet hierbei den Kern der vorliegenden Arbeit. Die Beurteilung der verschiedenen Maßnahmen hinsichtlich ihrer qualitativen Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss werden durch Angaben zur Aussagesicherheit, Umsetzbarkeit und heutigen Verbreitung ergänzt.

Das Kap. 6 befasst sich mit der Problematik von Dränierungen und der Abschätzung von den davon ausgehenden Effekten auf den Hochwasserabfluss. Die in der Literatur vorgefundene sehr kontrovers geführte Diskussion um die hochwasserverstärkende oder hochwasservermindernde Wirkung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit entschärft, da eine differenzierte Bewertung in Abhängigkeit von verschiedenen Standorttypen durchgeführt wird, die sich in ihrer Wirkung auf den Hochwasserabfluss unterscheiden.

Im Anschluss an diesen eher qualitativen Teil schließt sich ein quantitativer Teil an. In Kap. 7 wird die Oberflächenabflussreduzierung auf der Parzellenebene untersucht. Dabei erfolgt die Quantifizierung sowohl mit Hilfe von umfangreichen Simulationsrechnungen mit dem Erosionsmodell Erosion 3D (Kap. 7.1), als auch mit Hilfe einer diesbezüglichen Literaturanalyse (Kap. 7.2). Die Ergebnisse aus den beiden Unterkapiteln werden anschließend in Kap. 9 zusammengeführt. Das methodische Vorgehen für die Simulationsszenarien ist in Kap. 7.1 beschrieben.

Da aufgrund von unterirdischen Abflusskomponenten die ermittelte Oberflächenabflussreduzierung nicht vollständig im Gerinneabfluss wirksam wird, muss der Betrachtungsmaßstab von der Parzellenebene auf die Einzugsgebietsebene erweitert werden (Kap. 8 und Kap. 9). Hierzu wird das Prozess-Wirkungsgefüge auf der Einzugsgebietsebene vor allem im Hinblick auf unterirdische Abflusskomponenten analysiert (Kap. 8). Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Einflüsse des Präferential Flow's und auf das Ausdrücken von Altwasser gelegt. Aufgrund der Beurteilung dieser Effekte erfolgt dann die Gesamtquantifizierung des Beitrags der angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss (Kap. 9). Konsequenzen, die sich hieraus für den Hochwasserschutz ergeben, werden beschrieben.

Methodisches Vorgehen zur Literaturanalyse in Kap. 5

Die systematische Literaturanalyse in Kap. 5 bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Maßnahmenbereiche hinsichtlich ihrer abflussreduzierenden Wirkung, der Aussagesicherheit, die Umsetzbarkeit und die heutige Verbreitung bewertet. Das methodische Vorgehen hierzu wird im Folgenden erläutert.

In den Unterkapiteln (Kap. 5.1, Kap. 5.2 und Kap. 5.3) wird für jeden Maßnahmenbereich am Anfang zunächst das Ergebnis der Gesamtbewertung in Tabellenform (Tab. 6, Tab. 11, Tab. 14, Tab. 15) zusammengefasst vorgestellt. Das Bewertungsergebnis ergibt sich aus der Abwägung der hierfür ausgewerteten Literaturstellen, die im Text zitiert bzw. die in den am Ende der Unterkapitel aufgeführten Literatur-Auswertungs-Tabellen (Tab. 9, Tab. 12, Tab. 16) genannt werden. Ein Muster einer solchen Literatur-Auswertungs-Tabelle zeigt Tab. 1. Die Tabellen enthalten in Spalte XV die Literaturangabe und in Spalte XVI ist die Hauptaussage der zitierten Literatur kurz wiederge-

geben und zum Teil mit Bemerkungen versehen. Aufgrund der Aussagen wurde dann in den Spalten I bis XIV eine Bewertung gemäß der in Tab. 2 aufgeführten Legende vorgenommen.

Um deutlich zu machen auf welcher Grundlage die Bewertungen basiert, wurde ein Buchstaben-code gemäß der Legende (vgl. Tab. 2) verwendet. Anhand des Buchstaben-codes wird ersichtlich, ob die Aussage so vom zitierten Autor gemacht wurde (A), ob der zitierte Autor die Aussage selbst abgeleitet hat (B) oder ob der Autor der vorliegenden Arbeit die Aussage interpretieren konnte (C).

Die Einstufung der Bewertung erfolgte dann je nach Bereich in einer dreistufigen Skala, die in Form eines Zahlencodes den Buchstaben nachgestellt wurde (vgl. Tab. 2). Bewertet wurden in den Spalten I bis VII die in Kap. 4.1 bis 4.7 beschriebenen Teilziele. Darüber hinaus wurde in Spalte VIII (Bodenerosion vermeiden / verringern) die Wirkung der beschriebenen Maßnahme auf den Bodenerosionsschutz bewertet. Aus den Bewertungen der ersten acht Spalten ergab sich dann die Bewertung der Hauptziele (Spalte IX und X), wenn diese nicht direkt von den Aussagen des zitierten Autors abgeleitet werden konnte bzw. die Bewertung durch den zitierten Autor durchgeführt wurde.

Im Anschluss daran wurden die Gesamtbewertungen durchgeführt. Hierbei wurde die Bewertung der Wirksamkeit zur Reduzierung des Oberflächenabflusses (Spalte XI) aus den Bewertungsergebnissen der Hauptziele (Spalten IX und X) oder aus der zitierten Literatur bzw. vom zitierten Autor direkt gemacht. In den letzten drei Spalten, die sich mit der Bewertung der Aussagesicherheit, der Realisierbarkeit und der heutigen Verbreitung der Maßnahme befassen, wurde die Bewertung in der Regel vom Autor der vorliegenden Arbeit vorgenommen. Bei der Bewertung der Realisierbarkeit wurde eine technische und eine allgemeine Realisierbarkeit unterschieden. Unter der technischen Realisierbarkeit wurden die technischen Möglichkeiten, also verfügbare Gerätschaften und das bestehende Know-how sowie die Bewährung unter Praxisbedingungen verstanden. Bei der allgemeinen Realisierbarkeit werden zusätzliche Aspekte wie etwa emotionale, betriebsbedingte Hemmnisse hinzugenommen. Für die Bewertung der heutigen Verbreitung der Maßnahmen in der Praxis mussten in der Regel, außer der in der Tabelle aufgeführten Literatur, noch weitere externe Informationen einfließen, die im Text genannt wurden. Am Ende der jeweiligen Unterkapitel werden die Handlungsempfehlungen für die Umsetzung in der Praxis zusammengefasst (Tab. 10, Tab. 13, Tab. 17 und Tab. 19).

Teilziele								Hauptziel	Gesamtbewertung						LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV		
	Splashwirkung vermeiden / verringern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis		

Tab. 1 Literatur-Auswertungs-Tabelle: Muster mit Tabellenkopf und Spalten-Nummern

Bewertungsbereich	Verwendung in Spalte	Kürzel	Beschreibung
	I bis XIV	-	Bewertung nicht möglich, da hierzu die zitierte Literatur keine Aussagen macht
Auf welcher Grundlage wurde die Bewertung durchgeführt	I bis XIV	A	Fakten liegen vor – der zitierte Autor macht die Aussage
		B	Schlussfolgerungen werden durch den zitierten Autor gemacht
		C	eigene Schlussfolgerungen
Bewertung (der Teil- und Hauptziele sowie der Gesamtbewertung in Bezug auf Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss)	I bis XI	1	es besteht kein Zusammenhang zwischen Maßnahme und Wirkungsbereich
		2	Zusammenhang zwischen Maßnahme und Wirkungsbereich ist vorhanden
		3	Zusammenhang zwischen Maßnahme und Wirkungsbereich ist deutlich / stark vorhanden
Bewertung der Aussagesicherheit	XII	4	Aussagen widersprüchlich / Bewertung nicht möglich
		5	Aussage in der Tendenz vorhanden
		6	Aussage eindeutig
Bewertung der technischen Realisierbarkeit	XIII	7	kaum bis gar nicht realisierbar
		8	realisierbar
		9	gut realisierbar
Bewertung der allgemeinen Realisierbarkeit (u.a. emotionale, betriebsbedingte Aspekte)	XIII	10	kaum bis gar nicht realisierbar
		11	realisierbar
		12	gut realisierbar
heutige Verbreitung der Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis	XIV	13	kaum praktiziert bzw. nur auf Einzelflächen
		14	mäßig verbreitet bzw. in einzelnen Regionen angewendet
		15	weit verbreitet

Tab. 2 Legende der Literatur-Auswertungs-Tabellen (Tab. 9, 12 und 15)

3. Allgemeines zum Einfluss der Ackernutzung auf den Oberflächenabfluss

3.1 Enger Zusammenhang zwischen Ackernutzung, Bodenschutz und Oberflächenabfluss

Durch eine Ackernutzung wird nicht nur die Vegetationsdecke, sondern auch der Boden in seinem strukturellen Aufbau und in seinem Chemismus verändert. Dies beeinflusst unter anderem den Bodenwasserhaushalt des Standortes und führt in der Regel zu einer Steigerung des Oberflächenabflusses. Gegenüber Wald liefern landwirtschaftlich genutzte Flächen einen erhöhten Oberflächenabfluss. Nach groben Richtwerten ist dieser bei Ackerflächen und Wiesen gegenüber Wald um den Faktor 1,2 bis 2,0 je nach Boden- und Reliefverhältnissen erhöht. Handelt es sich um Acker-, Brach- oder um verdichtete Weideflächen, so wird der Oberflächenabfluss sogar um den Faktor 1,4 bis 3,0 gegenüber Wald gesteigert (DYCK & PESCHKE, 1995).

Aus der Erosionsforschung ist bekannt, dass nicht nur die verschiedenen Ackerfrüchte sich unterschiedlich auf die Abflussintensität auswirken, sondern der Oberflächenabfluss auch durch Änderungen in der Bewirtschaftung beeinflusst werden kann. Da Bodenerosion außer durch die Splash-Wirkung im Wesentlichen durch Oberflächenabfluss ausgelöst wird, setzen viele Maßnahmen zur Vermeidung bzw. zur Verringerung der Bodenerosion direkt oder indirekt an der Minimierung des Oberflächenabflusses an. Bodenerosionsschutz ist aber nicht automatisch mit dem Hochwasserschutz gleichzusetzen. Zum einen zielen einige Maßnahmen darauf ab, Bodenpartikel vor der Ablösung durch bereits entstandenen Oberflächenabfluss zu schützen, und zum anderen beinhaltet der Erosionsschutz auch Maßnahmen des Sammelns und schnellen Ableitens von Oberflächenabfluss. Andererseits kann aber davon ausgegangen werden, dass alle Maßnahmen zur Verringerung des Oberflächenabflusses nicht nur dem Hochwasserschutz zugute kommen, sondern auch dem Erosionsschutz dienen.

Aber nicht nur der Erosionsschutz hängt direkt mit dem Hochwasserschutz zusammen. Auch die Verminderung / Vermeidung von Bodenverdichtungen dient sowohl dem Boden- als auch dem Hochwasserschutz. Verdichtete Böden weisen eine verringerte hydraulische Leitfähigkeit auf, die zu einem erhöhten Oberflächenabfluss führt. Maßnahmen, die zu einer Verringerung von Bodenverdichtungen beitragen, bewirken zum einen, dass die Böden größere Mengen an Niederschlagswasser aufnehmen können, und zum anderen, dass die Speichereigenschaften verbessert werden.

Die in der vorliegenden Arbeit behandelten Bewirtschaftungsmaßnahmen, die in ihrer Wirkung auf eine Begrenzung des Oberflächenabflusses ausgewertet wurden, stammen vor allem aus Forschungsarbeiten, die sich thematisch mit dem Schutz vor Bodenverdichtungen und dem Bodenerosionsschutz, wenn auch zum Teil nur indirekt befassen. Bei den in der vorliegenden Arbeit behandelten Maßnahmen handelt es sich um in der Praxis erprobte Bewirtschaftungsmaßnahmen, deren Umsetzung möglich wäre. Da die hier behandelten Maßnahmen den Stand der guten fachlichen Praxis wiedergeben, bestünde sogar nach dem „Gesetz zum Schutz des Bodens“ (BBODSCHG, 1998) eine Verpflichtung zur Anwendung dieser Maßnahmen. Es wird deutlich, dass die

Anforderungen des Hochwasserschutzes und die Belange des Bodenschutzes - hier vor allem des Schutzes vor Verdichtungen und Bodenerosion durch Wasser - sich gegenseitig ergänzen.

3.2 Überblick über die Abflussbildung auf einer Parzelle

Damit die Einflussmöglichkeiten durch die Bewirtschaftung auf das Abflussverhalten herausgearbeitet werden können, muss zunächst das Wirkungsgefüge der Abflusentstehung und -bildung auf den einzelnen Parzellen analysiert werden. Das Prozess-Korrelationssystem in Abb. 3 zeigt alle wesentlichen am Prozess der Abflusentstehung beteiligten Prozessbereiche und Wechselwirkungen. Ins Zentrum des dargestellten Wirkungsgefüges wurde die Infiltrationskapazität gestellt. Sie stellt die Schlüsselgröße für die Entstehung des Oberflächenabflusses dar, da sie das Aufnahmevermögen des Bodens für das anfallende Niederschlagswasser angibt. Wird das Fassungsvermögen des Bodens überschritten, kommt es zum Oberflächenabfluss.

Als Inputgröße für die Abflusentstehung steht der Niederschlag. Er kann in flüssiger oder in fester Form, z. B. als Schnee, auftreten. Während der Regen direkt in das Wirkungsgefüge der Abflusentstehung gelangt, wird Schnee auf der Bodenoberfläche bis zum Abtauen zwischengespeichert. Bei Tauwetterlagen, wenn große Schneemengen in kurzer Zeit abtauen, kann es zu einer starken Oberflächenabflussbildung kommen. Zudem kann der Boden während des Abtauvorgangs noch gefroren sein, so dass die Infiltrationskapazität stark herabgesetzt ist. Für die Abflusentstehung ist die Menge und Intensität eines Niederschlagsereignisses von großer Bedeutung. Denn erst wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität überschreitet, kommt es zu Oberflächenabfluss. Somit führen nicht nur Starkniederschlagsereignisse zum Oberflächenabfluss. Auch langanhaltende, weniger intensive Niederschläge können in erheblichem Umfang Oberflächenabfluss auslösen, da sie dann zu einem hohen Füllungsgrad des Bodenwasserspeichers beitragen und somit die Infiltrationskapazität herabsetzen.

Die Verdunstung durch Interzeption und Evapotranspiration ist für den Wasserhaushalt eines Standortes von sehr großer Bedeutung. Über das Jahr gemittelt beträgt die Gesamtverdunstung gemessen an der Gesamtniederschlagsmenge in Westdeutschland 62 % und in Ostdeutschland 78 % (HÖLTING, 1996). Allein die Interzeptionsverdunstung macht, gemittelt über die Vegetationszeit bei landwirtschaftlichen Kulturen einen Anteil von 10 bis 24 % eines Niederschlags aus (DYCK & PESCHKE, 1995). Der Einfluss der Verdunstung nimmt relativ mit zunehmender Intensität des Niederschlags ab (SIEGERT, 1978; KLAGHOFER, 1985). Er ist daher bei hochwasserwirksamen Starkniederschlägen unbedeutend, kann jedoch bei lang anhaltenden Niederschlagsperioden einen großen Einfluss auf das Abflussgeschehen haben. Die Verdunstung nimmt auf die Bildung von Oberflächenabfluss indirekt Einfluss, indem sie durch Evapotranspiration Bodenwasserspeicher freigibt, welcher beim darauf folgenden Niederschlagsereignis wieder zur Verfügung steht. Eine gezielte Einflussnahme auf die Verdunstung durch eine veränderte Bewirtschaftung ist nur sehr begrenzt möglich. Sie kann aber durch eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung durch Ackerfrüchte, Zwischenfruchtanbau und Gründüngung gesteigert werden.

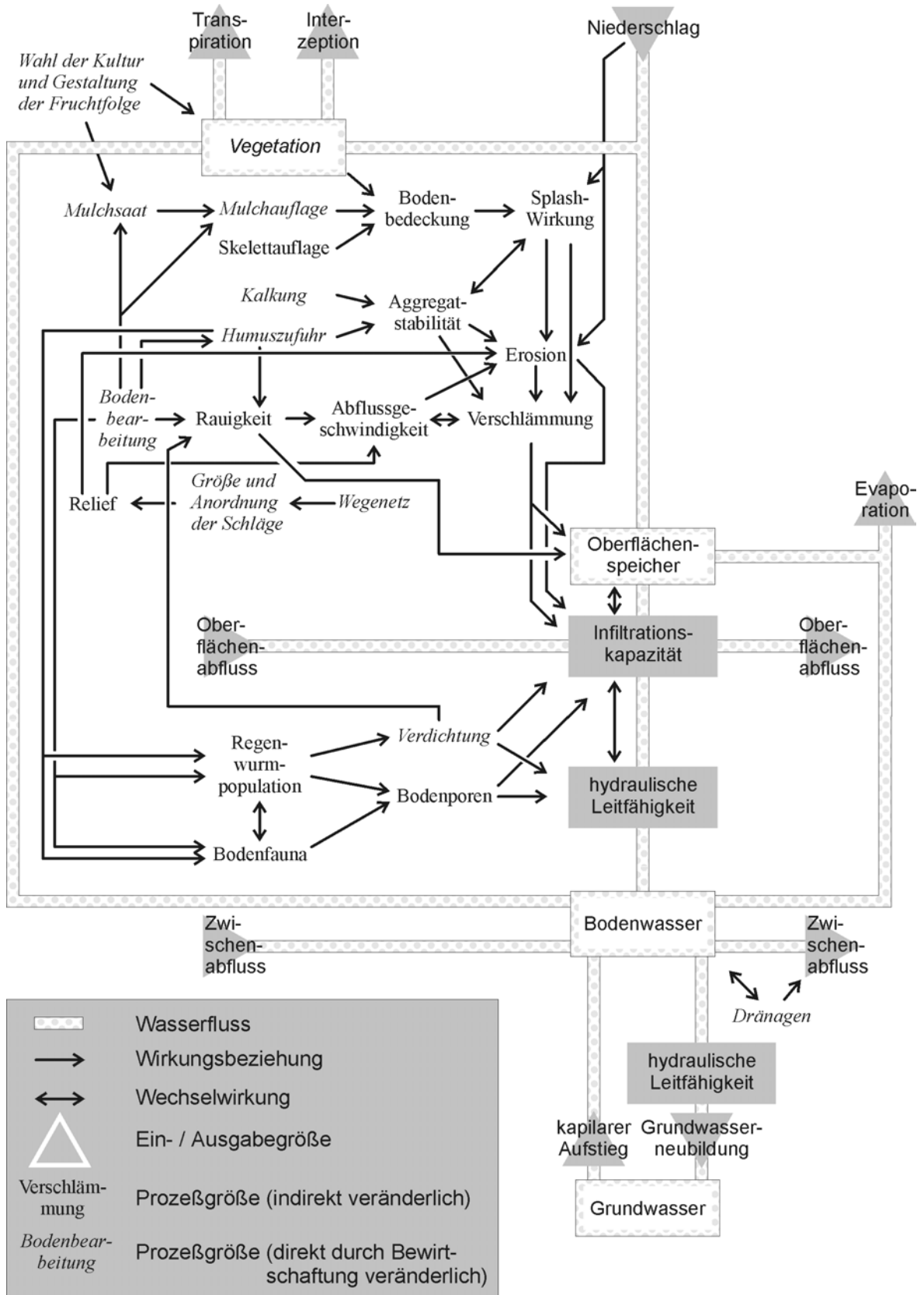


Abb. 3 Prozess-Korrelations-Systemmodell der Abflusstestehung auf einzelnen Parzellen unter Berücksichtigung der Einflussnahme durch die Landwirtschaft

Die Infiltrationskapazität nimmt wie am Anfang dieses Kapitels erwähnt, eine Schlüsselstellung für die Entstehung des Oberflächenabflusses ein. Sie wird wie in Abb. 3 dargestellt, durch ein kompliziertes Wirkungsgefüge einzelner Prozesse gesteuert, welche sich zum Teil durch verschiedene Rückkopplungen gegenseitig beeinflussen. Die Infiltrationskapazität wird im Wesentlichen durch die Infiltrationsrate und die für die Infiltration auf der Bodenoberfläche zur Verfügung stehende Wassermenge gesteuert. Das Wasserangebot wird durch Zufluss- und Niederschlagsintensität sowie durch die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses reguliert. Die Abflussgeschwindigkeit wird vor allem durch die Hangneigung und die Rauigkeit, dem Mikorelief der Bodenoberfläche, bestimmt. Das Mikorelief gibt hierbei das Volumen der Depressionsspeicher vor, in dem Wasser auch nach einem Niederschlagsereignis noch zurückgehalten werden kann.

Die Infiltrationsrate wird zum einen durch Bedingungen auf der Bodenoberfläche und zum anderen durch verschiedene Bodeneigenschaften beeinflusst. Sie kann maximal so groß sein wie die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens und wird zudem durch den Füllungsgrad des Bodenwasserspeichers beeinflusst. Der potentielle Bodenwasserspeicher entspricht dem Gesamtporenvolumen. Die Größe des Gesamtporenvolumens wird in erster Linie durch geologische, pedologische und biologische Bedingungen des Bodens, wie z. B. Substrateigenschaften, Lagerungsart, Gefügebildung und biologische Aktivität bestimmt, kann aber auch infolge der Bodenbewirtschaftung, beispielsweise durch Verdichtungen, stark vermindert sein.

Stark vereinfacht betrachtet kann Wasser nur solange in den Boden infiltrieren, bis der Bodenwasserspeicher mit Wasser vollständig gefüllt ist. In Wirklichkeit ist der Sachverhalt viel komplizierter. Aufgrund von Luftinkusionen steht zum einen nicht der gesamte Porenraum zur Verfügung. Zum anderen steigt mit Zunahme des Füllungsgrades des Bodenwasserspeichers auch der hydraulische Gradient, so dass laterale und vertikale Abflussvorgänge im Boden zunehmen. Der Einfluss der lateralen Abflussvorgänge im Boden (Zwischenabfluss) auf die Abflussbildung wird in Kap. 8 näher diskutiert. Durch Zufluss von Hangwasser (Zwischenabfluss) höher gelegener Bereiche oder auch durch Zufluss von Grundwasser kann der Bodenwasserspeicher zusätzlich gefüllt werden. Im Extremfall kann die Infiltration unterbunden werden und es kommt zu einer Exfiltration von Bodenwasser und damit zum Hortonschen Oberflächenabfluss.

4. Ableitung von Teilzielen zur Steigerung der Infiltration und Minimierung des Oberflächenabflusses durch Bewirtschaftungsänderungen

Ausgehend von dem in Kap. 3.2 dargestellten Prozessgefüge sollen nun die Möglichkeiten der Einflussnahme durch die Bewirtschaftung auf das Wirkungsgefüge der Abflussbildung aufgezeigt werden. Ziel ist es, durch Steigerung der Infiltration die Bildung von Oberflächenabfluss zu vermeiden bzw. zu verringern. Um dies zu erreichen muss die Bewirtschaftung in den Teilbereichen, die direkt oder auch indirekt Einfluss auf die Infiltration nehmen, so geändert werden, dass es zu einer Steigerung der Infiltration kommt. Für die maßgebenden Teilbereiche werden im Folgenden Ziele formuliert, die im Rahmen des Wirkungsgefüges zu einer Steigerung der Infiltration und damit zur Minimierung des Oberflächenabflusses beitragen. Die Teilziele lauten:

- Splashwirkung vermeiden / verringern
- Verschlämmung vermeiden / verringern
- Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen
- Bodengefüge stabilisieren
- Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss (OFA) verzögern
- Makroporen erhalten / Makroporenbildung fördern
- Bodenverdichtungen vermeiden

Da die Vermeidung bzw. Minimierung der Bodenerosion bei den genannten Teilzielen direkt enthalten ist, taucht sie nicht gesondert auf. Sie stellt vielmehr, wie die Steigerung der Infiltration, die Summenwirkung der verschiedenen Teilziele dar. Die beiden ersten Teilziele („Splashwirkung vermeiden / verringern“ und „Verschlämmung vermindern / vermeiden“) nehmen eine Sonderstellung ein, da sie nur indirekt über die anderen Teilziele durch die Bewirtschaftung beeinflusst werden können. Sie werden dennoch hier aufgeführt, da sie für die AbflusSENTstehung von besonderer Bedeutung sind. Im Folgenden sollen anhand der Teilziele die Möglichkeiten der Einflussnahme durch die Bewirtschaftung aufgezeigt werden.

4.1 Splash-Wirkung vermeiden / verringern

Die Splash-Wirkung ist einer der wichtigsten Teilprozesse der Bodenerosion durch Wasser und indirekt des Oberflächenabflusses. Sie beschreibt den Prozess der Partikelablösung sowie in geringem Umfang auch des Partikeltransports. Ausgelöst wird die Splash-Wirkung durch die kinetische Energie der auf den Boden aufprallenden Regentropfen. Die Regentropfen zerstören dabei Bodenaggregate und lösen damit Bodenpartikel aus dem Verband, so dass sie für den Transport durch Oberflächenabfluss zur Verfügung stehen. Darüber hinaus zerspritzen die Regentropfen beim Aufprall auf die Bodenoberfläche und schleudern dabei Bodenpartikel durch die Luft. Diese sogenannte Planschwirkung der Regentropfen führt direkt zu einer Materialumlagerung, die bei geneigten Flächen in der Summenwirkung hangabwärts gerichtet ist. Da für die Ablösung von Partikeln der größte Teil der Tropfenenergie verbraucht wird, steht für den Transport nur noch wenig

Energie zur Verfügung. Bodenabtragsmessungen von MORGAN ET AL. (1986) in England ergaben über einen Zeitraum von 900 Tagen beispielsweise, dass nur 0,1 % der Sedimentmenge durch die Splash-Wirkung verfrachtet wurde.

Die Splash-Wirkung führt zu einem verstärkten Oberflächenabfluss, da sie einerseits Bodenaggregate zerstört und damit die Rauigkeit der Bodenoberfläche verringert. Andererseits trägt sie in erheblichem Maß zu einer Zunahme der Verschlämmung (siehe Kap. 4.2) bei. Die Bewirtschaftung muss demzufolge so ausgerichtet sein, dass sie die Splash-Wirkung verhindert bzw. zumindest verringert. Dies kann nur indirekt erreicht werden, indem der Boden vor dem Aufprall der Regentropfen durch eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung (siehe Kap. 4.3) geschützt wird. Darüber hinaus muss der Boden durch eine Erhöhung der Aggregatstabilität (siehe Kap. 4.4) gefestigt werden, damit er der kinetischen Energie der Regentropfen erhöhten Widerstand leisten kann.

4.2 Verschlämmungen vermeiden / verringern

Verschlämmungen sind oft nur wenige Millimeter bis mehrere Zentimeter mächtige, fast undurchlässige Schluff- und Tonschichten an der Bodenoberfläche. Sie weisen durch natürliche Verdichtung aufgrund der Aufprallenergie der Niederschläge und durch Einlagerungsverdichtung eine erhöhte Lagerungsdichte und damit eine stark verminderte Porosität auf. Verschlämmungen führen damit zu einer starken Reduzierung der Infiltrationsleistung. MCINTRE (1958) stellte eine Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit um den Faktor 200 bis 2.000 im Vergleich zu unverschlämmten Böden fest. Verschlämmte Böden entsprechen damit fast künstlich versiegelten Böden und tragen damit erheblich zur Bildung von Oberflächenabfluss bei. Die Vermeidung von Verschlämmungen ist deshalb eine der wichtigsten Maßnahmen, auf die hingewirkt werden muss.

Verschlämmungen entstehen durch die Splash-Wirkung des Niederschlags und durch den Oberflächenabfluss. Bei ihrer Entstehung können nach ROTH ET AL. (1988) und MUALEM ET AL. (1990 a, c) vier Teilprozesse unterschieden werden:

- Einregelung von Primärpartikeln und stabilen Mikroaggregaten,
- Zerfall von Aggregaten,
- Einwaschung von Feinmaterial in tiefere Schichten und
- Ablagerung von Sedimenten.

Von diesen Teilprozessen spielt die Einregelung der Primärpartikel und der stabilen Mikroaggregate nach ROTH (1992) für sich genommen eine untergeordnete Rolle, da starre Partikel über eine maximale Lagerungsdichte hinaus nicht eingeregelt werden können. Erst die Anlieferung von feinem Material aus dem Aggregatzerfall bzw. aus der Sedimentation und die Einwaschung von Feinmaterial führt in Zusammenhang mit der Einregelung zu einer deutlichen Verstopfung von Poren. Da es nur dann zu einer Verstopfung der Hohlräume kommt, wenn auch genügend feine Partikel vorliegen, ist einer der wichtigsten Teilprozesse bei der Verschlämmung die Splash-Wirkung (Kap. 4.1).

Nach SHAINBERG (1991) muss es während des Aggregatzerfalls zu einer Dispergierung von Ton als Voraussetzung für die Einwaschung von Feinmaterial kommen. Um Tonpartikel in tiefere Bereiche unterhalb der Bodenoberfläche transportieren zu können muss darüber hinaus eine ausreichend hohe Infiltrationsrate vorliegen (MCINTYRE, 1958; MUALEM ET AL., 1990b). An welcher

Stelle der Ton erneut ausflockt und abgelagert wird und damit zur Verstopfung von Poren führt, hängt neben der Porengrößenverteilung auch von der Elektrolytkonzentration des Bodenwassers ab (MUALEM ET AL., 1990a; SHAINBERG, 1991). In diesem Zusammenhang wurde der Einfluss der Kationenbelegung und insbesondere der Na-Sättigung auf die Tondispersierung während des Aggregatzerfalls eingehend untersucht (z. B. AGASSI ET AL., 1981; KAZMAN ET AL., 1983). Er spielt vor allem in semi-ariden Gebieten eine bedeutende Rolle. Da unsere Ackerböden im Allgemeinen pH-Werte aufweisen, die deutlich über dem Flockungsschwellenwert liegen, ist davon auszugehen, dass der Einfluss in unseren Breiten im Allgemeinen nicht sehr groß sein kann. Er kann aber durch Düngung (z. B. mit Ammonium-haltigen Düngemitteln) an Bedeutung gewinnen, da dann der Flockungsschwellenwert an der Bodenoberfläche unterschritten werden kann, wie Untersuchungen von MA ET AL. (1991) zeigten.

Zusammengefasst setzt sich die Verschlämmung im Wesentlichen aus zwei Teilprozessen zusammen. Zum einen aus der Splash-Wirkung, also dem Zerfall von Aggregaten und der Einregelung von Bodenmaterial aufgrund der Regentropfenergie, und zum anderen aus der Ablagerung von Bodenteilchen, die durch Splash-Wirkung und Oberflächenabfluss abgelöst wurden. Die Sedimentation erfolgt in Abhängigkeit der Abflussgeschwindigkeit und der Oberflächenrauigkeit und bewirkt eine Sortierung in verschiedene Korngrößenbereiche. Welchen Anteil der jeweilige Teilprozess an der Verschlämmung und damit an der Verminderung der Infiltrationsleistung ausmacht, ist nicht sicher zu unterscheiden.

Da Verschlämmungen erheblich zur Verminderung der Infiltration beitragen, müssen alle Maßnahmen ergriffen werden, die zu einer Verringerung der Verschlämmung beitragen. Die hierfür notwendigen Maßnahmen müssen sich an den beteiligten Teilprozessen orientieren. Die Bewirtschaftung muss daher vor allem auf eine Minimierung der Bodenerosion hinwirken. Insbesondere müssen alle Maßnahmen zur Begrenzung der Splash-Wirkung (Kap. 4.1) ergriffen werden. Das Bodengefüge muss gefestigt werden, damit der Boden den Regentropfen und dem Oberflächenabfluss ausreichend Widerstand leisten kann.

4.3 Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen

Die Bodenbedeckung durch Skelettauflage, Mulchauflage und vor allem durch Pflanzen schützt den Boden vor der kinetischen Energie der Regentropfen. Zudem erhöht sie die Rauigkeit und bremst damit oberflächlich abfließendes Wasser (siehe Kap. 4.5). Bodenbedeckungen schützen damit den Boden vor der Splash-Wirkung und vor Verschlämmungen. Sie verhindern dadurch eine Verringerung der Infiltrationsrate aufgrund von Bodenerosion. Darüber hinaus bewirkt eine erhöhte Bodenbedeckung durch Pflanzen zum einen eine Steigerung der Transpiration und damit eine gesteigerte Entleerung des Bodenwasserspeichers und zum anderen höhere Interzeptionsverluste.

HUDSON & JACKSON (1959) zeigten anhand eines Moskitonetz-Experiments die Wirkungsweise einer Pflanzendecke auf den Bodenabtrag und damit auf die Splash-Wirkung und den Verschlammungsprozess. Auf der einen, von zwei identischen, unbewachsenen Parzellen wurde ein feines Drahtnetz gespannt. Dies bewirkte, dass die Aufprallenergie der Regentropfen vermindert wurde und das Regenwasser aus einer niedrigen Höhe als feiner Sprühregen auf den Boden gelangte. Der durchschnittliche Bodenverlust konnte dadurch auf 0,7 % vermindert werden. So einfach die Wirkung eines Drahtnetzes ist, so komplex ist das Wirkungsgefüge einer Pflanzendecke.

Die Verminderung der Splash-Wirkung hängt hier von der Höhe und der Dichte des Blätterdaches ab. Schon ab einer Höhe von 7 m können die herabfallenden Wassertropfen über 90 % ihrer Endgeschwindigkeit erreichen. Somit bewirken hoch gelegene Blätterdächer eine geringere Verminderung der Splash-Wirkung als niedrigere. Da in unseren Breiten die landwirtschaftlichen Kulturen in der Regel nur geringe Höhen aufweisen, ist dieser Effekt jedoch nur bei Spezialkulturen wie z. B. bei Hopfen, von besonderem Interesse. Ähnliches gilt für den Einfluss der Pflanzendecke auf die Regentropfengröße. Die von den Pflanzen aufgenommenen Regentropfen vereinigen sich auf den Blättern zu größeren Tropfen und weisen beim Herabfallen eine erhöhte Erosivität auf. MORGEN (1999) fasst die Ergebnisse aus verschiedenen Forschungsarbeiten vor allem für Waldkronendächer so zusammen, dass zwar die Regenmenge durch Interzeption verringert war, sich jedoch die kinetische Energie in ihrer Summenwirkung nicht signifikant verändert hatte. Einen größeren Effekt als das Kronendach von Bäumen hatte die bodennahe Streuschicht und somit, bezogen auf landwirtschaftlich genutzte Flächen, die in der Regel wenig hohen Ackerkulturen auf die Verminderung der kinetischen Energie der Regentropfen.

Ein weiterer Effekt der Vegetationsdecke auf den Niederschlag ist die Veränderung der räumlichen Verteilung des Niederschlagswassers auf der Bodenoberfläche. So kommt es zu einer Konzentration an den Stellen, an denen das Wasser von den Blättern abtropft bzw. an denen es an Stamm oder Stängel der Pflanzen herabläuft. ARMSTRONG & MITCHELL (1987) stellten bei Messungen auf einer mit reifen Sojabohnen bestandenen Fläche fest, dass die halbe Fläche eine höhere Niederschlagsintensität aufwies als der durchschnittlich gemessene Wert von 25 mm/h. Auf 10 % der Fläche konnte sogar eine Niederschlagsintensität von 385 mm/h ermittelt werden. DE PLOEY (1982) stellte fest, dass die effektive Intensität des Stängelabflusses unter einer Bedeckung mit Büschelgras um 150-200 % größer war als die Niederschlagsintensität. Diese durch die Vegetation bedingte Konzentration der Niederschläge auf bestimmte Stellen hat zur Folge, dass an diesen Stellen die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität erheblich übersteigen kann und es zum Oberflächenabfluss kommen kann. Andererseits bewirkt die Niederschlagskonzentration die Bildung eines Wasserfilms auf der Bodenoberfläche, der wiederum den Boden vor der Splash-Wirkung schützen kann.

Zusammenfassend ist die Wirkung der Vegetation auf das Erosionsgeschehen und damit auf die Verminderung der Effekte durch Splash-Wirkung und Verschlämmung nicht immer einheitlich. Unter bestimmten Bedingungen kann das Erosionsgeschehen sogar verstärkt werden (MORGEN, 1999). Es existieren nur wenige Veröffentlichungen, bei denen Beziehungen zwischen Bodenverlust und Veränderungen in der Dichte der Pflanzendecke untersucht wurden. ELWELL (1981) beschrieb eine exponentielle Abnahme des Bodenverlustes mit Zunahme der abgefangenen Regenenergie und damit auch mit Zunahme der Pflanzenbedeckung. Diese Beziehung wurde auch von WISCHMEIER (1975) beschrieben, wobei er darauf hinwies, dass dies für Pflanzenbestände zutrifft, die direkten Bodenoberflächenkontakt aufwiesen. Im Allgemeinen kann jedoch festgehalten werden, dass eine erhöhte Bodenbedeckung vor allem durch bodennahe Vegetation zur Verminderung der kinetischen Energie der Regentropfen und damit zu einer Verminderung von Bodenerosion und Oberflächenabfluss beiträgt. So werden, nach MOSIMANN ET AL. (1991) Bodenabträge von über 2-3 t/ha fast nur bei Bodenbedeckungsgraden von weniger als 20 % erreicht. Ab Bedeckungsgraden von etwa 40-50 % im Getreide und in Kunstwiesen treten kaum noch nennenswerte Bodenabträge

auf. Die Schutzwirkung der Pflanzenbestände variiert also je nach Bodenbedeckungsgrad, der wiederum von der jeweiligen Kultur sowie von deren Entwicklungsstadium abhängt.

Die hier getroffenen Aussagen zur Wirkungsweise der Pflanzendecke auf das Wirkungsgefüge Bodenerosion (einschließlich Verschlämmungen und Splash-Wirkung) und Infiltration gelten grundsätzlich auch für Bodenbedeckungen durch Skelettauflage und vor allem durch Mulch-
auflage. Auch sie schützen den Boden vor der Aufprallenergie der Regentropfen. Da sie direkt auf der Bodenoberfläche aufliegen, entfallen bei ihnen die Probleme durch das Wiederabtropfen aus größerer Höhe. Während die Skelettauflage vom Substrat des anstehenden Bodens abhängt und wenig beeinflusst werden kann, kann eine schützende Mulchschicht bei der Bewirtschaftung gezielt eingesetzt werden. Vor allem das Belassen abgestorbener Pflanzenreste der Vorfrucht auf dem Feld kann zu einer erhöhten Bodenbedeckung zu einer Zeit beitragen, in der die Folgekultur noch klein ist und nur wenig zur Bodenbedeckung beitragen kann.

Die Wirkung der Bodenbedeckung durch Mulch auf den Bodenabtrag kann als sehr wirksam angesehen werden, da schon bei einem Bodenbedeckungsgrad von etwa 30 % der Bodenabtrag um etwa die Hälfte reduziert werden kann (DIEZ, 1993). Nach MOLLENHAUER & ORTMEIER (1994) zeigte sich bei Bodenabtragsmessungen sogar, dass der Bodenbedeckungsgrad unter den angetroffenen Bedingungen den größten Einfluss auf den Bodenabtrag durch Wasser hatte. Bei Bedeckungsgraden kleiner als 30 % stieg der relative Abtrag mit abnehmender Bodenbedeckung überproportional an und bei Bedeckungsgraden von mehr als 30 % ging der Abtrag sogar gegen Null.

4.4 Bodengefüge stabilisieren

Weist der Boden keine Bodenbedeckung und damit keinen Schutz vor der Aufprallenergie der Regentropfen auf, so treffen diese ungebremst auf den Boden. Hier kommt es durch die Aufprallenergie zur Zerstörung der Bodenaggregate (Splash-Wirkung). Die hierdurch freigesetzten Partikel führen dann in den Hohlräumen der unzerstörten Aggregate zu einer Verstopfung der Poren und damit zu einer starken Verminderung der Infiltrationsleistung (Verschlämmung) (MOLDENHAUER & KEMPER, 1969; MAZURAK & MOSHER, 1970; FARRES, 1978; ROTH, 1992). Große Bedeutung wird auch der Luftsprennung trockener Aggregate beim Aggregatzerfall beigemessen (HENK, 1989; LE BISSONNAIS ET AL., 1989; POTRATZ ET AL., 1991).

Nach FARRES (1978, 1980) sowie BRADFORD & HUANG (1991) hängt die Geschwindigkeit, mit der die Aggregate durch Splash-Wirkung und Luftsprennung zerstört werden, von der Aggregatstabilität und von der Aggregatgröße ab. Diese Abhängigkeit konnte jedoch in der Vergangenheit nicht immer experimentell nachgewiesen werden, was nach TRUMAN ET AL. (1990) und BRADFORD & HUANG (1991) auf die Methode der Aggregatstabilitätsbestimmung durch Nasssieben nach YODER (1936) bzw. in modifizierter Form nach HARTGE (1971) zurückzuführen ist. YOUNG (1984) und FARRES & SMITH (1988) schlugen daher schon früh vor, die Aggregatstabilität statt mit der Nasssieb-Methode als Funktion des Tropfenaufpralls zu bestimmen.

Die Aggregatstabilität setzt sich nach FARRES (1980) aus verschiedenen Faktoren zusammen, die er in zwei Gruppen unterteilt. Zur ersten Gruppe gehören die Korn- und Porengröße, der Gehalt und die Art des organischen Materials, des Tons sowie der Sesquioxide. Er bezeichnet diese Faktoren als statisch variable Faktoren, im Gegensatz zur zweiten Gruppe, die er als dynamisch variable

Faktoren bezeichnet. Zu ihnen gehören der Feuchtegehalt sowie die Kationenbelegung. Bei der Bodenfeuchte verhält es sich nach PANABOKKE & QUIRK (1957) sowie nach HENK (1989) wie folgt. Mit Abnahme der Bodenfeuchte nimmt die Aggregatstabilität zunächst zu. Ihr Maximum liegt etwa bei Wassergehalten bei pF 2. Bei Wassergehalten über pF 2 nimmt die Aggregatstabilität wieder ab. Die Aggregatstabilität wird durch höhere Gehalte an Ton, an Sesquioxiden und an organischer Substanz erhöht (FARRES, 1980; FRIELINGHAUS & FOLGENTREU, 1985; HENK, 1988; ROTH ET AL., 1991).

Wie stark die Wirkung verschiedener Gehalte an organischer Substanz auf die Erosion und damit auf die Verschlammung ist, ist noch nicht abschließend geklärt. VORNEY ET AL. (1981) beschreiben eine lineare Abnahme der Bodenerodibilität mit steigenden Gehalten an organischer Substanz im Bereich von 0 % bis 10 %, wohingegen EKWUE (1990) im Bereich von 0 % bis 12 % eine exponentielle Abnahme annimmt. Eine Extrapolation der beiden Beziehungen auf höhere Gehalte organischer Substanz kann nicht durchgeführt werden, da diese Gehalte in der Regel durch Torfe zu Stande kommen, die wiederum aufgrund ihrer geringen Festigkeit eine hohe Erodibilität aufweisen. Die Bedeutung des organischen Materials auf die Erodibilität hängt nach MORGAN (1999) von seiner Entstehung ab. So trägt organisches Material z. B. aus Stallmist zur Aggregatstabilität bei, wohingegen Torf und unverrottetes Stroh als Mulchschicht den Boden vor der Splash-Wirkung schützen, jedoch wenig zur Aggregatstabilität beitragen (EKWUE ET AL., 1993).

Die schwere Nachweisbarkeit der Wirksamkeit der organischen Substanz auf die verminderte Erodibilität eines Bodens ist auch auf die komplexen Wirkungsmechanismen zwischen Boden, Bodenorganismen und organischer Substanz zurückzuführen. So bewirkt die Zufuhr von organischer Substanz eine gesteigerte Aktivität der Bodenlebewesen, da diese aufgrund des verbesserten Nahrungsangebotes bessere Lebensbedingungen vorfinden (KAEMMERER, 2000). Vor allem Regenwürmer führen hierbei nach FREDE (1991) zu einer aktiven Stabilisierung (Lebendverbauung) und Strukturierung des Bodens bei. Darüber hinaus tragen die nach dem Abbau verbleibenden Reste der organischen Substanz als Kittsubstanz in Form des Humus zur Stabilisierung des Bodengefüges bei. Bodenaggregate, die aus Regenwurmhäufchen stammen, weisen beispielsweise eine erhöhte Stabilität gegenüber der Splash-Wirkung im Verhältnis zu dem umliegenden Oberbodenmaterial auf (GLASSTETTER & PRASUHN, 1992).

Auch wenn das exakte Ausmaß der Effektivität der organischen Substanz nicht bekannt ist, ist deren hohe Wirksamkeit zur Förderung einer stabilen Bodenstruktur unbestritten. Eine Bewirtschaftung, die auf eine kontinuierliche Humuszufuhr durch z. B. Mist, Gülle, Ernterückstände und Gründüngung bedacht ist, fördert die Stabilität des Bodens und schützt damit seine Infiltrationskapazität. Die Bewirtschaftung kann außer durch Zufuhr organischer Substanz auch durch Kalkung (BOHNE, 1991) auf die Stabilisierung der Bodenstruktur Einfluss nehmen. Durch die Kalkzufuhr wird unter anderem der Versauerung des Bodens entgegengewirkt, die eine Verschlechterung der Aggregatstabilität aufgrund von Dispergierungen feiner Bodenbestandteile mit sich bringen würde (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992).

Eine wichtige Rolle bei der Verschlammung durch Aggregatzerfall spielt neben der Aggregatstabilität auch die Aggregatgröße. CZERATZKI (1966) zeigte, dass große Aggregate (Durchmesser 10-20 mm) nach 13,6 mm Niederschlag verschlammten waren, wohingegen kleinere Aggregate (Durchmesser 2-5 mm) schon nach 5,7 mm Niederschlag verschlammten. Auch FRIELINGHAUS (1998)

zeigte, dass die Aggregate von Standorten der Jungmoränengebiete Nordostdeutschlands in Abhängigkeit von der Aggregatgröße verschieden schnell zerfallen. Als besonders labil erwiesen sich dabei kleine Aggregate mit einem Durchmesser von unter 10 mm. Auch die Arbeiten von FARRES (1987), HENK (1989) und FREEBAIN ET AL. (1991) zeigten für weitere Gebiete, dass mit zunehmender Größe der Aggregate das Ausmaß bzw. die Geschwindigkeit des Aggregatzerfalls abnimmt. Bei der Bodenbearbeitung muss daher darauf geachtet werden, möglichst nicht zu feine Bodenaggregate entstehen zu lassen.

4.5 Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern

Je stärker die Rauigkeit der Bodenoberfläche ist, desto mehr Kleinstspeicher weist die Bodenoberfläche auf, in denen Niederschlagswasser auch noch längere Zeit nach einem Niederschlagsereignis zurückgehalten werden kann, welches dann durch Versickerung oder Verdunstung dem Abflussgeschehen entzogen wird. Darüber hinaus wird durch eine erhöhte Rauigkeit das oberflächlich abfließende Wasser gebremst. Hierdurch wird der Zeitraum, in dem das Wasser in den Boden infiltrieren kann, verlängert. Zudem werden die Scher- und Transportkräfte herabgesetzt und damit die Bodenerosion verringert.

Nach COGO ET AL. (1984) steht der Bodenverlust (SL) durch Bodenerosion mit der Rauigkeit (R) in folgendem Zusammenhang:

$$SL \approx e^{-0,5 R} \quad (4.5/1)$$

Der Bodenverlust durch Wassererosion nimmt hiernach mit zunehmender Rauigkeit ab. Aus der von COGO ET AL. (1984) aufgestellten Formel geht hervor, dass geringe Zunahmen der Rauigkeit bei einer nahezu glatten Oberfläche sich wesentlich stärker auf die Verringerung der Bodenerosion auswirken, als vergleichbare Zunahmen ausgehend von einer starken Oberflächenrauigkeit. Durch Verringerung der Bodenerosion wird auch die Verschlämmung der Bodenoberfläche herabgesetzt, die wie in Kap. 4.2 geschildert erheblich die Infiltrationskapazität vermindert. Durch die Verringerung der Bodenerosion steht die Erhöhung der Rauigkeit in Wechselwirkung zur Verschlämmung der Bodenoberfläche und damit zur Infiltration.

Die Rauigkeit wird in der Regel als Wert von Mannings n angegeben. Tab. 3 zeigt typische Werte für Mannings n für verschiedene Boden- und Pflanzenzustände. Die Werte stellen die Summe der Rauigkeiten dar, die von den Bodenpartikeln, der Mulchauflage, der Oberflächentopographie (Mikrorelief) und der Vegetation ausgehen. Bei der Vegetation hängt der Grad der Rauigkeit und damit der Grad der Abflussbremsung von den Pflanzenarten und vom Abstand zwischen den Pflanzen ab. Die größte Bremswirkung kann bei dichten, gleichförmigen Vegetationsdecken beobachtet werden. Bei Vegetationsformen, die in Gruppen oder Horsten angeordnet sind, kann es hingegen in den Zwischenräumen sogar zu einer Abflusskonzentration kommen, die örtlich sehr hohe Geschwindigkeiten aufweist (MORGAN, 1999).

Die Rauigkeit der Bodenoberfläche wird durch die Bewirtschaftung stark verändert. Eine Erhöhung der Rauigkeit kann erreicht werden, indem, wie in Kap. 4.3 gefordert wird, auf eine möglichst ganzjährig erhöhte Bodenbedeckung durch Vegetation und Mulchauflage hingearbeitet wird. Die Festlegung der Landnutzung (z. B. Ackerland, Wiese) sowie die Wahl der Kulturpflanzen d.h. die Gestaltung der Fruchtfolge mit Zwischenfruchtanbau, spielen hierbei eine große Rolle. Darüber

hinaus kann die Oberflächenrauigkeit direkt durch die Bodenbearbeitung verändert werden. Entscheidend ist hierbei nicht nur das einmalige Herstellen einer sehr rauen Bodenoberfläche. Viel wichtiger ist es, eine möglichst dauerhafte stabile Rauigkeit der Bodenoberfläche zu erzielen. Aus diesem Grund müssen die Maßnahmen zur Erhöhung der Rauigkeit immer in Verbindung mit den in Kap. 4.4 beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Aggregatstabilität einhergehen.

Landnutzung oder Bedeckung	Mannings n	Landnutzung oder Bedeckung	Mannings n
Beton oder Asphalt	0,010-0,013	tiefgegrubberter Boden mit Pflanzenrückständen	
Kiesoberfläche	0,012-0,030		0,6 t/ha
unbedeckter Boden			
Rauigkeitshöhe < 25 mm	0,010-0,030	0,6-2,5 t/ha	0,070-0,340
Rauigkeitshöhe 25-50 mm	0,014-0,033	2,5-7,5 t/ha	0,190-0,470
Rauigkeitshöhe 50-100 mm	0,023-0,038	mit Scheibenegge bearb. Boden mit Pflanzenrückständen	
Rauigkeitshöhe > 100 mm	0,045-0,049		0,6 t/ha
Gräser / Weiden			
Bermudagrass – spärlich bis gute Bedeckung	0,015-0,200	Direktsaat mit Pflanzenrückständen	
Bermudagrass – dichte Bedeckung	0,300-0,480		0,6 t/ha
andere dichte, sodenbildende Gräser	0,390-0,630		
dichte Büschelgräser	0,150	0,6-2,5 t/ha	0,100-0,130
natürliche Bergweide	0,100-0,320		
gemähte Bergweide	0,020-0,240	2,5-7,5 t/ha	0,160-0,470
Weizenstrohmulch		unbedeckter Boden	
2,5 t/ha	0,050-0,060	gepflügt	0,020-0,100
5,0 t/ha	0,075-0,150	bearb. mit Kultivator	0,050-0,130
7,5 t/ha	0,100-0,200	gehäckseltes Maisstroh	
10,0 t/ha	0,130-0,250		2,5 t/ha
		5,0 t/ha	0,020-0,075
		10 t/ha	0,023-0,130

Tab. 3 Oberflächenrauigkeit verschiedener Landnutzungen bzw. Bodenbedeckungen, angegeben als Rauigkeitsbeiwert n nach Manning (verändert nach MORGAN, 1999; aus: PETRYK & BOSMAJIAN, 1975; TEMPLE, 1982; ENGMAN, 1986)

4.6 Makroporen erhalten / Makroporenbildung fördern

Das Vorhandensein sowie die Anzahl und Größe von Makroporen beeinflusst maßgeblich die Infiltration und Durchlässigkeit eines Bodens. Im Gegensatz zu den aus der pF-Kurve definitionsgemäß ermittelten Fein-, Mittel- und Grobporen, in denen die Wasserbewegung mehr oder weniger stark von der Saugspannung des Bodens beeinflusst ist, ergeben sich für Poren mit einem Äquiva-

lentdurchmesser von mehr als 2 mm kaum noch messbare Saugspannungen. Das bedeutet, dass die Wasserbewegung in diesen Poren praktisch alleine von der Gravitation bestimmt wird und die wasserhaltenden Kräfte des Bodens unbedeutend sind (Saugspannung < 1 cm WS bzw. $pF \leq 0$). Poren, in denen diese Effekte auftreten, werden von BEVEN & GERMAN (1982), ZUIDEMA (1985) und WORRESCHK (1985) als Makroporen bezeichnet. Eine Definition der Makroporen aufgrund ihres Äquivalentdurchmessers fällt hingegen je nach Autor unterschiedlich aus. Eine Aufstellung der Definition von Makroporen nach verschiedenen Autoren findet sich in BEVEN UND GERMAN (1982). Als ungefähre Richtwert kann der von ZUIDEMA (1985) und WORRESCHK (1985) angegebene Wert genommen werden, so dass man von Makroporen ab einem Äquivalentdurchmesser von ca. 2 mm sprechen kann.

Makroporen sind in der Regel lange, vor allem vertikal orientierte, teilweise bis in das Grundwasser reichende Hohlräume. Hinsichtlich ihrer Entstehung können verschiedene Typen von Makroporen unterschieden werden. Nach BEVEN UND GERMAN (1982) werden sie verursacht durch:

- Vegetation - Pflanzenwurzeln (lebend oder zerfallen; in der Regel röhrenförmig; Länge und Verteilung von jeweiliger Pflanzenart abhängig)
- Bodenfauna - Wurmgänge (zylinderförmig, lang, kontinuierlich, vor allem vertikal; durch Humusverkittung der Wände Schaffung besonders stabiler Makroporen)
 - Maus- und Maulwurfsgänge (große Dimensionen, meist auf den Oberboden beschränkt)
- Zug/Scherung - Zugrisse infolge von Schrumpfung (Austrocknung, Verdichtung)
 - Scherrisse infolge ungleichmäßiger Wassergehaltsänderung oder mechanischer Belastung

Zug- und Scherrisse treten bei der Aggregatbildung auf. Sie sind daher in allen feinkörnigen und vor allem in tonigen Böden anzutreffen.

Die durchschnittlichen Durchmesser der Makroporen liegen nach BEVEN (1982) zwischen 1 und 50 mm, wobei durchschnittliche Häufigkeiten zwischen 27 und 700 Makroporen pro m^2 vorgefunden wurden (vgl. Tab. 4). Da die Wasserbewegung in den Makroporen vor allem unter dem Einfluss der Gravitation stattfindet, erfolgt in ihnen eine schnelle Infiltration und Perkolation, wobei Fließgeschwindigkeiten zwischen 1 und 25 cm/s möglich sind (BOUMA, 1982). Aufgrund der hohen Sickergeschwindigkeiten in den Makroporen führen sie trotz geringer Oberflächenanteile zu einer erheblichen Steigerung der Infiltrationsleistung (JOSCHKO ET AL., 1989). Darüber hinaus vergrößern Makroporen die Oberfläche der Bodenmatrix und fördern damit zusätzlich die Infiltration des Wassers in das restliche Porensystem.

Da das Vorhandensein von Makroporen die Infiltrationsleistung sowie die Durchlässigkeit stark erhöht, ist bei der Bewirtschaftung darauf zu achten, einerseits die Makroporenbildung zu fördern und andererseits die vorhandenen Makroporen zu erhalten. Vor allem müssen die an die Bodenoberfläche reichenden Makroporen offen gehalten werden, damit gerade bei stärkeren Niederschlägen das anfallende Niederschlagswasser schnell in den Untergrund gelangen kann. Im Zusammenhang mit der Erhaltung der Makroporen stellen insbesondere die Steigerung der Aggregatstabilität

Autor	Durchmesser [mm]	Anzahl Makroporen [pro m ²]	Tiefe der Makroporen [cm]
Omoti / Wild (1979)	2 – 10	100	14 – 70
Ehlers (1976)	2 – 11	27 – 363	0 – 80
Green / Askew (1965)	2 – 50	–	100
Williams / Allman (1969)	5 – 10	50 – 100	0 – 800
Vetter / Scharafat (1964)	1	78 – 700	30 – 150

Tab. 4 Angaben verschiedener Autoren zum Durchmesser, Anzahl pro m² und zur Tiefe von Makroporen (BEVEN, 1982)

(Kap. 4.4), das Verhindern von Verschlammungen (Kap. 4.2) sowie das Vermeiden von Bodenverdichtungen (Kap. 4.7) wichtige Maßnahmen dar. Auch ist das Vorhandensein einer gewissen Oberflächenrauigkeit (Kap. 4.5) von Vorteil, da sich dann das Wasser im Mikrorelief aufstaut und als freies Wasser in die Makroporen infiltrieren kann.

Durch Auflockerung des Bodens, beispielsweise durch das Pflügen, können Makroporen entstehen, die jedoch durch Setzungsvorgänge im Laufe der Vegetationszeit wieder vergehen. Sie weisen zudem nur eine sehr geringe Eindringtiefe auf. Auch ist die Einflussnahme durch die Bewirtschaftung mit besonders makroporenbildenden Pflanzenarten nicht möglich, da der Betriebsleiter aufgrund seiner Fruchtfolgegestaltung die Wahl der Pflanzenarten vorgibt und andere Pflanzen hierzu nur in Konkurrenz treten würden. Auf die Bildung von Zug- und Scherrisse kann ebenfalls kein Einfluss genommen werden, da diese Prozesse weitgehend von nicht beeinflussbaren pedogenen und klimatischen Bedingungen abhängen.

Auf die Bildung von Makroporen kann daher im Wesentlichen nur indirekt über die Verbesserung der Lebensbedingungen der makroporenbildenden Bodenfauna hingearbeitet werden. Da nach BEVEN & GERMAN (1982) sowie nach ZUIDEMA (1985) bei der biogenen Durchporung Regenwürmer die bedeutendste Rolle spielen, müssen Maßnahmen zur Verbesserung ihrer Lebensbedingungen vorrangig berücksichtigt werden. Die Landbewirtschaftung beeinflusst durch folgende Maßnahmen die Regenwürmer:

- Bodenbearbeitung

Die Bodenbearbeitung wird allgemein von verschiedenen Autoren (z. B. EHRMANN, 1996) als schädlich für die Regenwurmpopulation angesehen. Der Effekt lässt sich schon direkt nach der Bodenbearbeitung anhand einer stark verminderten Individuenzahl feststellen. Auch zeigen verschiedene Untersuchungen (EHLERS, 1975; EDWARDS, 1980), dass Direktsaatflächen im Vergleich zu gepflügten wesentlich mehr Regenwürmer aufweisen.

- Pestizideinsatz

EDWARDS (1980) UND LEE (1985) erstellten Listen über die Toxizität verschiedener Pestizide gegenüber Regenwürmern. Sie stuften die Pestizide in verschiedene Klassen ein, die von harmlos bis hochtoxisch reichen. Darüber hinaus zeigte NIKLAS (1980) eine indirekte Wirkung des Pestizideinsatzes durch vermehrten Parasitenbefall der Regenwürmer.

- organischer Dünger

Das Aufbringen von organischem Dünger wirkt sich positiv aus (GLASSTETTER, 1991). Jedoch können die Regenwürmer nach CURRY (1976) durch zu hohe Güllemengen auch geschädigt werden.

- Mineraldünger

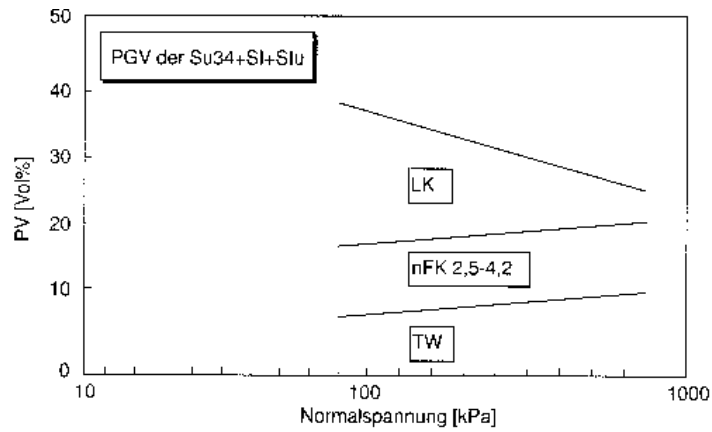
Da durch die mineralische Düngung die Phytomasse erhöht wird, verbessert sich hierdurch auch das Nahrungsangebot der Regenwürmer. Manche Mineraldünger (z. B. Ammoniumsulfat) senken allerdings den pH-Wert und wirken damit negativ auf die Regenwurmpopulation (MA ET AL., 1990).

4.7 Bodenverdichtungen vermeiden

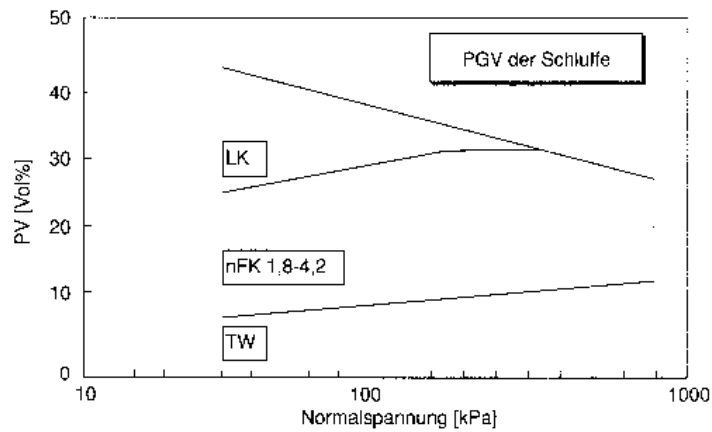
Unter Bodenverdichtungen werden im weiteren solche Bodenverdichtungen verstanden, bei denen die Bodenteilchen durch auf den Boden einwirkende Druckkräfte dichter gepackt werden. Verursacht werden diese mechanischen Belastungen durch den Bewirtschaftungsverkehr, z. B. bei der Bodenbearbeitung oder der Ernte. Nicht jede mechanische Belastung eines Bodens wirkt sich allerdings schädigend aus. Erst wenn die aktuelle Bodenstabilität durch das Gefährdungspotential der Belastung überschritten wird, kommt es zu einer plastischen Verformung und damit zu einer Schädigung des Bodens. Hierbei wird das Porenvolumen und damit der potentielle Bodenwasserspeicher verringert (vgl. Abb. 4). Überproportional betroffen sind hiervon wie Abb. 4 zeigt, die für die Infiltration besonders wichtigen Grob- und Makroporen. Eine starke Verringerung der Infiltrationsleistung ist die Folge (SOANE, 1980; FULLEN, 1985; DEXTER, 1988; JURY ET AL., 1991; SOANE & OUWERKERK, 1994; KREMER ET AL., 2002).

Der Zusammenhang zwischen Infiltrationsleistung und Anzahl von Grob- und Makroporen wird durch Untersuchungen von ANKENY ET AL. (1991), HODARA & DOMZAL (1991), LIEPIEC ET AL. (1991) und YUXIA ET AL. (2001) verdeutlicht. ANKENY ET AL. (1991) führten beispielsweise Infiltrationsmessungen mit Hilfe eines Tensions-Infiltrometers auf einem stark schluffigen Lehmboden durch. Hierbei wurde die Infiltrationsleistung im Bereich der Fahrspur mit der zwischen den Fahrspuren und mit der innerhalb der Maisreihen verglichen. Die Untersuchungen zeigten, dass in allen drei Varianten die Infiltration in den Grob- und Makroporen dominierte, da etwa 90 % des applizierten Wassers in Poren mit einem Durchmesser von größer als 1 mm versickerte (vgl. Tab. 5). Der Einfluss der Bodenverdichtung zeigte sich in der starken Abnahme der Anzahl an Grob- und Makroporen bzw. an der Verringerung des prozentualen Flächenanteils dieser Poren. Aus Tab. 5 wird ersichtlich, dass sich die Anzahl an Poren mit einem Durchmesser von größer als 1 mm in den Fahrspuren um mehr als die Hälfte gegenüber der zwischen den Fahrspuren verringert hat. Verglichen mit der Anzahl in den Maisreihen ist die Anzahl der Poren mit einem Durchmesser größer als 1 mm in den Fahrspuren sogar auf $\frac{1}{4}$ reduziert.

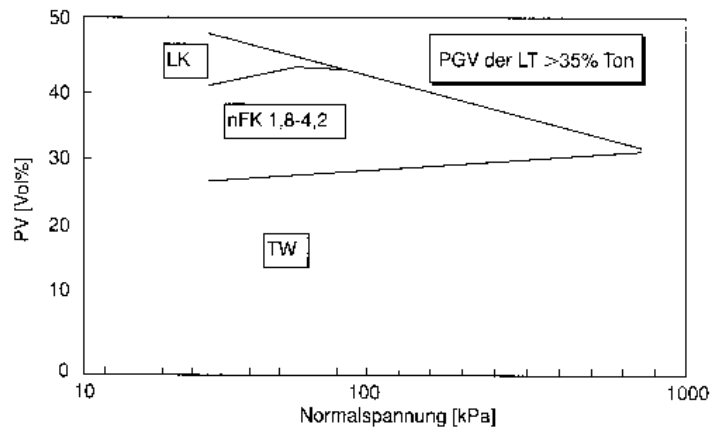
Da Bodenverdichtungen zu einer Verminderung des Porenvolumens und vor allem zu einer erheblichen Reduzierung des für die Versickerung entscheidenden Grob- und Makroporenanteils führen, verringern sie in erheblichem Maße die Infiltration (HARRACH & VORDERBRÜGGE, 1991; HODARA & DOMZAL, 1991; LIEPIEC ET AL., 1991; MEDVEDEV & CYBULKO, 1995). Bodenverdichtungen tragen damit direkt zu einem gesteigerten Oberflächenabfluss bei und wirken deshalb



Änderung der Porengrößenverteilung (PGV) der Su34 + SI + Slu im Erstverdichtungsbereich (Vorentwässerung pF 1,8)



Änderung der Porengrößenverteilung (PGV) der Schluffe im Erstverdichtungsbereich (Vorentwässerung pF 1,8)



Änderung der Porengrößenverteilung (PGV) der LT (Tongehalt > 35 % im Erstverdichtungsbereich (Vorentwässerung pF 1,8)

Abb. 4 Änderung des Gesamtporenvolumens sowie der Porengrößenverteilung in Abhängigkeit von der Bodenbelastung für verschiedene Bodenartengruppen (DVWK, 1997)

Treatment	No. of samples	Pore diameter ¹ [mm]	No. of pores under the disc (182,4 cm ²) ²	%-Area occupied by pores	% Flux through pores
Corn row	152	> 1	674	2,89	91
No trafficked interrow	60	> 1	365	1,57	89
Traffic interrow	36	>1	156	0,67	92

Tab. 5 Vergleich der Makroporenintensität bei verschiedenen Nutzungsintensitäten auf einem Maisacker in Zentral Iowa (ANKENY ET AL., 1991)

(¹ The number of macropores and percentage porosity are calculated by assuming that pores are of the minimum radius of the tension range (30 mm) and therefore represent maximum values; ² Calculated using Poiseuille's equation.)

hochwasserverstärkend. Maßnahmen zu deren Vermeidung bzw. Verringerung sind daher, wie sie auch von HAMPL (1995) und ZERGER (1997) aus Gründen des Hochwasserschutzes gefordert werden, besonders wichtig.

Maßnahmen zum Schutz vor Bodenverdichtungen wirken sich nicht nur direkt auf die Erhaltung der Porosität und damit der Durchlässigkeit aus, sondern vermindern z. B. auch Bodenerosion und damit verbunden auch die abflussverstärkenden Verschlammungen (MORGEN, 1999) (vgl. Kap. 4.2). Darüber hinaus können verdichtete Böden aufgrund der Verminderung der luftführenden Poren O₂-Mangel aufweisen. Eine Verschlechterung der Lebensbedingungen für das Edaphon ist die Folge (SIMOJOKI ET AL., 1990; HODARA & DOMZAL, 1991). Auch sind verdichtete Böden schlechter durchwurzelbar (DEXTER, 1986; TAYLOR & BRAR, 1991) und Kulturpflanzen weisen auf diesen Böden eine erhöhte Anfälligkeit für Pflanzenkrankheiten auf (BÖRNER, 1990).

Die Vermeidung bzw. Verringerung von Bodenverdichtungen sollte nicht nur aus Gründen des Hochwasserschutzes erfolgen. Sie bietet darüber hinaus für den Landwirt viele Vorteile. Zum einen vermindern Bodenverdichtungen den Ertrag, wie verschiedenen Untersuchungen von z. B. RILEY (1994), LOWERY & SCHULER (1994) oder von RUSANOV (1991) gezeigt haben. Zum anderen steigern Bodenverdichtungen die Produktionskosten durch einen erhöhten Zugkraftbedarf (d.h. z. B. erhöhter Kapitalbedarf und höhere Energiekosten) sowie durch einen verstärkten Verschleiß an den Landmaschinen (MC KYES, 1985; OSKOU & VOORHEES, 1991; RUSANOV, 1991).

5. Literaturanalyse – Qualitative Bewertung von Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Steigerung der Infiltration

In diesem Kapitel sollen acker- und pflanzenbauliche Bewirtschaftungsmaßnahmen einer an die Belange des Boden- und Hochwasserschutzes angepassten Landbewirtschaftung diskutiert und bewertet werden, die eine Steigerung der Infiltrationskapazität auf den einzelnen Parzellen zur Folge haben und somit den Abfluss bei einem Niederschlagsereignis begrenzen. Behandelt werden Maßnahmen zur konservierenden Bodenbearbeitung (Kap. 5.1), Maßnahmen, die zu einer Vermeidung bzw. zu einer Verringerung von Bodenverdichtungen beitragen (Kap. 5.2) sowie Maßnahmen, bei denen es um die Wahl der Kultur und um die Gestaltung der Fruchtfolge geht (Kap. 5.3).

Es sei an dieser Stelle besonders darauf hingewiesen, dass die hier aufgeführten Maßnahmen die Reduzierung des Oberflächenabflusses durch Verbesserung der Infiltrationsbedingungen verfolgen. Die Wirksamkeitsbetrachtung wird daher zunächst nur bezogen auf Parzellenebene durchgeführt. Inwieweit sich diese Maßnahmen durch einen eventuell verstärkten Interflow auf der Einzugsgebietskala auswirken, wird in Kap. 8 diskutiert. Das methodische Vorgehen in diesem Kapitel wird in Kap. 2 erläutert.

5.1 Konservierende Bodenbearbeitung

Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	<i>X X X</i>	<i>Einfluss ist stark</i>
Aussagesicherheit	<i>X X X</i>	<i>Aussage ist eindeutig</i>
Umsetzbarkeit	<i>X X</i>	<i>realisierbar</i>
heutige Verbreitung der Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis	<i>X / X X</i>	<i>regional sehr unterschiedlich zum Teil kaum praktiziert bzw. nur auf Einzelflächen zum Teil verbreitet</i>

Tab. 6 Gesamtbewertung der Maßnahmen zur konservierenden Bodenbearbeitung

Die Bodenbearbeitung hat vor allem zum Ziel ein physikalisch günstiges Bodengefüge herzustellen. Es sollen damit optimale Voraussetzungen für die Keimung und das Wachstum der nachfolgenden Kultur geschaffen werden. Dies kann mit Hilfe verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren erreicht werden. Die verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren können in die folgenden zwei Gruppen gliedert werden:

- konventionelle Bodenbearbeitung (Bodenbearbeitung mit dem Pflug)
- konservierende Bodenbearbeitung (im weiteren Sinne), (Bodenbearbeitung ohne Pflug)

Die konservierende Bodenbearbeitung kann nach KTBL-ARBEITSGRUPPE (1993) wie in Abb. 5 dargestellt in die konservierende Bodenbearbeitung (im engeren Sinne) und die Direktsaat (vollständiger Verzicht auf Bodenbearbeitung) untergliedert werden. Im weiteren Text sind mit konservierenden Bodenbearbeitung beide Verfahren gemeint.

Bei der konservierenden Bodenbearbeitung geht es darum, eine optimale Bodenstruktur, die Ertragsfähigkeit sowie verschiedene Bodenfunktionen zu bewahren / zu konservieren. Die konservierende Bodenbearbeitung zeichnet sich gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung vor allem durch den Verzicht auf die wendende Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug aus. Darüber hinaus ist die konservierende Bodenbearbeitung durch zwei Grundgedanken gekennzeichnet. Diese beinhalten zum einen die Reduzierung der üblichen Intensität des mechanischen Eingriffs durch die Bodenbearbeitung nach Art, Tiefe und Häufigkeit. Es wird das Ziel verfolgt, ein stabiles, tragfähiges Bodengefüge vor allem durch längere Bodenruhe zu erreichen. Beinhaltet die konservierende Bodenbearbeitung eine nichtwendende Bodenlockerung, so erfolgt diese in der Regel nur oberflächennah, bei ausreichend abgetrockneten Bodenbedingungen und nicht nach jeder Fruchtart, sondern fruchtfolgespezifisch. Der Boden verliert hierbei nicht vollkommen seine Stabilität wie bei der wendenden Bodenbearbeitung und ist daher tragfähiger. Zum anderen soll eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung zum Schutz vor Bodenerosion und Verschlümmungen sichergestellt werden. Dies wird durch das Belassen von Pflanzenresten der Vor- und/oder Zwischenfrucht auf oder nahe der Bodenoberfläche erreicht. Für die Umsetzung der Mulchsaat stehen verschiedene Varianten zur Verfügung, die z. B. bei SOMMER ET AL. (1981), ESTLER (1987), ESTLER & SOMMER (1989), SCHMIDT & TEBRÜGGE (1989), BRUNOTTE (1991), HAMPL ET AL. (1995), SCHMIDT & STAHL (1999) und URI (1999) beschrieben sind.

Die Direktsaat wird nach KTBL-ARBEITSGRUPPE (1993) als eine Bestellung ohne jegliche Bodenbearbeitung seit der vorangegangenen Ernte definiert. Sie stellt damit eine besonders ausgeprägte Form der konservierenden Bodenbearbeitung dar und wurde in verschiedenen Ländern mit unterschiedlichem Erfolg praktiziert (Phillips & Phillips, 1984). Zu den vielfältigen pflanzenbaulichen Vorteilen zeichnet sich dieses Bestellverfahren dadurch aus, dass die Bodenerosion nach KTBL-ARBEITSGRUPPE (1993) praktisch ausgeschlossen ist. Die Direktsaat schützt den Boden vor Verschlümmungen und damit das Infiltrationsvermögen. Sie ist deshalb aus Sicht des Hochwasserschutzes zu begrüßen.

Die konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren bieten erhebliche Vorteile für den Hochwasserschutz, da sie die Infiltrationsbedingungen stark verbessern und die Bodenerosion und Bodenverschlümmungen sehr effektiv minimieren. Tab. 7 zeigt die positive Wirkung auf die Abflussreduzierung der pfluglosen Bodenbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung.

Böden, die mit Hilfe der konservierenden Bodenbearbeitung oder der Direktsaat bearbeitet werden, weisen vor allem einen größeren Anteil an Grob- und Makroporen auf. Dies ist vor allem auf die verbesserten Lebensbedingungen der Bodenfauna zurückzuführen (z. B. SCHWERDTLE, 1969; EHLERS, 1983; VORDERBRÜGGE, 1989; HEISLER ET AL., 1998).

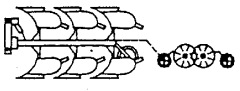
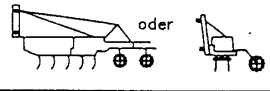


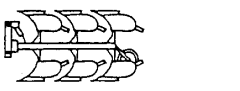
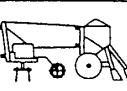

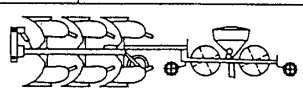
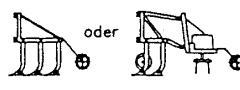








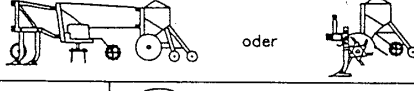



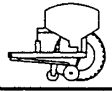


Verfahren	Grundbodenbearbeitung	Saatbettbereitung	Saat	Ablauf der Arbeitsgänge
Bodenbearbeitung mit Pflug		 oder 		getrennt
		 oder 	Bodenfräse oder Rotoregge	kombiniert, Saatbettbereitung u. Saat zusammengefaßt
				alle Arbeitsgänge kombiniert
Bodenbearbeitung ohne Pflug -konservierend-	 oder 			getrennt
	 oder 	 oder 		kombiniert, Saatbettbereitung u. Saat zusammengefaßt
	 oder 			alle Arbeitsgänge kombiniert
	—	  		ohne Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat kombiniert
Direktsaat	—	—		Saat ohne Bodenbearbeitung

Abb. 5 Systematik der Bodenbearbeitungsverfahren gemäß Definition der KTBL-ARBEITSGRUPPE (1993)

Bearbeitung	Abfluss		Niederschlag		Tag	Bodenfeuchte
	[%] vom N	[mm]	Höhe [mm]	Ereignisart		
Pflug	6,3	1,1	18,1	Gewitter	20.	trocken
Zinkenrotor	0,5	0,08				
Pflug	10,9	1,2	11,1	Landregen	21.-24.	nass
Zinkenrotor	0,4	0,04				
Pflug	14,7	2,4	16,5	Gewitter	26.	nass
Zinkenrotor	0,6	0,1				

Tab. 7 Einfluss der Grundbodenbearbeitung auf den Wasserabfluss nach langer Trockenheit (Ehlers, 1992).

(im August 1992; Hangneigung 3-5 %; Pflug: frische Pflugfurche ohne Mulch; Zinkenrotor: Bodenbearbeitung mit Zinkenrotor, 50 – 70 % Mulch (Haferstroh), reduzierte Bodenbearbeitung seit 1967, N = Niederschlag)

Von besonderer Bedeutung für die Bildung von Makroporen sind die Regenwürmer. Wie aus Abb. 6 ersichtlich wird nimmt ihre Abundanz mit abnehmender Intensität der Bodenbearbeitung zu. Nach Untersuchungen von FRIEBE (1994) schwanken die Abundanzen der in der Abb. 6 dargestellten drei Regenwurmartarten je nach Art und standortbedingt zwischen 20 und 160 Individuen pro m². Betrachtet man aber die relativen Abundanzen zwischen den vier untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten, so wird der Einfluss der Bodenbearbeitung recht deutlich. Das Verhältnis liegt bei 1:2:2:4 (P:SR:FR:D), bei den Varianten Pflug (P), Schwergrubber (SR), Flügelschargrubber (FR) und Direktsaat (D).

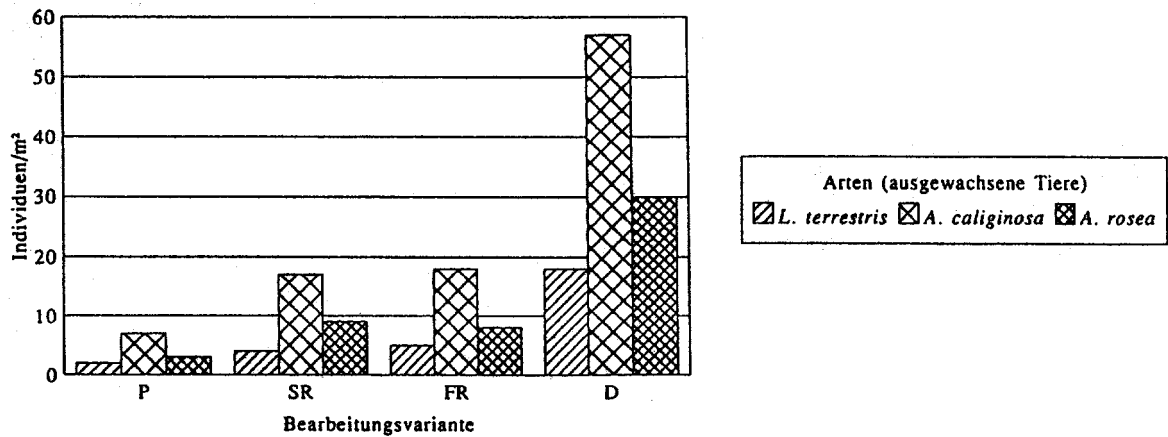


Abb. 6 Durchschnittliche Besiedlungsdichte der drei häufigsten Regenwurmartarten (*Lumbricus terrestris*, *Allolobophora caliginosa* und *Allolobophora rosea*) in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität (FRIEBE, 1994)
Pflugbearbeitung (P), Schwergrubber (SR), Flügelschargrubber (FR) und Direktsaat (D)

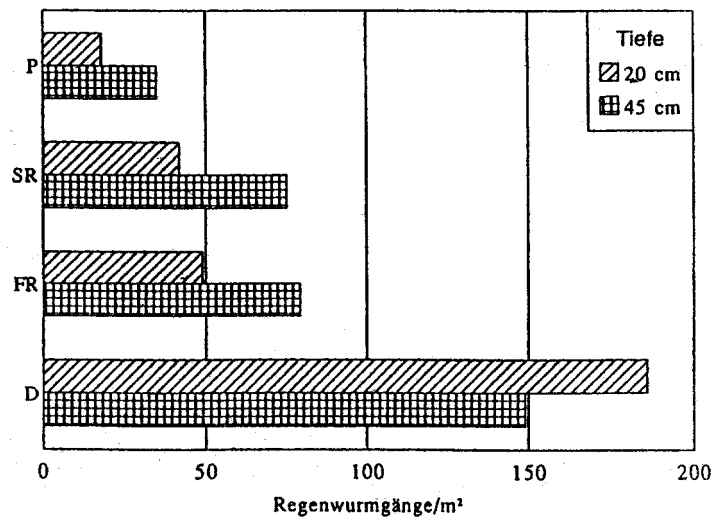


Abb. 7 Anzahl der angeschnittenen Regenwurmröhren pro m² in 20 und 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität (FRIEBE, 1994)
Pflugbearbeitung (P), Schwergrubber (SR), Flügelschargrubber (FR) und Direktsaat (D)

Bodentiefe [cm]	gepflügt				ungepflügt			
	Durchmesser [mm]				Durchmesser [mm]			
	2-5	5-8	8-11	gesamt	2-5	5-8	8-11	gesamt
2	21	5	1	27	75	40	2	117
20	60	18	1	79	99	41	1	141
30	124	58	5	187	209	91	5	305
60	174	165	9	348	183	172	8	363

Tab. 8 Anzahl an Regenwurmgängen pro m² in einem gepflügten und in einem seit vier Jahren ungepflügten Acker in verschiedenen Tiefen (EHLERS, 1975)

Durch intensive Bodenbearbeitung wird der Lebensraum der Regenwürmer zerstört. Die betrachteten Regenwurmartarten zeichnen sich im Gegensatz zu kleineren Tieren der Bodenfauna durch lange Generationszeiten aus, die bis zu einem Jahr betragen können. Dies erklärt die starken Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf die Bestandsdichte. Schon das einmalige Pflügen stellt für die Regenwurmpopulationen eine Elementarkatastrophe dar, da hierbei in der Regel große Individuenverluste auftreten. FRIEBE (1990) zählte maximal 20 getötete Regenwürmer pro m² nach dem Pflügen. Am ungestörtesten können sich die Regenwürmer bei der Direktsaat entwickeln. Das Nahrungsangebot ist bei der konservierenden Bodenbearbeitung und bei der Direktsaat durch die auf der Bodenoberfläche verbleibenden Pflanzenresten stark verbessert. Vor allem kommt dies dem großen *Lumbricus terrestris* zugute, der organische Stoffe von der Bodenoberfläche in seine Röhren zieht. Diese Art zeichnet sich als Tiefgräber aus, so dass durch ihn die Durchlässigkeiten auch in größeren Bodentiefen stark verbessert werden (FRIEBE, 1994).

Wie stark sich die Regenwurmaktivität auf die Anzahl an Makroporen auswirkt zeigt die Abb. 7. Hier sind die Anzahl der angeschnittenen Regenwurmröhren pro m² in 20 und 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität dargestellt. Die Abb. 7 zeigt, dass durchschnittlich 7 bis 8 mal mehr Regenwurmröhren bei der Direktsaat angetroffen werden konnten, als bei der Pflugbearbeitung. Aber auch die Bearbeitungsvarianten mit dem Grubber (SR, FR) zeigten eine 2 bis 3 mal höhere Anzahl an Regenwurmgängen als bei der Bodenbearbeitung mit dem Pflug (FRIEBE, 1994).

Die Bedeutung der verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten auf die Regenwurmhäufigkeit und die damit verbundene Verbesserung der hydraulischen Eigenschaften der Böden wurden auch von anderen Autoren bestätigt (z. B. EHLERS, 1975; LEE, 1985; DEXTER, 1987; GRAFF & MAKESCHIN, 1979; EDWARDS, 1980; HENKE, 1990; BEYER ET AL., 1992; EHRMANN, 1996). EHLERS (1975) beschreibt beispielsweise schon Anfang der 70er Jahre die positive Wirkung der nichtwendenden Bodenbearbeitung auf die Regenwurmaktivität sowie deren Wirkung auf eine Verbesserung der Infiltrationsbedingungen. Tab. 8 zeigt die von ihm vorgefundenen Häufigkeiten von Regenwurmgängen auf einem seit vier Jahren nicht mehr gepflügten Boden im Vergleich zu einem gepflügten. Abb. 8 verdeutlicht diese Ergebnisse und zeigt den prozentualen Volumenanteil der vorgefundenen Regenwurmgänge am Gesamtbodenvolumen. EHLERS (1975) konnte nachweisen,

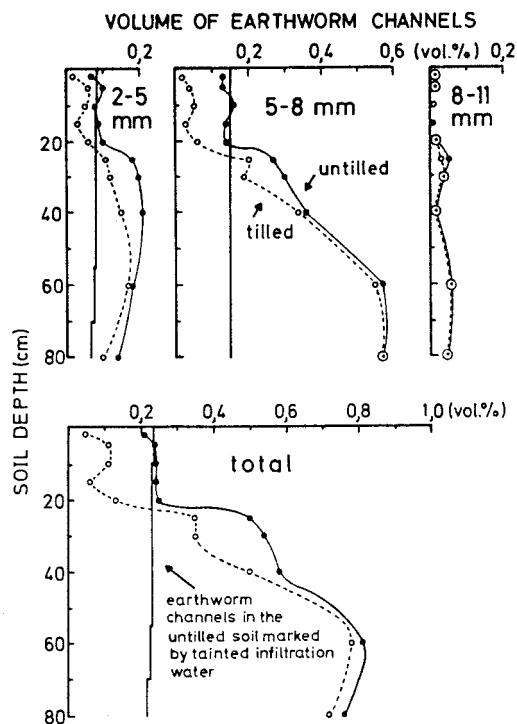


Abb. 8 Vergleich der Volumenanteile der Regenwurmgänge in Prozent bezogen auf das Gesamtbodenvolumen eines gepflügten (-o-) und eines seit 4 Jahren ungepflügten (-•-) Bodens in Abhängigkeit von der Bodentiefe (vgl. Tab. 8) (EHLERS, 1975)

oben:

Aufgeteilt in drei Porengrößenklassen (2-5, 5-8 und 8-11 mm Durchmesser),

unten:

Gesamtporengrößenvergleich.

dass fast alle Regenwurmgänge des Ap-Horizonts der ungepflügten Bearbeitungsvariante eine Verbindung zur Bodenoberfläche aufweisen und erhebliche Mengen an freiem Wasser aufnehmen und dies schnell in größere Tiefen bis zu 1,8 m weiterleiten.

Die Zunahme an Regenwurmröhren erhöht zum einen die Infiltrationsrate und mindert damit den Oberflächenabfluss, die Bodenerosion und die Bodenverschlammungen. Zum anderen verbessert sie die Durchlüftung des Ober- und Unterbodens und damit die Lebensbedingungen für die übrige Bodenflora und -fauna. Durch den Verzicht auf die wendende Bodenbearbeitung wird die bodenbiologische Aktivität verbessert. Dies fördert den Lebendverbau der Bodenpartikel. Die mechanische Stabilität des Bodens wird erhöht und damit die Verdichtungsempfindlichkeit gesenkt. Bei längerem Verzicht auf die wendende Bodenbearbeitung können sogar Pflugsohlenverdichtungen durch Regenwurm-tätigkeit zum großen Teil wieder aufgelöst werden.

Ein weiterer Vorteil der konservierenden Bodenbearbeitung sowie der Direktsaat ist die damit verbundene möglichst ganzjährige Erhöhung der Bodenbedeckung durch das Belassen von Pflanzenresten (Mulch) der Vor- und/oder Zwischenfrucht auf oder nahe der Bodenoberfläche. Nach RAWLS & RICHARDSON (1983) muss hierzu eine Oberflächenbedeckung durch Mulchmaterial von mindestens 20 % gegeben sein, um eine Verminderung des Oberflächenabflusses zu bewirken.

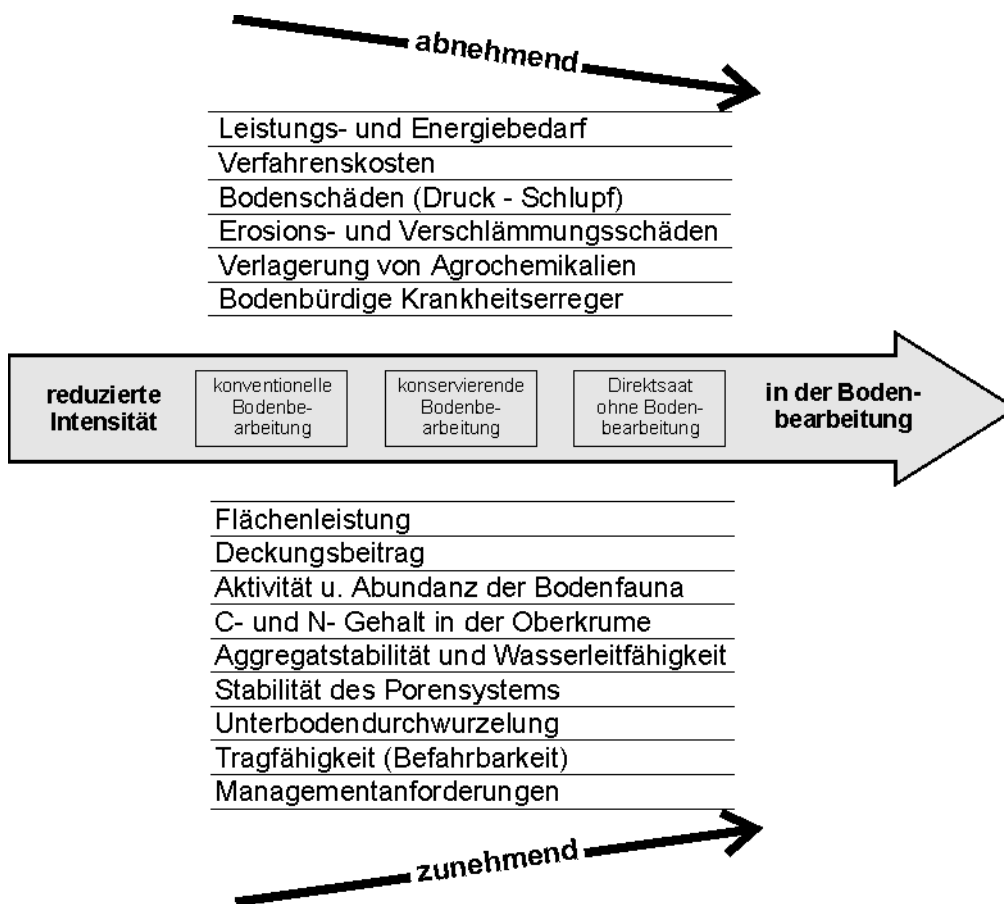


Abb. 9 Einfluss der Bodenbearbeitungsintensität (konventionelle Bodenbearbeitung, konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat) auf verfahrenstechnische, betriebswirtschaftliche sowie ökologische Aspekte (nach TEBRÜGGE, 1994)

Darüber hinaus weisen Tonböden bei Verzicht auf die wendende Bodenbearbeitung verbesserte Infiltrationsbedingungen und erhöhte Durchlässigkeiten auf, wenn sie aufgrund ihrer Mineralzusammensetzung ein Quellungs- und Schrumpfungsvermögen besitzen. Sie reagieren nach HORN (1986) und BOHNE (1988) mit stärkerer Aggregation und intensiver Rissbildung und erhöhen damit die Porosität sowie den Grob- und Makroporenanteil. Den Einfluss der Bearbeitungsintensität auf den Boden sowie auf verfahrenstechnische und betriebswirtschaftliche Aspekte fasst Abb. 9 zusammen.

Die Akzeptanz der konservierenden Bodenbearbeitung wird nach FRIELINGHAUS (1998) als gering eingestuft, wobei sie darauf hinweist, dass es hierbei durchaus regional starke Unterschiede gibt. Da die konservierende Bodenbearbeitung als das Schlüsselverfahren zum Bodenschutz angesehen werden kann, stuft sie es in erosionsgefährdeten Gebieten als förderwürdig ein. Gefördert wird die konservierende Bodenbearbeitung nach Informationen der GESELLSCHAFT FÜR KONSERVIERENDE BODENBEARBEITUNG E.V. (2001) in Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Sachsen und Bayern. In Sachsen betrug beispielsweise 2001 der Anteil der mit Mulchsaat bestellten Flächen etwa 30 % des sächsischen Ackerlandes. Dieser hohe Anteil ist dem Förderprogramm (Programm „Umweltgerechte Landwirtschaft“) zu verdanken, bei dem die Mulchsaattechnik durch den Freistaat finanziell gefördert wurde (DBU, 2002).

Die breite Realisierbarkeit scheitert nicht an den technischen Möglichkeiten. Langjährige Versuche unter Praxisbedingungen belegen, dass die Maschinenteknik praxistauglich ist und auch die Wirtschaftlichkeit der konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren der konventionellen Bodenbearbeitung in nichts nachsteht (z. B. BARTELS, 1999; BÄUMLER, 2000; BECK & LEPSCHY, 2000; BISCHOFF, 1999; BRUNOTTE ET AL., 1995; BRUNOTTE ET AL., 1999; BUCHNER, 2000; DEBRUCK ET AL., 2000; FREDE ET AL., 1994; GARBE ET AL., 2000; LINKE, 1998; NITZSCHE ET AL., 2000; SCHMIDT & STAHL, 1999; SCHMIDT ET AL., 1997; SCHMIDT ET AL., 1998; SCHMIDT, 1999; SOMMER, 1999; STEINERT, 1999; TERBRÜGGE, 1994; VOß ET AL., 1997; VOBHEINRICH, 1995). Allenfalls im ökologischen Landbau treten Probleme mit erhöhtem Beikrautdruck auf, die noch nicht als gelöst gelten (BARBERI, 2002 und GRUBER ET AL., 2000).

Die breite Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren wird durch das Festhalten der Betriebsleiter an gewohnten Praktiken, die sich aus deren Sicht bewährt hatten, verbunden mit Unsicherheiten über die neuen Bearbeitungsverfahren stark erschwert. Hinzu kommt der Investitionsbedarf für neue Maschinenteknik.

In den USA wird bereits 37 % der Ackerfläche konservierend bestellt (DLG, 2003). Dabei steht die Direktsaat an erster Stelle mit 20 %. Mulchsaat wird auf 16 % der Ackerfläche angewendet und die konservierende Reihbearbeitung (ridge till) ist mit 1 % vertreten. Nach neusten Umfragen stellt aber auch in Deutschland für einen Drittel der 800 von der Marketing-Agentur Kleffmann (DLG, 2003) befragten Landwirte die Mulchsaat ein vertrautes Produktionsverfahren dar. 30 % wenden danach die Mulchsaat an, wohingegen 65 % dies Verfahren nicht anwenden (5 % äußerten sich nicht). Von den „Anwendern“ bestellen 49 % Getreide nach Raps, 35 % Getreide nach Getreide und 31 % Raps nach Getreide pfluglos. 28 % säen Mais in Mulchsaat.

Teilziele									Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verringern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis		
C 3	C 3	C 3	A 3	C 3	C 3	A 3	C 3	C 3	A 3	A 3	C 6	C 9 C 11	C 13	BEISECKER, 1994	Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass das langjährige Unterlassen jeglicher Bodenbearbeitung (Direktsaat) zu einer dichteren und weniger wasserdurchlässigeren Bodenmatrix im Vergleich zu den jährlich bearbeiteten Varianten führt. Die Veränderung im Porensystem war bei dem aggregierten Boden ausgeprägter als bei dem Sandboden mit Einzelkornggefüge. Gleichzeitig bewirkte jedoch die langjährige Bodenruhe eine deutlich höhere Anzahl an kontinuierlichen Bioporen, was bei Starkregenereignissen zu einem wesentlich höheren Anteil an Makroporenfluss bei der Wasserinfiltration führt.
-	-	-	C 2	-	A 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 10	C 13	BRUNOTTE ET AL., 2000	Die schonende, nichtwendende Bodenlockerung mit Grubber oder Parapflug und anschließende Mulchsaat schaffen ein tragfähiges Gefüge und erhöhen damit die Befahrbarkeit für die Lasten von Ernte- und Transportfahrzeugen.
A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	A 3	C 6	A 8	A 13	BRUNOTTE, 1990	Der Autor analysierte und entwickelte bodenschonende Anbauverfahren / Bewirtschaftungssysteme weiter, die zu einer Verminderung von Bodenverdichtungen und zu einer Eindämmung von Bodenabtrag einen Beitrag leisten sollten. Die Untersuchungen bezogen sich auf die Praxis des Zuckerrübenanbaus. Der Schwerpunkt lag auf der Einführung der konservierenden Bodenbearbeitung. Messungen zur Wasseraufnahmefähigkeit stellten die Bedeutung der Porenkontinuität heraus, die bei Verzicht auf Sekundärbodenbearbeitung am größten ist, hervorgerufen durch ungestörte senkrecht verlaufende Wurzel- und Regenwurmgänge. Eine solche Mulchsaat erreichte das zwei- bis zehnfache Wasseraufnahmevermögen gegenüber den konventionellen Verfahren.
C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	-	C 3	A 3	C 3	C 3	A 3	C 6	C 9 C 11	C 13	EDWARDS ET AL., 1993	Durch Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung können Oberflächenabfluss und Bodenabträge auf ein tolerierbares Maß verringert werden, so dass ein Sojabohnenanbau auch in hängigen Lagen möglich wird.

Teilziele								Hauptziel	Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit		
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Ober- flächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit			Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
-	-	-	A 3	-	-	-	-	C 3	C 5	C 2	C 5	C 8 C 11	C 13	EHLERS, 1973	<p>An Stechzylinder-Bodenproben unbearbeiteter und bearbeiteter Parzellen eines Versuches zum Ackerbau ohne Bodenbearbeitung auf Löß-Parabraunerde wurden Gesamtporenvolumen (GPV) und Porengrößenverteilung bestimmt (Bodenproben Entnahmetiefe 2-6 cm, mehrere Jahre in enger Zeitfolge).</p> <p>Das GPV der unbearbeiteten Parzellen liegt im Durchschnitt um 4,7 Vol.-% unter dem der bearbeiteten. Die jahreszeitlichen Änderungen sind auf "bearbeitet" stärker als auf "unbearbeitet". Zum Frühjahr und Herbst werden höhere GPV-Werte beobachtet als im Sommer. Einfluss nehmen Bodenbearbeitung, Niederschläge und Zwischenfrüchte.</p> <p>Es zeigt sich, dass im Untersuchungsboden hauptsächlich nur die Grobporen durch Verdichtung und Lockerung betroffen waren, kaum aber die anderen Porengrößenbereiche.</p> <p>Das durchschnittliche GPV des unbearbeiteten und bearbeiteten Bodens liegt bei diesem Versuch an der unteren bzw. oberen Grenze des Bereichs, für den die Luftkapazität als optimal angesehen wird.</p>
A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	A 3	C 6	C 8 C 11	C 13	EHLERS, 1975	<p>Pfluglose Bodenbearbeitung bewirkt eine deutliche Zunahme an Regenwurmängen, die wiederum eine starke Erhöhung der Infiltrationsrate mit sich bringt. Verglichen wurden die vorgefundenen Regenwurmängen eines gepflügten und eines vier Jahre ungepflügten Bodens. Es traten folgende Veränderungen auf: Die obersten 20 cm des Bodens wiesen eine höhere Lagerungsdichte und eine erhöhte Porosität auf. Die Porenkontinuität war bis zur Bodenoberfläche gewährleistet, so dass eine schnelle Infiltration von Oberflächenwasser gegeben war. Insgesamt war die Bodenstruktur des ungepflügten Bodens stabiler.</p>

Teilziele										Hauptziel	Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit	
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis			
B 3	C 3	A 3	A 3	C 3	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	A 3	C 6	A 8 *a	C 14 *c	C 11 *b	EHLERS, 1991 UND EHLERS, 1992	<p>Reduzierte Bodenbearbeitung wird als Bodenbearbeitungssystem verstanden, das bewusst geplant und auf längere Zeitdauer auf Ackerflächen praktiziert wird. Reduziert werden die Anzahl der Bearbeitungsschritte und die Tiefe der Bearbeitung. Auf den Wendepflugeinsatz wird gänzlich verzichtet. Die Bodenoberfläche bleibt mit Mulch bedeckt.</p> <p>Folgende Effekte ergeben sich bei dessen Anwendung:</p> <p>Anreichern organischer Substanz in Oberflächennähe; auf der Grundlage der organischen Substanz wird die mikrobielle Aktivität in Oberflächennähe gesteigert, wodurch zusammen mit der Mulchdecke die Bodenaggregate geschützt und stabilisiert werden.</p> <p>Auf bodenphysikalischer Seite ist der augenfälligste Effekt in einer mäßigen Dichtlagerung des Bodens bei hoher Porenkontinuität zu sehen. Andererseits werden massive Krumbasisverdichtungen aus der Zeit des Pflügens bei nur flacher, nicht wendender Bodenbearbeitung auf vielen mittleren und schweren Böden langsam wieder aufgelockert.</p> <p>Im Vergleich zur Pflugarbeit fördert reduzierte Bearbeitung die Bodenfauna. Dieser bodenbiologische Effekt kann besonders deutlich an der Aktivität der Regenwürmer erkannt werden. Neben Pflanzenwurzeln durchporen auch die Würmer den Boden. Diese Gänge bleiben bei flacher Bearbeitungsweise erhalten, Sie dienen dem Wurzelwachstum in die Tiefe, fördern aber auch die Wasserinfiltration bei Starkregen sowie die Durchlüftung.</p> <p>*a: Bei den ackerbaulichen Problemen für die Anwendung der reduzierten Bodenbearbeitung nennt Ehlers vor allem die Bewältigen großer Erntemassen bis zum nächsten Saattermin in der Weise, dass die makroorganische Substanz eine einwandfreie Saat gewährleistet und die keimende Saat nicht durch austretende Organika beeinträchtigt wird. Der rasche Abbau durch Bodenflora und -fauna muss durch oberflächennahes Einnischen, durch Kurzhäckseln und Spleißen des Stroh unterstützt werden. Ein weiteres ernsthaftes Problem besteht im Ausbreiten von Unkrautgesellschaften. Hier ist besondere Vorsorge und Sorgfalt in der chemischen und mechanischen Bekämpfung sowie in der Fruchtfolgegestaltung geboten. *b Die von Ehlers benannten Probleme können zum Teil durch die Entwicklung von geeigneten Maschinen als gelöst angesehen werden. Die Hemmnisse bei der Umstellung auf eine reduzierte Bodenbearbeitung können vor allem in emotionalen Aspekten der Betriebsleiter gesehen werden. *c Die Verbreitung ist regional sehr unterschiedlich: in manchen Regionen wird dies Verfahren kaum praktiziert und in anderen ist es schon relativ weit verbreitet.</p>

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit		
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit			Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
-	-	-	-	-	-	A 6	A 5	A 4	C 4	C 2	C 4	C 8 C 11	C 13	EITZINGER & KLAGHOFER, 1995	<p>Im Rahmen einer Dissertation wurden die langfristigen Auswirkungen verschiedener Primärbodenbearbeitungsverfahren auf einige bodenphysikalische Eigenschaften untersucht, wobei alle Kulturmaßnahmen außer der Bodenbearbeitung konstant gehalten wurden.</p> <p>Die Pflugvarianten zeigen im Eindringwiderstand und im Porenanteil innerhalb der bearbeiteten Krume relativ größere Unterschiede als die Grubervarianten und die Fräsvariante, da die Erdbalcken durch die Pflugbearbeitung nur ungenügend gelockert wurden. Sie sind auch nach einem Jahr noch zu erkennen.</p> <p>Die Infiltrationsraten aller Varianten steigen mit größer werdender Bearbeitungstiefe, abnehmendem Eindringwiderstand und zunehmendem Grobporenanteil. Der Grobporenanteil liegt ausgenommen bei der Pflugvariante innerhalb der Bearbeitungszone bei allen Varianten in einem sehr niedrigen Bereich. Der weitaus größte Anteil des bei den Pflugvarianten höheren Grobporenvolumens ist auf die durch Pfluglockerung künstlich geschaffenen Grobporen zurückzuführen. Diese sind nicht sehr stabil und durch Verdichtung leichter zu zerstören als z. B. relativ stabile Regenwurmröhren.</p> <p>Die höhere Regenwurmröhrenanzahl der Grubber- und Fräsvariante innerhalb der bearbeiteten Krume hatte keine wesentliche Erhöhung des Infiltrationsvermögens des Bodens zur Folge.</p> <p>Die Aussagen, die in diesem Aufsatz gemacht werden, stehen damit im Widerspruch zu anderen in dieser Tabelle aufgeführten, die in der Regel eine eindeutige Zunahme der Infiltrationsrate bei abnehmender Intensität der Bodenbearbeitung feststellen konnten. Methodisch wäre zu klären, zu welchem Zeitpunkt die Versickerungsmessungen gemacht wurden.</p>
C 3	C 3	C 2	A 3	C 2	C 2	C 2	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 10	C 13	FRANKEN & LOH, 1987	<p>In drei verschiedenen Feldversuchen wurde der Einfluss ackerbaulicher Maßnahmen (Stroh-/Gründüngung, Bodenbearbeitung) auf die Dynamik der Aggregatstabilität untersucht.</p> <p>Bei den Versuchen mit der Feldfrucht Zuckerrübe verläuft die Dynamik der Aggregatstabilität deutlich in Abhängigkeit vom Anbauverfahren, so dass von einem starken Einfluss des Bodenbearbeitungsverfahrens auf die Aggregatstabilität ausgegangen werden kann.</p>

Teilziele									Hauptziel	Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern Verschlammungen vermeiden / verhindern Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Ober- flächenabfluss verzögern Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis				
B 3	B 3	B 3	B 3	B 3	B 3	B 3	B 3	A 6	C 9 C 11	C 13	FREDE ET AL., 1994	Es wird ein Überblick über den Kenntnisstand von Langzeiteffekten unterschiedlicher Bearbeitungssysteme auf den Boden gegeben. Verschiedene in Deutschland durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass beim Übergang von konventioneller zu reduzierter Bodenbearbeitung und Direktsaat kein Ertragsrückgang zu erwarten ist. Sowohl die Konzentration als auch die Menge organischer Substanz im Oberboden wird erhöht. Auch die biologische Aktivität wird erhöht. Die höhere Dichtlagerung des Oberbodens wirkt positiv auf das Wasserspeichervermögen. Die Durchlüftung ist dagegen reduziert, ebenso die Wärmeleitung. Stabilere Porensysteme bewirken eine insgesamt höhere Infiltrationskapazität und eine Erosionsminderung. In Abhängigkeit von Bodenart und Klima sind die Effekte unterschiedlich ausgeprägt.		
-	A 3	-	-	A 3	A 3	A 3	A 3	C6	C8 C 11	C 13	FREDE, 1991	Es werden die gefügebildenden Wirkungen natürlicher Kräfte auf schluffreichen Böden beschrieben. Als wirksame Kräfte sind hier die Pflanzenwurzeln, die Bodentiere, die Luftporengrenzung, der Frost und mit Einschränkung die Quellung von Tonmineralen zu nennen. Die Wirkungsmechanismen einzelner Kräfte sind sehr unterschiedlich, ebenso wie der jeweils ausgelöste Druck. Alle Kräfte können das Gesamtporenvolumen vergrößern, wobei die Vergrößerung in der Regel durch die Zunahme an Grobporen erfolgt. Die Auswirkungen der natürlichen Kräfte auf kleinere Porengrößenklassen sind weitgehend unbekannt. → Verbesserung der Lebensbedingungen vor allem von Makrobodenfauna durch konservierende Bodenbearbeitung verbessert die Gefügebildung / fördert die Bildung von stabilen Bodenaggregaten.		

Teilziele								Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit		
C 3	C 3	C 3	A 3	C 2	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	C 3	C 6	- C 8 C 11	C 14	<p>FRIEBE, 1990 UND FRIEBE, 1994</p> <p>Bodenbearbeitung führt zu einer Elementarkatastrophe für die Meso-, Makro- und Megafauna des Bodens, da hierbei der Lebensraum zerstört wird. Eine rasche Erholung ist hierbei nur bei stabiler, grobporenricher Struktur möglich. Eine abnehmende Bodenbearbeitungsintensität fördert die Besiedlungsdichte und Biomasse der Regenwürmer, da ihr Lebensraum zum einen nicht zerstört wird und auch direkte Verluste durch die mechanische Bearbeitung unterbleiben.</p> <p>Durch ein Verbleiben von Ernteresten auf dem Acker kann das Überleben der Destruenten gesichert werden.</p> <p>Durch eine Vermehrung von Regenwurmröhren – besonders der vertikalen von Lumbricus terrestris – werden die physikalischen Bodenparameter verbessert. Versickerung von Niederschlagswasser, Drainage und Durchlüftung des Ober- und Unterbodens nehmen zu; die Lebensbedingungen für die übrige Bodenfauna und -flora wird verbessert und das Erosionsrisiko wird gleichzeitig vermindert.</p> <p>Nach einigen Jahren pflugloser Bearbeitung wird durch die tiefgrabenden Lumbricus-Arten, die große Mengen mineralischen Substrates vertikal im Boden bewegen und durch Vermengung mit organischem Bestandteilen zur Bildung von stabilen Ton-Humus-Komplexen beitragen, eine vorher vorhandene Pflugsohle aufgelöst und die Infiltrationsbedingungen werden verbessert.</p>
C 3	C 3	C 3	A 3	C 2	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	C 3	C 6	- C 8 C 11	C 14	<p>GRUBER, 1989</p> <p>Verstärkte bodenbiologische Aktivität wird begünstigt durch verminderte Bodenbearbeitung und verbessert dadurch den Lebendverbau der Bodenpartikel. Dadurch wird die mechanische Stabilität des Bodens gefördert und die Druckempfindlichkeit vermindert. Ebenso verringert sich die Verdichtungsgefahr im Ober- und Unterboden, etwa durch schwere Erntemaschinen.</p>

Teilziele									Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis		
C 3	C 3	A 3	A 3	C 2	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	A 3	C 6	C 8 C 11	C 13	HEISLER ET AL., 1998	<p>Unter der Kulturfrucht Zuckerrübe auf einer erodierten Parabraunerde wurden vergleichend Parzellen unter Pflugbewirtschaftung bzw. Mulchsaat hinsichtlich Bodengefüge, Regenwurmfauna sowie Mesofauna (Collembolen und Raubmilben) untersucht. Die Besatzdichten aller drei untersuchten Bodentiergruppen waren in der Mulchsaat-Parzelle wesentlich höher als in der gepflügten. In der Mulchsaat-Parzelle wurden wesentlich mehr juvenile Regenwürmer gefunden (größeres Vermehrungspotential). Mulchsaat zu Zuckerrüben leistet einen hohen Beitrag zur Erhaltung der biologischen Aktivität im Boden und gleichzeitig für den Erosionsschutz.</p> <p>Die Reduzierung der Intensität der Bodenbearbeitung hat in der Oberkrume der Variante 'Mulchsaat' im Vergleich zur Variante 'Pflug' zu einem offensichtlich stabileren Gefüge geführt. Es zeichnet sich durch eine ausgeprägt vertikal-kontinuierliche Makroporosität aus. Das insgesamt etwas niedrigere Niveau der Bodendichte weist auf eine geringere Beeinflussung durch Druckbelastungen von schweren Maschinen hin.</p>
C 3	C 3	C 2	A 3	C 2	C 2	C 2	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 10	C 13	HÖVELMANN & FRANKEN, 1993	<p>Die Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität und die mit einem Kleegrasanbau verbundene einjährige Bodenruhe erhöhen zum Teil signifikant die Stabilität oberflächennaher Bodenaggregate unter Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste.</p> <p>Die wendende Bodenbearbeitung führt zu einem einheitlichen Stabilitätsniveau im gesamten Krümmenprofil. Nichtwendende Bodenbearbeitung in Kombination mit einer Strohdüngung hat demgegenüber eine deutliche Erhöhung der Aggregatstabilität in der Oberkrume zur Folge. An der Krümmenbasis liegen beide Varianten auf gleichem Niveau.</p>
-	-	-	C 3	-	-	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	JOSCHKO & HÖFLICH, 1996	<p>In Feldversuchen im Raum Müncheberg, Brandenburg, wurde die Auswirkung konservierender Bodenbearbeitung auf das Bodenleben untersucht. Die durchschnittliche Anzahl der Regenwürmer und Enchyträen war auf konservierend bewirtschafteten Flächen unter Silomais stets höher als auf den konventionell bearbeiteten. Sowohl bei den Bodentieren als auch bei mikrobiologischen Parametern zeigte sich eine deutliche Stratifizierung bei der konservierenden Bodenbearbeitung, wobei die obersten 10 cm eine deutlich erhöhte Aktivität aufwiesen. Die Verteilung des groben Pflanzenmaterials zeigte ein ähnliches Muster. Die Bodenatmung (0-30 cm) war während der Hauptvegetationsperiode von Winterroggen bei konservierender Bodenbearbeitung im Vergleich zur Pflugfurche reduziert.</p> <p>→ Bewertung erfolgt unter der Annahme, dass verbesserte Lebensbedingungen der Regenwürmer zur Bildung von Makroporen beiträgt.</p>

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit		
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit			Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
*a	*a	*a	*a	*a	*a	*a	*a	*a	*a	*a	*a	*a	*a	KNÜSTING, 1992	Ziel der Arbeit ist es zu klären, inwieweit ein abgestufter Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatz auf Ackerflächen das Artenspektrum, die Aktivitätsdominanz, die Aktivitätsdichte und Biomasse sowie die Aktivitätsdynamik und den Entwicklungszyklus von Regenwürmern beeinflusst. Es kann zwischen Bewirtschaftungsverfahren niedriger Intensität (extensiv, alternativ, biologisch etc.) und höherer Intensität (integriert, intensiv, konventionell) unterschieden werden. Auf der Versuchsfläche hatte die Bewirtschaftungsintensität keinen deutlichen Einfluss auf den Regenwurmbesatz und die Biomasse, weil vermutlich die Differenzierung acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen auf einem sehr hohen Niveau erfolgte. Die auf der Versuchsfläche vorkommenden Regenwurmartens reagieren unterschiedlich auf die Höhe der Bewirtschaftungsintensität. → Da mit Bearbeitungsintensität nicht die mechanische Bodendenbearbeitung gemeint war, was anhand des Titels vermutet werden könnte, können die Ergebnisse für die vorliegende Arbeit nicht direkt verwendet werden und es wurde von einer Bewertung abgesehen (*a). Die unterschiedlichen Bewirtschaftungsverfahren wurden auf Parzellen mit Pflug-Grundbodenbearbeitung durchgeführt.
-	-	-	C 3	-	C 3	-	-	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	OLDEROENGE, 1999	Pflanzenschutz und Düngung ist bei konservierenden Bodenbearbeitung und Mulchsaat mit allgemein ortsüblichen Strategien im konventionellen Anbau vergleichbar. Der Ertrag ist bei unseren Boden- und Klimabedingungen mit dem Ertrag in konventionellen Verfahren vergleichbar, wobei sich deutliche Vorteile bei den Stückkosten abzeichnen. Der größte Vorteil konservierender Bodenbearbeitung ist aber die vorteilhafte Umstrukturierung der Ackerkrume. Die Wurzelbildung verläuft störungslos; auch werden zusätzliche Nährstoffe im Unterboden verfügbar.
-	-	-	-	-	-	-	A 3	A 3	A 3	A 3	C 5	C 8 C 11	C 13	POTTER, 1991	Der Autor untersuchte das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes in Wisconsin, USA. Er konnte sowohl eine Abnahme an Abflussspitzen als auch eine Verminderung der Abflussvolumina bei den Winter- Frühlings-Fluten feststellen. Die klimatischen Faktoren haben sich im Untersuchungszeitraum nicht geändert. Auch wurden weder Wasserbauliche Maßnahmen noch Landnutzungsänderung im Einzugsgebiet durchgeführt. Potter erklärt die Verminderung von Abflussspitzen und -volumina durch Änderungen in der Bewirtschaftung. In den USA wurde ab Mitte der 30er Jahre auf verschiedene Arten von konservierender Bodenbearbeitung / erosionsmindernden Anbauverfahren umgestellt.

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit	
Splashwirkung vermeiden / verhindern Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Ober- flächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermei- den	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit			heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
-	-	-	A 3	-	-	A 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	RADMACHER ET AL., 1995	Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Rekultivierung von Böden aus Löß (Braunkohleabbau) günstige Voraussetzungen für eine rasche Entwicklung einer Regenwurmpopulation geschaffen werden können, indem durch eine verringerte Bearbeitungstiefe und -intensität (durch z. B. Direktsaat) die Entwicklung der Lumbricidenfauna weiter gefördert wird.
-	-	-	-	-	-	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	-	-	ROTH & JOSCHKO, 1990	Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss von Regenwurmgängen (unter Laborbedingungen) und künstlichen Vertikalporen auf die Verminderung von Oberflächenabfluss während künstlicher Beregnung zu quantifizieren. In allen Fällen führte das Vorhandensein von stabilen Gängen zu einer deutlichen Verringerung des Abflusses. In den Versuchen mit Abflusskästen stellte sich eine hoch signifikante Korrelation zwischen der Anzahl von Gängen und der Abflussrate heraus, wobei die Messungen bei 5 % Hangneigung und einer Niederschlagsrate von 30 mm/h einen größeren Effekt aufwiesen als die bei 10% Hangneigung und 60 mm/h Intensität. → Unter der Annahme, dass die Regenwurm-tätigkeit bei konservierender Bodenbearbeitung zunimmt, stellt sich ein positiver Effekt auf die Infiltrationsbedingungen / Verminderung des Oberflächenabflusses ein.
C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	A 3	C 3	A 3	C 3	C 3	C 6	C 9 C 11	C 13	SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR LANDWIRT- SCHAFT (HRSG.), 1996	Die nichtwendende Bodenbearbeitung und die Direktsaat stellen zukunftsweisende Bestellverfahren dar. Sie erlauben Betrieben mit großer Flächenausstattung bedeutende Kosteneinsparungen. Sie vermindern in erheblichem Umfang die Bodenerosion und wirken zudem der Bodenverdichtung und dem Stickstoffaustrag auf Ackerflächen entgegen. Wie langjährige Versuche zeigen, ist eine pfluglose Feldbestellung nicht mit Ertragseinbußen verbunden. Damit können Landwirtschaftsbetriebe mit den pfluglosen Bestellverfahren den zunehmend schwierigeren ökonomischen Produktionsbedingungen sowie den ökologischen Erfordernissen im Rahmen des Ackerbaus erfolgreich begegnen. Pfluglose Feldbestellung erfordert jedoch ein Umdenken in der Unkrautbekämpfungsstrategie (andere Bekämpfungszeitpunkte, Einsatz anderer Herbizide). Besondere Aufmerksamkeit ist zudem der Strohverteilung und der Bekämpfung von Ausfallgetreide zu schenken. Eine flache, gut mischende Stoppelbearbeitung sowie Änderungen in der Fruchtfolge sind dabei oft unumgänglich. Für eine weitgehend störungsfreie Aussaat auch bei Mulchauflagen steht heute eine breite Palette leistungsfähiger Gerätetechnik zur Verfügung.

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit		
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit			Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
C3	C3	C3	C3	C3	A3	C3	A3	C3	C3	C3	C6	C9 C11	C13	SCHMIDT & STAHL, 1999	Die heute verfügbare Mulch- und Direktsaattechnik ermöglicht bei der Rapsbestellung den Verzicht sowohl auf die wasserzehrende krummtiefe Pflugfurche mit nachfolgender Rückverfestigung als auch auf die Herstellung eines feinen Saatbettes. So kann Raps in ein gröberes, mulchbedecktes Saatbett eingesät werden. Die Mulchschicht senkt - das zeigen Bodenabtragsmessungen der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft und des Sächsischen Landesamts für Umwelt und Geologie – den Bodenabtrag durch Wasser um 90 % bis 100 % gegenüber konventioneller Bestellung. Winterraps kann mit Erfolg ohne Pflug in Mulchsaat angebaut werden. Hinweise zu konkreten ackerbaulichen Maßnahmen werden gegeben.
C3	C3	C3	C3	C3	C3	A3	A3	A3	A3	A3	C6	C9 C11	C13	SCHMIDT ET AL., 1999	Erosionsbedingte Bodenverluste und damit einhergehende Stoffeinträge in Oberflächengewässer können durch Anpassung der Bewirtschaftung erheblich minimiert oder sogar gänzlich vermieden werden. Es wurden Messergebnisse vorgestellt aus Beregnungsversuchen, die bei konsequenter Anwendung konservierender gegenüber konventionellen Bewirtschaftungsmethoden belegten, dass sowohl Oberflächenabfluss als auch Bodenabtrag um ein Vielfaches reduziert werden konnte.
-	-	-	A3	-	A3	A3	C3	C3	C3	C3	C6	C8 C11	C13	SEMMELE & HORN, 1994	Beim Vergleich verschiedener Belastungsvarianten wurde vor allem bei konservierend bewirtschafteten Oberböden eine verringerte Scherbruchgefährdung selbst nach einer Umstellungsphase von nur drei Jahren festgestellt. Gerade die konventionelle Pflugarbeit führt zu starker Bodenbeanspruchung bis in größere Tiefe. Wenn dabei die Eigenstabilität nicht groß genug ist, besteht die Gefahr zusätzlicher Unterbodenverdichtungen, die durch die Folgebewirtschaftung nicht rückgängig gemacht werden. Daher ist der Übergang zu alternativen Lockerungsverfahren durchaus sinnvoll.
-	-	-	B3	-	B3	B3	C3	C3	C3	C3	C6	C8 C11	C13	SOMMER & HARTGE, 1991	In dem Beitrag wird der Problembereich Bodenverdichtung und Befahrbarkeit aufgearbeitet. Ausgehend von den Einflussfaktoren werden die Auswirkungen von Bodenverdichtungen angesprochen, Lösungen aufgezeigt und Ansätze im Sinne eines vorsorgenden Bodenschutzes entwickelt. Es wird unter anderem auf die verbesserte Befahrbarkeit von konservierend bewirtschafteten Böden hingewiesen.

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit	
Splashwirkung vermeiden / verhindern Verschlammungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Ober- flächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermei- den	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit			heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
C 3	C 3	C 3	C 3	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	A 3	C 6	C 9 C 11	C 13	TEBRÜGGE & ABELSOVA, 1999	Die Ergebnisse zur Infiltrationsleistung wurden stark vom Standort geprägt. Bei einem Auenpseudogley konnten keine gravierenden Unterschiede bei der Versickerungsleistung gemessen werden, da bei der Pflug-Variante der Tonboden im August wegen geringer Feuchtigkeit zahlreiche Schrumpfrisse aufwies. Das applizierte Wasser wurde daher schnell in den Bodenspalten abgeleitet. Die Direktsaat-Variante hingegen wies auf diesem Standort wegen höherer Bodenfeuchte, die ursächlich auf die höhere Lagerungsdichte zurückzuführen ist, keinerlei Schrumpfrisse auf. Dennoch wurde die aufgebrachte Wassermenge in gleicher Zeitspanne demnach allein durch die Bioporen im Bodenkörper abgeleitet. Dies steht in engem Zusammenhang mit dem 10-fach höheren Regenwurmbesatz (200/m ²) der Direktsaatvariante im Vergleich zur Pflugvariante (21/m ²). Auch auf der Tschernosem-Parabraunerde wurde die Versickerungsleistung maßgeblich von der Bioporenanzahl in Abhängigkeit von den Bodenbearbeitungsvarianten beeinflusst. Während auf der Direktsaat-Variante nahezu eine Wassermenge von 19 mm/s (Q = 40 mm) durch die biogenen Makroporen abgeleitet werden konnte, betrug die Infiltrationsleistung bei der Pflug-Variante nur 8,5 mm/s. Die Ergebnisse belegen, dass ein vertikal geprägtes Bioporensystem, dass in Abhängigkeit des Bodenmaterials bis zu 2 m tief in den Boden reichen kann, in der Lage ist erhebliche Niederschlagsmengen im Bodenkörper zügig abzuführen.
C 3	C 3	C 3	C 3	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	A 3	C 6	C 9 C 11	C 13	TEBRÜGGE, 2000	Anhand 20-jähriger Versuche unter Praxisbedingungen und Forschungsergebnissen auf internationaler Ebene lässt sich ableiten, dass einerseits durch Verfahren der pfluglosen Bodenbearbeitung bis hin zur Direktsaat in der Regel vergleichbare Pflanzenerträge erzielt und andererseits die vielfältigen Funktionen des Bodens bewahrt werden können und die vielfältigen Vernetzungen im Ökosystem gefördert werden. Die Direktsaat bietet somit die Möglichkeit, sowohl den Forderungen des Boden- und Klimaschutzes weitgehend zu entsprechen, als auch den wirtschaftlichen Belangen des Landwirts Rechnung zu tragen.

Tab. 9 Literatur-Auswertungs-Tabelle zur konservierenden Bodenbearbeitung (Legende siehe Tab. 2)

Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlung – konservierende Bodenbearbeitung / Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung**Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung**

Umstellung der konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Pflug auf pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren der konservierenden Bodenbearbeitung bzw. der Direktsaat. Die konservierende Bodenbearbeitung zeichnet sich vor allem durch die folgenden Merkmale aus:

- Verzicht auf die wendende Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug
- Reduzierung der üblichen Intensität des mechanischen Eingriffs durch die Bodenbearbeitung nach Art, Tiefe und Häufigkeit
- Bodenlockerung erfolgt in der Regel nur oberflächlich, bei ausreichend abgetrockneten Bodenbedingungen und nicht nach jeder Fruchtart, sondern fruchtfolgespezifisch.
- Sicherstellung einer möglichst ganzjährigen Bodenbedeckung durch das Belassen von Pflanzenresten der Vor- und/oder Zwischenfrucht auf oder nahe der Bodenoberfläche
- Durchführung der Mulchsaat

Die Direktsaat stellt eine noch weitergehende Reduzierung des mechanischen Eingriffs in den Boden dar, die sich nach KTBL-Arbeitsgruppe (1993) als eine Bestellung ohne jegliche Bodenbearbeitung seit der vorangegangenen Ernte definiert.

Tab. 10 Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlungen – konservierende Bodenbearbeitung / Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung

5.2 Bodenverdichtungen vermeiden bzw. verringern

Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	<i>X X X</i>	<i>Einfluss ist stark</i>
Aussagesicherheit	<i>X X X</i>	<i>Aussage ist eindeutig</i>
Umsetzbarkeit	<i>X X</i>	<i>realisierbar</i>
heutige Verbreitung der Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis	<i>X / X X</i>	<i>Regional unterschiedlich - je nach Maßnahme und Region kaum praktiziert bis verbreitet</i>

Tab. 11 Gesamtbewertung der Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen

Bodenverdichtungen können durch direkte und indirekte Maßnahmen minimiert werden. Bei den indirekten Maßnahmen geht es darum, die Belastbarkeit des Bodens, z. B. durch Kalkung und Humuszufuhr zu erhöhen. Auch der Verzicht auf die Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug wirkt sich stark bodenstabilisierend aus (vgl. Kap. 5.1) und führt zu einer Reduzierung der Bodenbelastung (Abb. 10). Die Verfahren zur konservierenden Bodenbearbeitung führen zwar zu einer Erhöhung der Lagerungsdichte, die sich aber stark bodenstabilisierend auswirkt (HORN, 1981; FREDE ET AL., 1994; SOMMER, 1998; EHLERS, 2001; DBU, 2002). Bei den direkten Maßnahmen steht die Vermeidung bzw. Minimierung der Bodenbelastungen im Vordergrund. Die hierfür notwendigen Maßnahmen beziehen sich zum einen auf die Nutzung technischer Möglichkeiten und zum anderen auf die Änderung der Verfahrensweise. Die hierfür notwendigen Maßnahmen und deren Effekte werden in den folgenden Abschnitten beschrieben:

- Konsequente Beachtung der Befahrbarkeit des Bodens
- Verringerung der Radlast
- Verminderung des Kontaktflächendruckes
- Reduzierung der Überrollhäufigkeit
- Begrenzung von dynamischen Effekten

Ziel der verschiedenen Maßnahmen ist es, die bewirtschaftungsbedingten mechanischen Belastungen zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten. Die Bewirtschaftung sollte, wie auch im Bundesbodenschutzgesetz gefordert, durch „gute fachliche Praxis“ die Bodenstruktur erhalten oder verbessern und Bodenverdichtungen so weit wie möglich vermeiden.

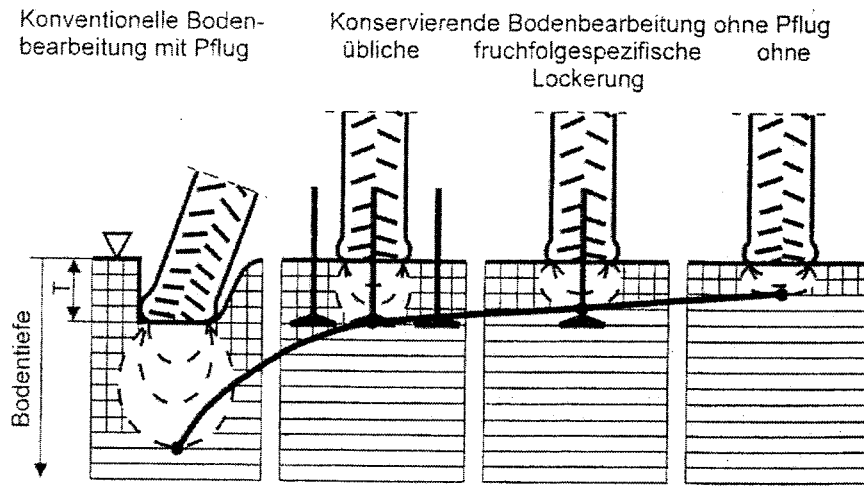


Abb. 10 Tendenz der Tiefenwirkung des Bodendrucks in Abhängigkeit von dem Bodenbearbeitungsverfahren (BRUNOTTE & SOMMER, 1998)

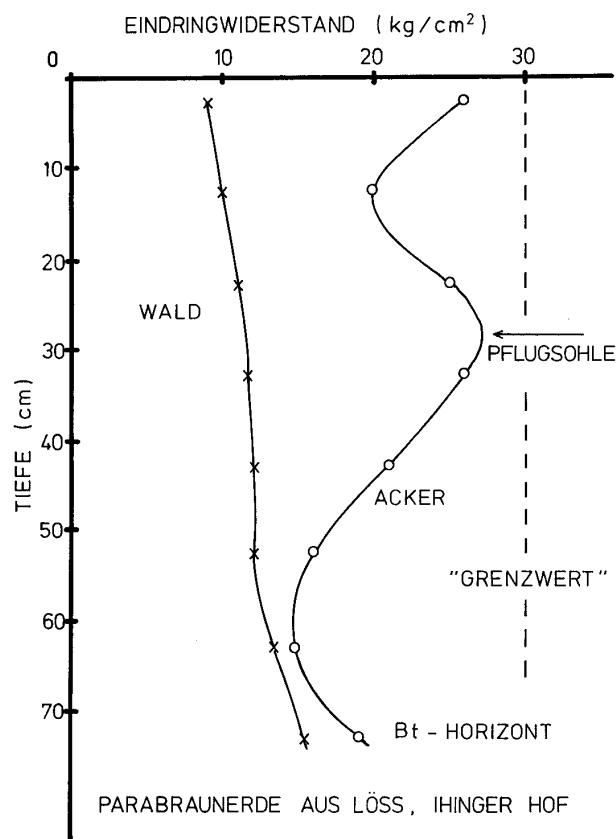


Abb. 11 Eindringwiderstand einer Parabraunerde aus Löss eines Waldstandortes im Vergleich zu einem ackerbaulich genutzten Standort (VAN DER PLOEG & SIEKER, 2000)

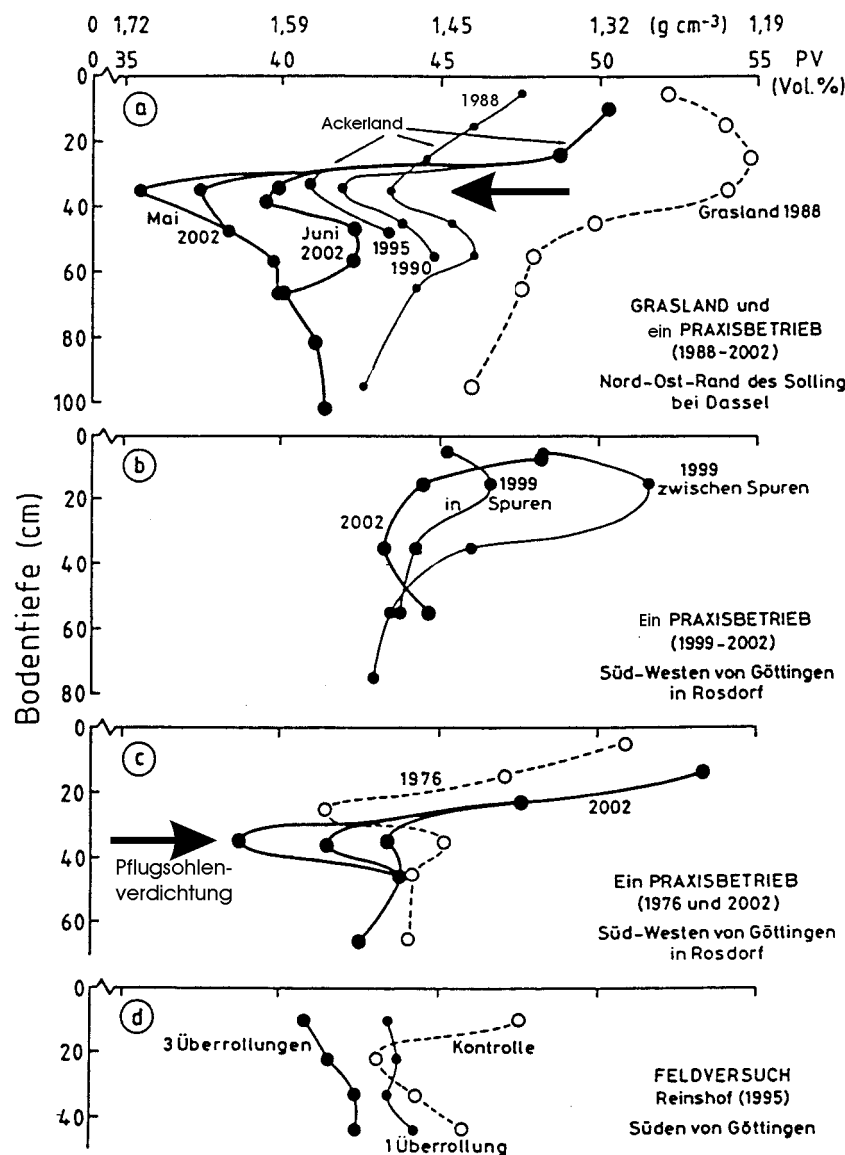


Abb. 12 Einfluss der Wirtschaftsweise und der mechanischen Belastung durch schweres Gerät auf das Porenvolumen (PV) bzw. die Lagerungsdichte (LD) von Lössböden an vier Standorten in Südniedersachsen (nach EHLERS, 2003)

Die Jahreszahlen verweisen auf das Jahr der Untersuchung. Die Teilabbildungen a bis c stellen verschiedene Erhebungsuntersuchungen in Praxisbetrieben dar. Teilabbildung d ist das Ergebnis eines Belastungsversuchs im Felde.

Besonderes Augenmerk sollte bei dem Schutz vor Bodenverdichtungen auf die Vermeidung von Unterbodenverdichtungen (Krumenbasisverdichtungen / Pflugsohlenverdichtungen; siehe Abb. 12) gelegt werden (HORN & HARTGE, 2001 und 2002; EHLERS, 2003). Beispielsweise ist in Abb. 12 der Eindringwiderstand als Funktion der Bodentiefe dargestellt. Der Ackerboden weist gegenüber weniger als 100 m entfernt liegendem Waldboden infolge von Bodenverdichtungen deutlich höhere Eindringwiderstandswerte auf, wobei besonders auffällig die Bodenverdichtungen im Bereich der Pflugsohle widerspiegelt werden. Die Abbildung zeigt darüber hinaus, dass die Bodenverdichtungen bis in größere Tiefen reichen.

Unterbodenverdichtungen können in hängigem Gelände zu einem verstärkten lateralen Wasserfluss führen. Die besondere Schutzbedürftigkeit begründet sich aber auch damit, dass die Wiederherstellung der Bodenfunktionen in verdichteten Unterböden weder durch natürliche Prozesse wie Quellen und Schrumpfen, Gefrieren und Tauen bzw. durch die Tätigkeit von Bodenorganismen noch durch eine mechanische Bodenlockerung vollständig gelingt (HÄKANSSON & REEDER, 1994).

Technische Maßnahmen zur Beseitigung von Verdichtungen im Bereich der Pflugsohle sind äußerst kosten- und energieaufwendig. Ihr Erfolg ist begrenzt, da durch den mechanischen Aufbruch dieser verdichteten Bereiche zunächst nur ein Trümmergefüge entsteht. Dieses weist zwar infiltrationsfördernde Interaggregaträume auf, doch ist die Wasserspeicherfähigkeit aufgrund der noch bestehenden inneren Verdichtungen nach wie vor stark herabgesetzt. Hinzu kommt, dass mechanisch aufgelockerte Unterböden in hohem Maße gefährdet sind, erneut verdichtet zu werden. Der Erfolg ist daher bei gleichbleibender Bewirtschaftung nur von kurzer Dauer, wobei die anschließende Wiederverdichtung oft den Zustand vor der Lockerung übertrifft (EHLERS ET AL., 1994).

Beurteilung der Wirksamkeit der folgenden Maßnahmen in Bezug auf eine Reduzierung des Hochwasserabflusses

Alle im Folgenden behandelten Maßnahmen, die zu einer Verringerung oder Vermeidung von Bodenverdichtungen führen, sind aus Sicht des Hochwasserschutzes grundsätzlich als sehr positiv einzustufen. Sie nehmen starken Einfluss auf den Oberflächenabfluss, da sie die natürlichen Eigenschaften des Bodens in Bezug auf seine Infiltrationskapazität und Wasserspeicherfähigkeit schützen. Bewirtschaftungsbedingte negative Einflüsse, die mit einer Verminderung des Porenvolumens und vor allem einer erheblichen Reduzierung des für die Versickerung entscheidenden Grob- und Makroporenanteils führen, werden minimiert (vgl. Kap. 4.7).

Wie stark sich die verschiedenen Maßnahmen auswirken, ist nicht nur von der jeweiligen Maßnahme abhängig, sondern wird auch durch die standortspezifischen Bodeneigenschaften, wie z. B. Körnung, Lagerungsdichte, Aggregierungsgrad, Wassergehalt und Gehalt an organischer Substanz bestimmt. Je ungünstiger die Konstellation der Bodeneigenschaften ausfällt, wie beispielsweise bei wenig aggregierten Böden mit einem hohen Wassergehalt, desto wichtiger sind die Maßnahmen und desto konsequenter muss auf deren Einhaltung geachtet werden. Die im Folgenden dargestellten Maßnahmen sollten nicht isoliert voneinander betrachtet werden, da sich ein wirksamer Schutz vor Bodenverdichtungen in der Regel nur aus der Kombination verschiedener Maßnahmen ergibt.

Konsequente Beachtung der Befahrbarkeit des Bodens

Die Verdichtungsneigung eines Bodens steigt mit zunehmendem Bodenwassergehalt stark an. Dieser Zusammenhang zwischen Bodenwassergehalt und Verdichtungsneigung wird in der bestehenden Literatur einheitlich beschrieben. Auch das Bundesbodenschutzgesetz fordert daher, dass es zur „guten fachlichen Praxis“ gehört, die Bodenbearbeitung grundsätzlich standortangepasst unter Berücksichtigung der Witterung durchzuführen ist. Dies bedeutet, dass das Befahren des Bodens in Abhängigkeit des von der Witterung beeinflussten Bodenwassergehaltes zu erfolgen hat (PETELKAU, 1998; DVWK, 1998).

Beurteilung der Umsetzbarkeit und heutige Verbreitung der Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis

Diese recht einfache und sehr wirkungsvolle Forderung, die Befahrbarkeit des Bodens konsequent zu beachten, wird in der Praxis nur mäßig umgesetzt. Zum einen ermöglichen die heutigen leistungsfähigen Maschinen aus gerätetechnischer Sicht ein Befahren zu fast jeder Jahreszeit und bei fast allen Bodenfeuchtezuständen. Abgeschirmt in einer klimatisierten Fahrerkabine werden die Witterungseinflüsse darüber hinaus durch den Fahrzeugführer nur noch sehr eingeschränkt wahrgenommen. Zum anderen führten Produktivitäts- und Effektivitätssteigerungen (z. B. Vergrößerung der Ackerschläge) und Abhängigkeiten (z. B. termingebundene Zuckerrübenenernte) dazu, dass die Freiräume zur Gestaltung der Fruchtfolge einschließlich der Festlegung von Bearbeitungs- und Ernteterminen stark eingeschränkt sind.

Ertragseinbußen aufgrund von Bodenverdichtungen wurden in der Vergangenheit unter anderem durch den Einsatz von Dünger kompensiert. Aus Sicht des Betriebsleiters spielte somit eine Missachtung der Bodenfeuchteverhältnisse eine untergeordnete Rolle. Heute existieren genügend fundierte Untersuchungen, die die ökologischen, aber auch ökonomischen Vorteile beim Schutz vor Bodenverdichtungen belegen. Die Betriebsleiter müssen in Zukunft noch stärker für das Problem der Bodenverdichtungen sensibilisiert werden (HORN, 1999).

Wenig Erfolg versprechend wäre eine Einführung von Grenzwerten, die das Befahren regulieren würde. Zum einen stellt die Befahrbarkeit in Abhängigkeit der Bodenfeuchteverhältnisse nur einen Aspekt im Bereich Schutz vor Bodenverdichtungen dar und zum anderen wären diese Grenzwerte nicht praktikabel. Untersuchungen der Häufigkeitsverteilungen der Bodenfeuchte in Deutschland weisen darauf hin, dass bei allen termingebundenen Feldarbeiten mit hohen Bodenwassergehalten zu rechnen ist (PETELKAU & SEIDEL, 1986; KRETSCHMER & BOHNE, 1993). Das Problem muss demnach von verschiedenen Seiten angegangen werden, da nicht vorausgesetzt werden kann, dass die Befahrbarkeit des Bodens gegeben ist. Die Begrenzung der Radlasten und Kontaktflächendrücke sollte sich daher nicht auf mittlere Bodenverhältnisse, sondern auf mäßig feuchte bis feuchte Bodenbedingungen beziehen.

Verringerung der Radlast

Mit zunehmender Schleppermasse bei gleichbleibender Zahl der Achsen nehmen die Achs- und Radlasten zu (vgl. Abb. 13). Die Verdichtung des Bodens wird mit steigender Radlast bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen verstärkt. Zudem wird der Boden in größeren Tiefen verdichtet (BOLLING, 1986; NEUKAM, 1989; STEINKAMPF & SOMMER, 1989). Eine sehr effektive Maßnahme zum Schutz vor Boden- und vor allem auch vor Unterbodenverdichtungen ist daher die Reduzierung bzw. Begrenzung der Radlast. Nach BOLLING (1984) nimmt die Schleppermasse und damit verbunden die Radlast den größten Einfluss auf die Tiefenwirkung der Bodenbeanspruchung ein. Aus diesem Grund fordern verschiedene Autoren eine Begrenzung der maximalen Achslast auf 6 t und eine Begrenzung der maximalen Radlast auf 3 t als Grenzwert für die Belastung von Ackerböden (u.a. KÖLLER, 1986; HAKANSSON ET AL., 1987; DANFORS, 1994; FENNER, 1997).

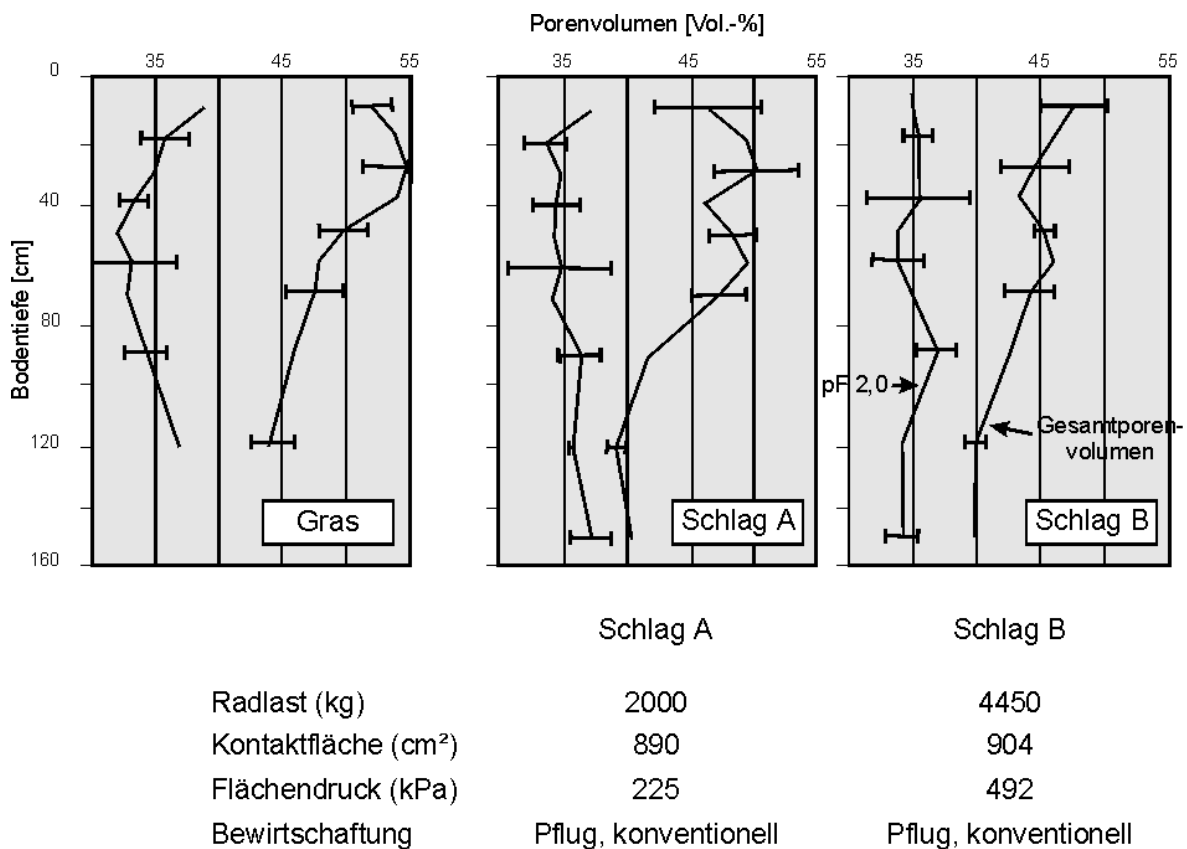


Abb. 13 Porenvolumina und Porengrößenverteilung bei unterschiedlichen Radlasten im Vergleich zu einer nichtbefahrenen Grasfläche (FENNER, 1997)

Gesamtporenvolumen (GPV), wassergefülltes Porenvolumen bei Feldkapazität (pF 2) sowie Luftkapazität (LK) als Funktion der Bodentiefe für die zwei Ackerschläge (A und B) und die Vergleichsfläche (Gras-Feldrain).

Mit der Steigerung der Leistungsfähigkeit der Schlepper ging in der Vergangenheit auch eine stetige Erhöhung der Schleppermasse einher. Die Schlepperleistung hat sich seit 1955 im Durchschnitt verdoppelt. In der gleichen Zeit nahm die Schleppermasse um etwa 30 % zu. Der Kontaktflächendruck konnte durch größere Bereifung nahezu kompensiert werden. Im Gegensatz zu den Schleppern sind die Radlasten der angehängten Transportfahrzeuge (Anhänger) und der Erntemaschinen im gleichen Zeitraum wesentlich stärker gestiegen und heute deutlich höher als die der Schlepper (SCHÖN & OLFE, 1986). Bei der Reduzierung bzw. Begrenzung der Radlast und des Kontaktflächendrucks muss folglich der gesamte Fuhrpark berücksichtigt werden, wobei besonderes Augenmerk auf die universell eingesetzten Schlepper gelegt werden muss, da diese eine weitaus höhere Belastungsfrequenz verursachen. Für die Begrenzung der Radlast, also der Begrenzung der auf das Einzelrad wirkenden absoluten Gewichtskraft (Maßeinheit kN; 1 kN ≈ 1 t), stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung (siehe Tab. 13).

Beurteilung der Aussagesicherheit der Maßnahme zur Reduzierung von Oberflächenabfluss

Alle Maßnahmen, die zu einer Reduzierung der Radlasten führen, verringern bzw. vermeiden Bodenverdichtungen und sind somit grundsätzlich als positiv zu bewerten. Zudem bedeutet die Reduzierung der Radlasten eine Verminderung des Risikos von Unterbodenverdichtungen, da diese vor allem auf zu hohe Radlasten zurückzuführen sind. Die Aussagen hierzu werden in der Literatur einheitlich getätigt.

Beurteilung der Umsetzbarkeit und heutige Verbreitung der Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis

Untersuchungen in Bayern ergaben, dass im Durchschnitt Radlasten von mehr als 3 t auf mindestens einem Drittel der Feldfläche bei allen relevanten Fruchtarten zu verzeichnen sind. Bei dem Anbau von Winterweizen, -gerste und -raps betragen die untersuchten Radlasten sogar mehr als 4 t. Extreme Bodenbelastungen durch überhöhte Radlasten entstehen vor allem bei der Zuckerrüben-ernte. Durch den Einsatz der in den letzten Jahren üblichen sechsreihigen, selbstfahrenden Köpfbrecher werden auf 70 % der Fläche Radlasten von mehr als 5 t bei häufig zu feuchten Bodenverhältnissen aufgebracht (ZAPF, 1997). Die Untersuchungen zeigen, dass die Begrenzung der Radlasten nur sehr unzureichend bis gar nicht berücksichtigt wird.

Die meisten hier vorgestellten Maßnahmen sind an eine Neuanschaffung von Geräten gekoppelt und somit sehr kapitalintensiv. Stehen Neuanschaffungen an, so wird heute vielfach noch der Schwerpunkt auf besonders leistungsstarke Gerätschaften gelegt, die die Schlagkraft erhöhen, zu Ungunsten von bodenschonenden Varianten. Technisch bestünden ausreichend viele Möglichkeiten, die Radlasten zu minimieren.

Maßnahmen, die nicht an eine Neuanschaffung gebunden sind, wie die Anpassung der Zuladung in Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen, werden trotz einfacher Realisierbarkeit viel zu unzureichend umgesetzt. Dies betrifft sowohl Zuladungen bei Transport- und Erntefahrzeugen als auch bei Düngestreuern und Feldspritzen. Eine konsequente Trennung von Feld- und Straßentransport wäre hierfür die Voraussetzung. Am Feldrand müsste der Umschlag der Massengüter erfolgen, so dass die Zuladung in Abhängigkeit von den aktuellen Bodenverhältnissen erfolgen kann. Ein zeitlicher Mehraufwand müsste in Kauf genommen werden (PETELKAU, 1989).

Verminderung des Kontaktflächendrucks

Unter Kontaktflächendruck wird die je Aufstandsfläche wirkende Gewichtskraft (Maßeinheit kPa; $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$) verstanden. Nach KOOLEN & KUIPERS (1983) beträgt der mittlere Kontaktflächendruck in etwa das 1,2- bis 1,3-fache des Reifeninnendrucks. Nach Herstellerangaben betragen die vorgeschriebenen Reifeninnendrucke der meisten landwirtschaftlichen Fahrwerke in der Standardausführung bei den Triebrädern der Schlepper 100 bis 150 kPa, bei Erntemaschinen um 200 kPa und bei Transportmitteln sogar 200 bis > 300 kPa. Bodenschonende Reifen (Breitreifen) erlauben die lastabhängige Innendrucksenkung auf < 80 kPa. Die Reifeninnendrucke der Low Ground Pressure Vehicle (LGPV) liegen sogar nur bei < 50 Pa (PETELKAU, 1998).

Die Richtwerte für zulässige Kontaktflächendrücke variieren in Abhängigkeit von der Bodenart und vor allem von der Bodenfeuchte (ERMICH & HOFMANN, 1984; PETELKAU, 1984; BONDAREV

ET AL., 1987). Allgemein werden für Feldarbeiten im Frühjahr bei feuchten Bodenverhältnissen unabhängig von sonstigen Standortbedingungen Drücke von < 80 kPa gefordert (PETELKAU, 1986; HOFMANN & RÄBIGER, 1987; VERMEULEN ET AL., 1988; MEDVEDEV & CYBULKO, 1996). Nach PETELKAU (1998) sind bei Sommer- und Herbstarbeiten je nach Bodenwassergehalt Kontaktflächendrücke zwischen 100 kPa auf mischkörnigen Sandböden und 200 kPa auf bindigen, sommertrockenen Böden nach verschiedenen Literaturangaben zulässig.

Alle Maßnahmen zur Verminderung der Gerätemasse reduzieren bei gleicher Aufstandsfläche sowohl die Radlast als auch den Kontaktflächendruck. Dies kann auch durch eine Erhöhung der Zahl der Achsen bei gleicher Bereifung erreicht werden. Darüber hinaus kann der Kontaktflächendruck durch eine Vergrößerung der Kontaktfläche reduziert werden (Beispiele für konkrete Maßnahmen siehe Tab. 13).

Wirksamkeit und Aussagesicherheit der Maßnahme zur Reduzierung von Oberflächenabfluss

Maßnahmen zur Verringerung des Kontaktflächendrucks helfen wirksam Bodenverdichtungen zu minimieren. Die Aussagen in der Literatur sind hierzu eindeutig. Die in der Literatur beschriebenen Richtwerte für Kontaktflächendrücke sollten auf feuchte Böden bezogen werden, da die Praxis zeigt, dass viele Arbeiten auf zu feuchten Böden ausgeführt werden (ZAPF, 1997).

Beurteilung der Umsetzbarkeit und heutiger Verbreitung der Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis

In vielen Fällen führt immer noch eine fehlende Sensibilität in Bezug auf die Auswirkungen von Bodenverdichtungen dazu, dass einfache, nahezu kostenneutrale und dennoch sehr wirkungsvolle Anpassungen bzw. Kontrollen der Reifeninnendrücke nach wie vor nur unzureichend durchgeführt werden. Die Verwendung der relativ kostengünstigen Doppelbereifung bzw. Gitterräder ist auch noch nicht weit genug verbreitet. Breitreifen bilden heute trotz ihrer sehr positiven Eigenschaften in Bezug auf die Verminderung der Druckbelastung noch eher die Seltenheit. Sie sind in der Anschaffung teuer und ihr Einsatz ist nur für Feldarbeiten sinnvoll. Bei Straßenfahrten sind sie wegen des hohen Rollwiderstands und ihres Verschleißverhaltens unwirtschaftlich. Gerade bei kleinen und mittleren Betrieben, in denen die Schlepper als universelle Zugkräfte eingesetzt werden, würde ihre Nutzung ökonomische und technisch-organisatorische Probleme mit sich bringen (PETELKAU, 1998).

Extrem hohe Kontaktflächendrücke treten bei fast allen üblichen Erntefahrzeugen auf. Da sie 30 bis 70 % der Fläche betreffen, ist ihre Verringerung unbedingt erforderlich. Zudem sind Erntearbeiten häufig termingebunden und erfolgen deshalb oft nicht unter Berücksichtigung der Bodenfeuchteverhältnisse. Eine deutliche Verminderung der Kontaktflächendrücke ist in erster Linie durch eine starke Verringerung der Maschinenmasse zu erreichen. Die Zuladungskapazität sollte stark begrenzt werden. Eine Trennung von Feld- und Straßentransport mit angepasster Bereifung und einem Materialumschlag am Feldrand wäre anzustreben, so wie es bei der Zuckerrübenerte schon häufiger praktiziert wird.

Reduzierung der Überrollhäufigkeit

Unter Überrollhäufigkeit wird die Summe der Radpassagen, von denen im Verlauf des Produktionsprozesses definierte Bodenausschnitte (Spuren, Spurbereiche) betroffen werden, verstanden (Maßeinheit: $n = \text{Anzahl}$). Wiederholtes Befahren führt zu einer Zunahme der Bodenverdichtung. DOMSCH (1995) stellte in praxisnahen Versuchen fest, dass selbst nach sehr großen Überrollhäufigkeiten ($n = 160$) qualitative Veränderungen des Bodengefüges anhand der Parameter Pneumatische Leitfähigkeit und Penetrometerwiderstand deutlich nachweisbar waren, auch wenn Änderungen in der Lagerungsdichte nicht mehr erfasst werden konnten. Das besondere Problem in der Überrollhäufigkeit liegt in der Zunahme der Unterbodenverdichtung. Diese nimmt weiter zu, wenn die substratspezifische maximale Packungsdichte der raddruckbetroffenen Bodenschichten erreicht wird und dabei die Elastizität des Bodens verloren geht. Die Drücke der Fahrzeuge werden dann in tiefere Bereiche weitergegeben bis sich hier eine starke, kompakte Verdichtung ausgebildet hat, die die Auflast abfangen kann (PETELKAU, 1998).

Die Überrollhäufigkeiten müssen demnach begrenzt werden. Sie können verringert werden durch eine Verbreiterung der Arbeitsbreiten und durch eine stärkere Gerätekombination. Problematisch in diesem Zusammenhang ist, dass bei der Zunahme der Arbeitsbreiten sowie bei der Gerätekombination die Zugkraftanforderungen steigen, was in der Regel eine Leistungssteigerung der Maschinen verbunden mit einer Zunahme der Gerätemasse mit sich bringt. Abb. 14 zeigt, dass der vor allem für die Unterbodenverdichtung wichtige Belastungswert $t \cdot \text{km} \cdot \text{ha}^{-1}$ bei Verminderung der Fahrstrecke auf Kosten der Zunahme der Radlasten und damit der Kontaktflächendrücke trotz der Reduzierung der Überrollhäufigkeiten steigt. Als bessere Alternative erscheint daher die Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren (vgl. Kap. 5.1), die eine Verringerung der Arbeitsgänge mit sich bringen. Darüber hinaus kann eine relative Verminderung der Überrollhäufigkeiten an einer Stelle erreicht werden, indem die Überfahrungen auf der Fläche gleichmäßig verteilt werden.

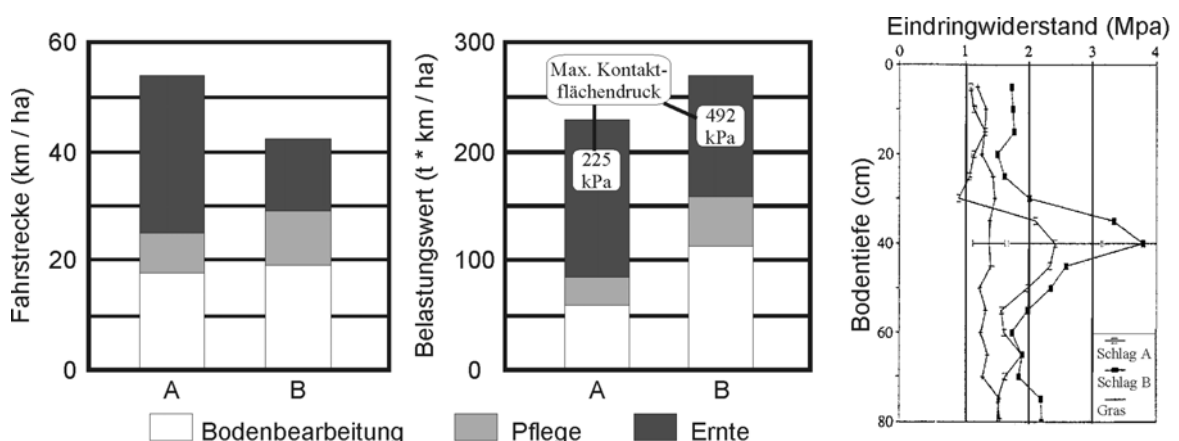


Abb. 14 Beispiel für eine Reduzierung der Überrollhäufigkeit auf Kosten der Bodenbelastung und damit auf Kosten der Unterbodenverdichtung (FENNER, 1997)

Summe der Fahrstrecken pro Fläche (links) und Summe der Belastungswerte pro Fläche (Mitte) während der Bodenbearbeitung, Pflege und Ernte beim Anbau von Silomais (A) bzw. Zuckerrübe (B); rechts: Eindringwiderstände der Ackerschläge A und B sowie im Vergleich zu einem unbefahrenen Feldrain unter Gras; Messung im April mit Bodenwassergehalt nahe Feldkapazität.

Eine gleichmäßige Verteilung der Überrollhäufigkeiten steht aber im Widerspruch zu der in der Praxis üblichen und verfahrenstechnisch vorteilhaften Regelung der Benutzung von Fahrgassen (Regelspuren). Werden Fahrgassen eingerichtet, so müssen höhere Anforderungen an deren Verwendung gestellt werden. Hierfür wäre beispielsweise eine verschärfte Begrenzung der Radlasten bzw. der Kontaktflächendrücke denkbar (PETELKAU & DANOWSKI, 1990; BARKUSKY, 1991). Alle Arbeitsgänge, die nicht an Fahrgassen gebunden sind, sollten außerhalb der Fahrgassen durchgeführt werden, um die Verdichtungswirkung gleichmäßiger auf der Fläche zu verteilen (PETELKAU ET AL., 1988).

Widersprüchlich in diesem Zusammenhang werden die Vor- und Nachteile der Konzentration von Verdichtungen auf festgelegte Spurflächen (Fahrgassen) diskutiert, wie sie beim controlled traffic system praktiziert werden. Hierbei wird eine starke Verdichtung im Bereich der Fahrgassen zu Gunsten der verbleibenden Fläche in Kauf genommen. Der Vorteil ergibt sich in erster Linie aus Sicht der Pflanzenproduktion. Es können große, leistungsfähige Maschinen, die über eine hohe Schlagkraft verfügen, eingesetzt werden. Die Bodendegradierung findet nicht im Wurzelbereich der Nutzpflanzen statt und wird auf einen definierten, auf Grund der größeren Arbeitsbreite kleineren Bereich begrenzt.

Maßnahmen zur Konzentration von Verdichtungen auf festgelegte Spurflächen bewirken für sich genommen keine deutliche Reduzierung des Oberflächenabflusses, da ein nicht unerheblicher Bereich besonders starken und bis in den Unterboden wirkenden Verdichtungen ausgesetzt wird. Innerhalb der Fahrgassen vermindert sich die Infiltrationskapazität stark und die Fahrspuren wirken zudem als Leitbahnen für den entstandenen Oberflächenabfluss. Nach Untersuchungen von FLEIGE ET AL. (1999) betrug beispielsweise der Oberflächenabfluss in Fahrspuren 43-51 % des Gesamtabflusses, obwohl ihr Flächenanteil nur bei 5 % lag und der Abfluss auf dem Feld nur etwa 1 % ausmachte. Hinzu kommt, dass die besonders bodenbelastend wirkenden Erntefahrzeuge auch außerhalb der Fahrspuren fahren müssen.

Werden hingegen befestigte Spur- und Schienenbahnen installiert, auf denen spezielle Gerätschaften bewegt werden können, wie es bei den sogenannten Gantry-Systemen in Großbritannien und in den USA vereinzelt praktiziert wird, so sieht die Bilanz aus Sicht des Boden- und Hochwasserschutzes anders aus, da die Bewirtschaftung spurfrei erfolgt (PETELKAU, 1998) und Bodenverdichtungen bei der Bewirtschaftung nicht entstehen.

Begrenzung von dynamischen Effekten

Unter der Vermeidung bzw. Begrenzung dynamischer Effekte versteht man vor allem die Verringerung positiver Schlupfbeträge (prozentuale Abweichung der Laufstrecke angetriebener Räder von der zurückgelegten Fahrstrecke). Schlupfbedingte Schädigungen der Bodenstruktur durch Aggregatzerstörung und Verschmierungen der Makroporen (WERNER ET AL., 1993) zeigen sich an makro- und mikromorphologischen Gefügeänderungen und starkem Rückgang der vertikalen gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (KÜHNER ET AL., 1994). Maßnahmen, die zu einer Begrenzung von dynamischen Effekten führen, können Tab. 13 entnommen werden.

Die in Tab. 13 aufgeführten Möglichkeiten zur Begrenzung dynamischer Effekte werden nur unzureichend in der Praxis umgesetzt. Gründe hierfür sind wahrscheinlich in einer noch nicht ver-

breiteten Sensibilität für die Auswirkungen von Bodenverdichtungen zu sehen. Ihre technische Realisierbarkeit wäre in der Regel ohne größere Probleme gegeben.

Teilziele							Hauptziele	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit		
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit			Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
-	-	-	A 3	-	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	C 6	C 8 C 1 C 1 C 1	C 1 C 3	ALTEMÜLLER, 1991	Mit der ackerbaulichen Nutzung, verstärkt durch den hohen Grad der Mechanisierung, sind tiefgreifende Gefügeveränderungen verbunden. Es werden Auswirkungen der Bodenverdichtung und Bodenverschlämung auf den morphologischen Bau dargestellt. Der Raddruck von Zugmaschinen und sonstigen schweren Fahrzeugen ist die Hauptursache von den in dieser Arbeit beschriebenen Verdichtungen. → Reduzierung des Raddrucks bzw. Reduzierung der Maschinengewichte insgesamt kann hieraus geschlussfolgert werden.
-	-	-	-	-	C 3	C 3	-	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 1 C 1 C 1	C 1 C 3	BECHER & MARTIN, 1987	Um die Auswirkung des Einsatzes schwerer landwirtschaftlicher Maschinen auf das Bodengefüge festzustellen, wurden bodenphysikalische Eigenschaften von drei Bodentypen unter Acker und Dauergrünland verglichen. Lagerundichte, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Aggregatstabilität wurden bis zu Bodentiefen von mindestens 50 cm durch den Einsatz schwerer Maschinen negativ beeinflusst. Dieser Einsatz hat außerdem eine mehr oder weniger dichte Pflugsohle in etwa 20 cm Tiefe entstehen lassen, die aufgrund der häufig fehlenden weiten Grobporen und der niedrigen gesättigten Wasserleitfähigkeit eine geringe Porenkontinuität aufweist. Dadurch dürfte sie nicht nur die Infiltration von Oberflächenwasser, sondern auch die Durchlüftung des Unterbodens und das Tiefenwachstum der Wurzeln behindern. Die Aggregatdichten wurden nur in einigen Fällen signifikant erhöht. Hieraus kann gefolgert werden, dass die festgestellte Bodenverdichtung unter Ackernutzung u. a. auf einer dichteren Anordnung kleiner Aggregate im Vergleich zu Dauergrünland beruht. → Um die Infiltrationseigenschaften zu erhalten folgt aus den Aussagen des Aufsatzes, dass Bodenverdichtungen stark verringert werden müssen, etwa durch die Verminderung der Radlast bzw. die Beachtung der Befahrbarkeit.
-	-	-	C 2	-	A 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 1 C 1 C 0	C 1 C 3	BRUNOTTE ET AL., 2000	In dem Artikel werden konkrete Hinweise zur Weiterentwicklung technischer Möglichkeiten, Anpassungen an Arbeitsverfahren sowie Begrenzungen der mechanischen Belastung gegeben. (siehe hierzu auch die Anmerkungen von EHLERS 2001)

Teilziele										Hauptziel		Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern Verschlammungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Ober- flächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermei- den	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis				
C 3	B 3	C 3	C 3	A 3	C 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	BRUNOTTE, 1999	Durch Ernte- und Transportarbeiten wird der Acker zunehmend mit hohen Maschinengewichten befahren, die die Gefahr von Schadverdichtungen insbesondere bei hoher Bodenfeuchte mit sich bringen. Als effektivste Vorsorgemaßnahme hat sich hier die schonende Lockerung bewährt, die dem Boden eine höher Tragfähigkeit verschafft und die negativen Auswirkungen hoher Maschinengewichte abwendend hilft.		
-	-	-	A 3	-	A 3	C 3	C 3	A 3	A 3	C 3	C 3	C 8 C 11	C 13	EHLERS ET AL., 2003	Am Beispiel von Lössstandorten aus Südniedersachsen wird gezeigt, dass die Verdichtung des Unterbodens unmittelbar an der Krumbasis in den vergangenen dreißig Jahren deutlich verstärkt und bis in eine Tiefe von 40 bis 45 cm vorgetrieben wurde. Mancherorts hat der Verdichtungszustand an der Krumbasis die "Proctordichte" erreicht, teilweise auch überschritten. Auf einigen Standorten reicht der Verdichtungsprozess durch modernes landtechnisches Gerät bis in 80 cm Bodentiefe. Die nachteiligen Wirkungen mechanischer Verdichtung auf Boden, Feldwirtschaft und Umwelt werden beschrieben. Um dem Risiko einer über die Jahre weiter voranschleichenden Verdichtung der Ackerböden zu begegnen, muss im Rahmen der Ausgestaltung guter fachlicher Praxis eine Selbstbeschränkung zum Beispiel durch eine Begrenzung der Lasten in Erwägung gezogen werden, insbesondere unter nassen Erntebedingungen.	
-	-	-	C 3	-	A 3	C 3	A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	C 9 *a	C 14	FLEIGE ET AL., 1999	Auf landwirtschaftlichen Nutzflächen mit frühdekkenden Kulturen wurde der Einfluss von Fahrspuren auf die Bodenerosion durch Wasser sowie auf den Oberflächenabfluss untersucht. Der Flächenanteil der Fahrspuren lag bei rund 5 % der Gesamtackerfläche. Der Oberflächenabfluss in den Fahrspuren betrug 43-51 %, während er im Feld nur bei 1 % des Gesamtniederschlags lag. Der Vergleich unterschiedlicher Reifen- und Fahrwerkstypen zeigte, dass mit dem Einsatz von Breitreifen (radial) und Terrareifen die Infiltration in den Fahrspuren verbessert werden konnte, sofern nicht die Tiefenversickerung aufgrund der unter diesen Reifen zu erwartenden tieferen Druckfortpflanzung (=Unterbodenverdichtung) reduziert wird. *a: In Bezug auf die Verwendung von Breitreifen.	
-	-	-	-	-	A 3	-	-	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 10	C 13	HORN & HARTGE, 2001	Die Autoren weisen darauf hin, dass das Problem der Verdichtung nicht in der Definition des Begriffes Schadverdichtung oder dessen Abgrenzung liegt, sondern in der Erkenntnis, dass mit wachsendem Gerätegewicht die Wasserversorgung der Kultur immer nachhaltiger und immer tiefer in den Boden hinein und damit auch nicht wieder veränderbar beeinflusst wird. → Ziel muss es daher sein, die Maschinengewichte (einschließlich der Zuladung) zu begrenzen.	

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit		
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit			Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
-	-	-	-	-	A 3	C 3	-	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	HORN, 1999	Anhand einer Literaturrecherche wurden die durch Unterbodenverdichtung hervorgerufenen Ertragsseinbußen einschließlich der ökonomischen Verluste in der Landwirtschaft dargestellt. Anhand dieser Beispiele konnte gezeigt werden, dass im ersten Jahr nach einer die Eigenstabilität des Bodens überschreitenden Belastung mit Achslasten zwischen 5 und 18 Tonnen, Ertragsseinbußen von bis zu 55 % und über lange Jahre folgend von 6 bis 15 % auftraten. Dadurch wird auch der ökonomische Schaden für einzelne Früchte-/Ernteverfahren quantifizierbar. Einige Hinweise auf Ursachen und Empfehlungen für die Bodenbewirtschaftung wurden gegeben.
-	-	-	-	-	A 3 *a	A 3 *a	C 2* a	C 2 *a	C 2 *a	C 2 *a	C 4* b	C 8 C 11 *c	C 14 *c	KRETSCHMER ET AL., 1994	Insgesamt zeigt sich, dass durch eine mechanische Bodenbelastung eine signifikante Abnahme der Wasserdurchlässigkeit im Bereich bis 30 cm Tiefe sehr erheblich, in größeren Tiefen jedoch nur undeutlich erfolgt. Dabei wird die Bodenheterogenität auf engstem Raum, d. h. innerhalb der Fahrspur, verkleinert. Da zwischen den Fahrspuren unverdichtete Bereiche erhalten bleiben, dürften sich, falls immer die gleichen Fahrspuren benutzt werden, die bodenhydrologischen Eigenschaften einer größeren Fläche nicht in gleichem Maße ändern wie die des unmittelbar verdichteten Bodenvolumens. Nach den hier vorliegenden Ergebnissen kann die Anlage von Leitspuren zur Einschränkung der Flächenverdichtung empfohlen werden. Hydraulische, mechanische u. a. Kennwerte wie Luftdurchlässigkeit, erbrachten keine eindeutigen Belege für zunehmende Unterbodengefügeschädigungen bei > 5 Überfahrten. → Bei den untersuchten Böden könnte die max. Verdichtung schon nach 5 Überfahrten erreicht sein, so das keine Veränderungen mehr festzustellen wären und auch eine Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit in Tiefen > 30 cm nicht mehr möglich waren. *a: Indirekt werden Verdichtungen auf Flächen zwischen den Fahrspuren vermieden, wenn dafür Fahrgassen max. beansprucht werden. *b: Die Aussage ist in sich zwar in der Tendenz vorhanden, doch verglichen mit Maßnahmen zur Reduzierung von Bodenverdichtungen unzulänglich. *c: je nach Feldfrucht und Bearbeitungsgang

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit		
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit			Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
-	-	-	A 3	-	A 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	SEMME & HORN, 1994	<p>Die am intensivsten belastete Versuchsvariante (Fahrgasse) weist im gesamten Profil die höchste Festigkeit auf. Gleichzeitig besteht nur bei dieser maximalen Belastungsintensität eine Tendenz zur Verringerung der gesättigten Wasserleitfähigkeit Kf, der Luftpermeabilität kl und der Luftkapazität zu sehr kleinen Werten.</p> <p>Belastungsintensität, mechanische Stabilität und Druckfortpflanzung beeinflussen sich gegenseitig. In den durch wiederholte Befahrungen und / oder Bodenaustrocknung stärker stabilisierten Oberbodenhorizonten werden Druckbelastungen daher stärker gepuffert. Trotzdem können an wenig stabile Unterbodenhorizonte zumindest gleichbleibende Belastungen weitergegeben werden, wenn elastische Verformungen möglich sind. Daher kann aus der Tragfähigkeit des Oberbodens alleine nicht auf die Belastbarkeit des Unterbodens geschlossen werden.</p> <p>Bei starker Belastung feuchter Böden werden Porenwasserüberdrücke gemessen, die die effektive Spannung (Stabilität) vermindern und damit zu erhöhter Verformbarkeit des Bodens führen. → Beachtung der Bodenfeuchteverhältnisse bei der Bewirtschaftung / Verminderung der Druckbelastung</p>
-	-	-	A 3	-	A 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	SOMMER & HARTGE, 1991	<p>In dem Beitrag wird der Problembereich Bodenverdichtung und Befahrbarkeit aufgearbeitet. Ausgehend von den Einflussfaktoren werden die Auswirkungen von Bodenverdichtungen angesprochen, Lösungen aufgezeigt und drei Ansätze im Sinne eines vorsorgenden Bodenschutzes entwickelt.</p> <p>Der Ansatz, die Bodeneigenschaften durch Additiva zu ändern, erscheint für die in der landwirtschaftlichen Nutzung befindlichen Flächen nicht aussichtsreich.</p> <p>Die Nutzung vorhandener technischer Möglichkeiten bietet kurzfristige Teillösungen.</p> <p>Der dritte Ansatz, die Änderung von Arbeitsverfahren, zeigt neben bekannten und nur begrenzt wirksamen Möglichkeiten auch solche, die infolge reduzierter Bodenlockerung die Befahrbarkeit von Böden verbessern lassen (Konservierende Bodenbearbeitung, Änderung der Lockerungsformen). Weitere grundsätzliche und nachhaltige Abhilfen sind von neuen Wegen zu erwarten, z. B. von der Trennung von Kulturfläche und Fahrfläche und vom Verzicht auf Straßengängigkeit landwirtschaftlicher Geräte.</p>

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit			
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss			Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
-	-	-	A 3	-	A 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	SOMMER ET AL., 1994	<p>Neben den Auswirkungen auf Boden, Fauna und Flora sind die Kosten für die "Beseitigung" von Schadverdichtungen durch die Grundbodenbearbeitung nicht unerheblich und in die Gesamtanalyse einzubeziehen. Lösungen für das Problem Bodenverdichtung sind deshalb ausschließlich in einem vorsorgenden Konzept zu suchen.</p> <p>Zur Vorbeugung von Schadverdichtungen infolge des Befahrens von landwirtschaftlich genutzten Flächen sind die im Text genannten Lösungsansätze zu einem Gesamtkonzept zusammenzuführen. Die Verbesserung der Befahrbarkeit des Bodens plus die Anpassung der Arbeitsverfahren plus die Nutzung technischer Möglichkeiten geben den einzig richtigen Lösungsweg vor.</p> <p>Ein Problem liegt heute darin, dass es an technischen Möglichkeiten fehlt, dem Landwirt während des Befahrens seines Ackers anzuzeigen, ob die kritische Beanspruchung des Bodens in einer bodentypspezifischen Tiefe überschritten wird.</p>
-	-	-	-	-	A 2	C 2	C 2	C 2	C 2	C 2	C 4 *a	C 8 C 11	C 13	WERNER & PAUL, 1999	<p>Die Beratung von Landwirtschaftsbetrieben zur guten fachlichen Praxis der Bodennutzung in Bezug auf die Vermeidung / Verminderung von Bodenverdichtungen erfordert methodische Lösungen zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung. Es werden zwei bestehende Ansätze diskutiert.</p> <p>1. Der Druckbelastungsquotient setzt feld- und bodenspezifisch die Druckbelastbarkeit der Ackerböden eines Betriebes bei hohem Bodenwassergehalt zur Belastung durch die betriebliche Technik in Beziehung. Dabei wird die kritische Belastungsgrenze nicht durch den Wert der Vorbelastung, sondern durch Gefügeparameter an der Grenze mindesterforderlicher Funktionsfähigkeit fixiert. Der Indikatorwert des Ansatzes wird durch langjährige bodenphysikalische Messprogramme auf Bodendauerbeobachtungsflächen überprüft.</p> <p>2. Der zweite Ansatz basiert auf der Interpretation digitaler Feldkarten mit Bodeninventar und Gewinnengrenzen hinsichtlich des Kontrastes im frühjährlichen Abtrocknungsverhalten der Inventarbestandteile. Bei der Neugliederung von Gewinnstrukturen im Rahmen von Flurneuordnungsverfahren kann diese Information zum Abbau von Gefährdungspotential durch Reduzierung der feldinternen Bodenheterogenität genutzt werden.</p> <p>Nach Sommer (1999) muss die Praxisrelevanz des ersten Ansatzes wegen der darin enthaltenen vereinfachenden Annahmen als gering eingestuft werden.</p>

Teilziele							Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit		
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit			Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis
-	-	-	-	-	A 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 9 C 11	C 13	STEINKAMPF ET AL., 1994	Die größte Gefahr für den Unterboden geht bei den im Versuch angewandten Verfahren und eingesetzten Schleppern und Maschinen vom Furchenrad beim Pflügen aus. Hier ist am ehesten eine Umorientierung auf Verfahren der Feldbewirtschaftung anzustreben, bei denen keine oder keine hohen Radlasten auf der Furchensohle abgestützt werden oder pfluglos gearbeitet wird.
-	-	-	-	-	C 3	C 3	-	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 10	C 13	WERNER & WERNER, 2001	Es wurde die Verdichtung und die Regeneration des Gefüges eines schluffigen Tonbodens anhand von bodenphysikalischen, computertomographischen und rasterelektronenmikroskopischen Verfahren untersucht. Hierbei wurden die Wirkung gestaffelter Druckbelastungen bei Feldkapazität beschrieben. Mit zunehmender Belastung erfolgte eine fortschreitende Homogenisierung des Bodengefüges. Es reichte von der Kompression luftführender Makroporen bzw. Reduzierung der Aggregatzwischenräume bei geringer Belastung bis zur Auflösung des Aggregatverbandes in eine kohärente Bodenmasse bei hoher Belastung. Hierbei wurden wendende Bodenbearbeitungssysteme mit zwei unterschiedlichen Bearbeitungstiefen verglichen. Es zeigte sich, dass die flachere Variante etwas höhere Verformungswiderstände aufwies. → Reduzierung der Druckbelastung als Voraussetzung der Erhaltung der Aggregatstruktur und damit der Porosität.
-	-	-	A 3	-	A 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	WERNER, 1994	Der Einfluss hoher und reduzierter Druckbelastung in Verbindung mit tiefer und flacher Bodenbearbeitung auf Morphologie und Funktion des Bodengefüges einer Löß-Schwarzerde mit hohem Tongehalt wurde geprüft. 14fache Überrollung des Bodens in zwei Versuchsjahren mit 3,5 t Radlast und 300 kPa Reifendruck führte zu intensiv knetender Verformung bis 40 cm Bodentiefe mit Restmakroporositäten von 2 - 5 Vol. % und Kf(sat)-Werten < 10 cm/d. 1,8 t Radlast und 80 kPa Reifendruck ergaben dagegen bei gleicher Überrollhäufigkeit Makroporositäten von 10 - 12 % bei nur oberflächennaher Knetwirkung. Röntgenmorphologisch konnten belastungs- und bodentiefeabhängig zwei Intensitätsstufen der Verformung nachgewiesen werden: Kompaktierung durch Verringerung der Aggregatzwischenräume ohne Wandel der Gefügestruktur und Homogenisierung durch Zerknetung. Es werden Konsequenzen für Druckbelastbarkeitsgrenzwerte diskutiert.

Tab. 12 Literatur-Auswertungs-Tabelle: Bodenverdichtungen verringern bzw. vermeiden (Legende siehe Tab. 2)

Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlung

Bodenverdichtungen durch indirekte und direkte Maßnahmen minimieren

indirekte Maßnahmen:

- Bodenstabilisierung durch Verzicht auf die Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug
- Belastbarkeit des Bodens z. B. durch Kalkung und Humuszufuhr erhöhen

direkte Maßnahmen:

Begrenzung der Radlast

- Vermeidung von Unterbodenverdichtungen durch grundsätzliche Begrenzung der Radlasten von Schleppern, Erntemaschinen und Transportmittel auf maximal 3 t (einschließlich Zuladung)
- Begrenzung der Radlast bei Neuanschaffungen von Fahrzeugen und Geräten nach der Faustformel: So leicht wie möglich und nur so schwer wie nötig.
- Einsatz von „low ground pressure-Fahrzeugen“ prüfen
- Zurückgreifen auf ggf. bereits vorhandene leichtere Fahrzeuge
- Bevorzugung von aufgesattelten Geräten gegenüber in der Dreipunkthydraulik aufgehängten Geräten
- Radlast von Transportfahrzeugen vermindern durch z. B. Erhöhung der Zahl der Achsen
- bei Transport- oder Erntefahrzeugen Zuladungen an gegebene Bodenverhältnisse anpassen

Verminderung des Kontaktflächendrucks

- Verwendung moderner, bodenschonender Reifen
- Spurverbreiterung durch Verwendung von Doppelbereifung bzw. Gitterrädern oder durch Verwendung von Breitreifen (z. B. Terrareifen)
- Anpassung bzw. Kontrolle des Reifeninnendrucks
- bei Schleppern und Transportfahrzeugen auf eine gleichmäßige Achslastverteilung achten

Reduzierung der Überrollhäufigkeit

- Verbreiterung der Arbeitsbreiten (ohne Zunahme der Radlasten und Kontaktflächendrücke)
- stärkere Gerätekombination (ohne Zunahme der Radlasten und Kontaktflächendrücke)
- Verringerung der Arbeitsgänge durch z. B. Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung
- gleichmäßige Verteilung der Überfahrten auf die Fläche oder
 - Konzentration der Überfahrten in Fahrgassen zu Gunsten der verbleibenden Fläche – controlled traffic system
 - Gantry-Systeme (befestigte Spur- und Schienenbahnen, auf denen spezielle

Gerätschaften bewegt werden)

Begrenzung von dynamischen Effekten

- Ausnutzung des Allradantriebs
- Anpassung des Reifeninnendrucks
- Ausnutzung bestehender technischer Möglichkeiten
- Anhalten, Parken und Anfahren sowie Zurücksetzen soweit wie möglich vermeiden
- Reduzierung der Belastungsdauer durch höhere Fahrgeschwindigkeit
- Beladungsvorgänge auf dem Feld vermeiden
- Lenkbewegungen und enge Wendungen wenn möglich vermeiden
- Kurven nur mit verminderter Geschwindigkeit fahren
- bei kritischen Bodenverhältnissen Reduzierung der Zugkraftanforderung und Verringerung der Fahrzeugmasse von beladenen, angehängten Fahrzeugen; in hängigem Gelände reduziert eine ausschließlich hangabwärts gerichtete Befahrung die Zugkraftanforderungen.
- „Keile“ bei nichtparallelen Feldrändern nicht jedes Jahr an der gleichen Stelle anlegen

Maßnahmen darüber hinaus

- Vermeidung von Pflugsohlenbildung durch z. B. Onland-Pflügen
- Trennung zwischen Straßen- und Feldtransport, damit Bereifung und Reifeninnendrucke an die jeweiligen Verhältnisse optimal angepasst werden können
- Materialumschlag grundsätzlich nicht auf dem Feld
- Beachtung der Bodenfeuchteverhältnisse
- Erstellung einer betriebsspezifischen Entscheidungsmatrix zur Auswahl der Gerätschaften und Maßnahmen in Abhängigkeit der standörtlichen Gegebenheiten zur Sicherstellung von Mindestanforderungen

Tab. 13 Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlungen – Bodenverdichtungen durch indirekte und direkte Maßnahmen minimieren

5.3 Wahl der Kultur und Gestaltung der Fruchtfolge

Wahl der Hauptkultur		
Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	<i>X X X</i>	<i>Einfluss ist stark</i>
Aussagesicherheit	<i>X X X</i>	<i>Aussage ist eindeutig</i>
Umsetzbarkeit	<i>X / X X</i>	<i>realisierbar / Einschränkung nach Marktsituation</i>
heutige Verbreitung der Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis	<i>X</i>	<i>kaum praktiziert bzw. nur auf Einzelflächen</i>

Tab. 14 Gesamtbewertung der Maßnahmen zur Wahl der Kultur

Die Wahl der Kultur und die Gestaltung der Fruchtfolge einschließlich des Anbaus von Zwischenfrüchten und der Gründung bzw. der Anlage von Wiesenstreifen nehmen Einfluss auf das Abflussverhalten und damit auf den Hochwasserabfluss. Der Einfluss gründet zum einen auf den kulturspezifischen Bodenbedeckungsgrad im Jahresverlauf und den damit verbundenen Einfluss auf die Bodenerosion und das Verschlammungsverhalten. Zum anderen sind an die unterschiedlichen Kulturen verschiedene Bodenbearbeitungs- und Ernteverfahren gebunden, die wiederum verschiedene Bodenbelastungen mit sich bringen und damit unterschiedlich Einfluss auf das Infiltrationsverhalten ausüben.

Die Infiltrationsleistung eines Ackerstandortes wird zudem maßgeblich durch die Vorfrucht mitbestimmt. Beregnungsversuche (DBU, 2002) ergaben bei unterschiedlichen Vorfrüchten und sonst gleichen Bedingungen starke Unterschiede im Infiltrationsverhalten. Während beispielsweise bei Winterweizen nach Vorfrucht Winterraps das gesamte Niederschlagswasser in den Boden infiltrierte, gelangten im Winterweizenbestand nach Vorfrucht Zuckerrüben nur ca. 56 % des applizierten Niederschlagswassers zur Infiltration. Der Grund für die deutlich höhere Infiltrationsleistung wird von den Autoren zum einen durch die Vielzahl an in der Unterkrume vorhandenen vertikalen Rapswurzelröhren gesehen, die einen „By-pass“-Fluss ermöglichten. Zum anderen konnte eine um etwa 10 % höhere Aggregatstabilität nach der Vorfrucht Winterraps im Vergleich zur Vorfrucht Zuckerrüben gemessen werden. Diese Beobachtung wird von SEKERA (1951) bestätigt. Nach SEKERA (1951) wirkt sich die Vorfrucht auf den Anteil wasserstabiler Aggregate aus, der in der Reihenfolge Hackfrüchte, Getreide, Klee, Raps, Gräser und Klee gras zunimmt. Die höhere Aggregatstabilität beeinflusst dabei direkt die Oberflächenverschlammung und damit das Infiltrationsgeschehen.

Die Reduzierung des Anteils besonders erosionsfördernder Kulturen in der Fruchtfolge gehört zu einer der wichtigsten Maßnahmen im Bodenerosionsschutz. Über die Prozesskette Bodenerosion, Oberflächenverschlammung und Infiltrationsverminderung ist diese Maßnahme auch für den Hochwasserschutz von Bedeutung. Als besonders erosionsfördernde Kulturen werden in der Regel die Sommerhackfrüchte inklusive dem Mais verstanden, die eine späte und langsame Bodenbedeckung aufweisen. Der Boden ist über einen längeren Zeitraum den Niederschlägen schutzlos ausgeliefert. Darüber hinaus nehmen die für diese Kulturen spezifischen Bodenbearbeitungs- und Ernteverfahren erheblichen Einfluss auf die Bodenstruktur und damit auf das Erosionsausmaß. Als besonders erosionsfördernd muss der konventionelle Mais- und Zuckerrübenanbau angesehen werden. Diese Kulturen weisen eine kurze Bodenbedeckung während der Vegetationszeit auf und es treten zudem bei der Ernte oftmals Strukturschäden auf (SCHMIDT ET AL., 1996). Konkrete Handlungsempfehlungen für die Praxis können der Tab. 17 entnommen werden.

Die Gestaltung der Fruchtfolge wird vorwiegend von marktwirtschaftlichen Zwängen bestimmt. Der Spielraum der Betriebsleiter ist, wenn es um die Reduzierung des Anteils einer Kulturart geht, sehr begrenzt. Die Realisierbarkeit für eine Einschränkung des Anbaus besonders erosionsfördernder Kulturen muss daher als gering eingestuft werden (FRIELINGHAUS, 1998). Gut realisierbar wäre eine Verminderung der Bodenerosion durch konservierende Bodenbearbeitungsverfahren, die insbesondere bei den besonders erosionsfördernden Kulturen zum Einsatz kommen müssten (vgl. Kap. 5.1).

Die Effektivität einer Verminderung der Bodenerosion allein durch Reduzierung des Anteils an besonders erosionsfördernden Kulturen muss beim heutigen Stand der Technik aus Sicht des Boden- und Hochwasserschutzes als ungenügend angesehen werden, wenn nicht begleitend Maßnahmen der konservierenden Bodenbearbeitung ergriffen werden.

Die Gestaltung der Fruchtfolge hat auch wesentlichen Einfluss auf die Lebensbedingungen der Bodenorganismen. Beispielsweise kann durch Wechsel von Halm- und Blattfrüchten der Aufbau monospezifischer Populationen der Bodenflora und -fauna entgegengewirkt werden, was zu einer Verringerung der Diversität führen würde (FRIEBE, 1994) und sich damit positiv auf die durch das Bodenleben beeinflussten bodenphysikalischen Bedingungen auswirkt.

Zwischenfruchtanbau und Gründung

Anbau von Zwischenfrüchten		
Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	<i>X X X</i>	<i>Einfluss ist stark</i>
Aussagesicherheit	<i>X X X</i>	<i>Aussage ist eindeutig</i>
Umsetzbarkeit	<i>X X X</i>	<i>gut realisierbar</i>
heutige Verbreitung der Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis	<i>XX / XXX</i>	<i>Regional verschieden: teilweise praktiziert bis weit verbreitet</i>

Tab. 15 Gesamtbewertung der Maßnahmen zum Anbau von Zwischenfrüchten

Der Zwischenfruchtanbau von Futter- oder Gründüngungspflanzen sowie von Fruchtarten, die über den Winter abfrieren wirkt sich durch einen Schutz der Infiltrationskapazität hochwassermindernd aus. Der Hochwasserschutz wird über die Prozesskette Erhöhung der Bodenbedeckung, Reduzierung der Bodenerosion und Oberflächenverschlammung und damit verbundene Beibehaltung der Infiltrationskapazität erreicht. Die Bodenbedeckung wird hierbei vor allem im Spätsommer, Herbst und Winterhalbjahr erhöht und die negativ wirkenden Brachezeiten werden verringert. Die Schutzwirkung geht dabei sowohl von den lebenden Pflanzen aus, als auch von den im Winter abgefrorenen Pflanzenresten, die dann eine Mulchdecke bilden. Die Zwischenfrucht bzw. Mulchdecke verbleibt im Idealfall bis zum Aufwuchs der nächsten Kultur auf dem Feld und schützt dabei die Bodenoberfläche vor allem vor der Splashwirkung der Niederschläge und bremst gleichzeitig den Oberflächenabfluss.

Darüber hinaus wirkt sich der Zwischenfruchtanbau fördernd auf die biologische Aktivität aus. Zum einen wird durch den Zwischenfruchtanbau die Nahrungsgrundlage des Edaphons verbessert und zum anderen werden Witterungseinflüsse abgemildert (Starkregen, Sonneneinstrahlung). Es kann sich ein ausgeglicheneres Kleinklima ausbilden (relativ hohe Luftfeuchte und niedrige Temperaturamplituden), das sich förderlich auf die Bodenfauna auswirkt. Die Bodenfauna führt wiederum zu einer Stabilisierung der Bodenstruktur und trägt damit zu einer Verbesserung der Infiltrationsbedingungen bei (FRIEBE, 1994).

Die technische Realisierbarkeit ist gegeben. Die Bereitschaft zur Umsetzung wird von FRIELINGHAUS (1998) insgesamt als gering eingestuft, auch wenn hier und da schon der Zwischenfruchtanbau praktiziert wird. Die Gründe werden von FRIELINGHAUS (1998) in der Zunahme von Arbeitsgängen sowie in vermuteten Mehrkosten gesehen. Insgesamt ist aber der Anbau von Zwi-

schenfrüchten einschließlich der Gründüngung regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. So gibt es auch Regionen, in denen der Zwischenfruchtanbau weit verbreitet ist.

Da der Anbau von Zwischenfrüchten die Voraussetzung für die Mulchsaat der Folgefrucht darstellt, sollte dieser verstärkt praktiziert werden. Nach Untersuchungen von BRUNOTTE ET AL. (1995B) hat der Zwischenfruchtanbau nicht nur positive Effekte auf den Bodenerosionsschutz. Es können mit ihm auch Mehrerträge erzielt werden, so dass sich der Arbeitseinsatz bezahlt macht. Bei der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung nach einer Zwischenfrucht besteht der Nutzen gegenüber dem konventionellen Verfahren im Gründüngungseffekt der Zwischenfrucht, in einem niedrigeren Umbruchrisiko, in einer verbesserten Erhaltung des Bodenwertes und in niedrigeren Kosten bei der Arbeitserledigung.

Teilziele										Hauptziel	Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern Verschlammungen vermeiden / verhindern Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Ober- flächenabfluss verzögern Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis					
A 3	A 3	A 3	A 3	C 2	-	-	A 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 9	C 13	BEYER, 1991	<p>In Böden unter Wald, konventioneller und "biologischer" Ackernutzung wurden die Gefügemorphologie, die mikrobielle Aktivität, die Aggregatstabilität und der Bodenwiderstand untersucht. Es konnten deutliche Effekte ackerbaulicher Maßnahmen ermittelt werden. Aggregatstabilität und Bodenwiderstand korrelierten nur wenig mit der Verschlammungsneigung der Böden. Geringe Aggregatstabilität aufgrund grober Bodentextur kann in ihrer Wirkung auf Verschlammung durch Bewirtschaftung mit ständiger Bodenbedeckung und intensiver Durchwurzelung gemildert werden.</p> <p>In den konventionell bewirtschafteten Ackerböden kommt es aufgrund mangelnder Bodenbedeckung zur Zerschlagung von Aggregaten durch Niederschläge bzw. Luftsprennung und der Boden verschlämmt. Eine kombinierte Mineral- und Strohdüngung reichte bei den Versuchen nicht aus, um das Bodenleben soweit zu fördern, dass es zu einer Lebendverbauung kam, die der Verschlammung entgegenwirkt hätte. Die Auflockerung der Fruchtfolge durch Leguminosenanbau bewirkt dagegen sofort die Bildung von Krümeln.</p> <p>In der biologisch-organisch bewirtschafteten Acker-Parabraunerde kommt es trotz geringeren Bodenwiderstandes und Aggregatstabilität zur Lebendverbauung durch Regenwürmer und Ausbildung von Wurmlosungsgefüge. Dieses bleibt durch die kontinuierliche Begleitvegetations- oder Mulchdecke erhalten. Die mikrobielle Aktivität ist entsprechend hoch. In dem biologisch bewirtschafteten Acker-Podsol bleibt die Krümelung bei gleichzeitiger Bodenbedeckung trotz größerer Textur erhalten. Die höhere mikrobielle Aktivität, auch noch in 30 cm Tiefe, steht damit im Einklang.</p>

Teilziele										Hauptziel	Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis		
C 3	C 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 3	A 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 9 C 12	C 13 bi si 4	BRUNOTTE ET AL., 1995B	Der Zwischenfruchtanbau bewirkt bei Zuckerrüben und bei den Folgefrüchten Winterweizen sowie Wintergerste Mehrerträge im Vergleich zu konventioneller Bearbeitung und zum Strohmulchverfahren. Bei der Mulchsaat mit Saatbettbereitung auf Basis Strohrückstände besteht der Nutzen gegenüber dem konventionellen Verfahren in einem niedrigeren Umbruchrisiko, in einer verbesserten Erhaltung des Bodenwertes und in niedrigeren Kosten bei der Arbeitserledigung. Die Mulchsaat mit Saatbettbereitung auf Basis Zwischenfrucht deckt durch Gründüngungseffekt den Mehraufwand des Zwischenfruchtanbaus ab. Umbruchrisiko und Bodenwerterhaltung sind vergleichbar mit der Strohmulchvariante. Bei der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung auf Basis Zwischenfrucht addieren sich Gründüngungseffekt, geringeres Umbruchrisiko und Erhaltung des Bodenwertes zu dem höchsten Nutzen auf. Die Kosten der Arbeitserledigung für den Zwischenfruchtanbau sind gegenüber der Mulchsaat mit Saatbettbereitung niedriger, da der Mulchgang zu Zuckerrüben im Frühjahr eingespart wird. Ist der Anbau von Zwischenfrüchten aufgrund ungünstiger Rahmenbedingungen bzw. fehlender Niederschläge nicht möglich, bietet der Erosionsschutz in Form von Strohmulch eine praktikable Alternative und sollte in jedem Fall dem konventionellen Anbau vorgezogen werden. Dies bedingt eine Veränderung in der Fruchtfolge: Es wird von Wintergerste auf Winterweizen bzw. Winterroggen übergegangen, um einen verzögerten Strohabbau zu erreichen. Behält man konventionelle Bodenbearbeitung zu Reihenfrüchten in erosionsgefährdeten Lagen bei, kann dies jedoch langfristig zu einer Änderung der Nutzungsverhältnisse in Richtung ständige Bodenbedeckung führen. Das hat in der Regel Auswirkungen auf den Deckungsbetrag.
-	-	-	C 3	-	-	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 5	C 8 C 10	C 13	EHRMANN, 1996	Regenwürmer haben einen wesentlichen Einfluss auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Böden. Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung kann die Zusammensetzung und die Aktivität der Regenwurmfauna beeinflussen. Hauptziel der Arbeit ist es, den Einfluss von Nutzungsänderungen auf die Regenwurmfauna und ihre Leistungen zu erfassen. Bei Brache und extensivem Feldfutterbau erfolgte eine allmähliche Zunahme der Regenwurmmzahl. Die Unterschiede zu einer Fortführung der bisherigen Ackerbewirtschaftung waren erst nach zwei Jahren deutlich. Daher können von einer kurzfristigen Brache (Rotationsbrache) kaum positive Auswirkungen auf Regenwurmpopulationen erwartet werden. Beim Vergleich der verschiedenen mehrjährigen Brachen erwies sich die Variante ohne Ansaat und Mulchen als die günstigste für Regenwürmer.

Teilziele										Hauptziel		Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis			
C 3	C 3	C 2	A 3	C 2	C 2	C 2	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 10	C 13	FRANKEN & LOH, 1987	In drei verschiedenen Feldversuchen wurde der Einfluss ackerbaulicher Maßnahmen (Stroh-/Gründüngung, Bodenbearbeitung) auf die Dynamik der Aggregatstabilität untersucht. Unter Getreide (Hafer, Winterweizen) ist die Aggregatstabilität starken jahreszeitlichen Veränderungen unterworfen; die niedrigsten Stabilitätswerte werden jeweils zum Erntezeitpunkt festgestellt. Die Einflüsse des Standortes und der Kulturpflanzen selbst sind dabei offensichtlich größer als die der durchgeführten Maßnahmen. Demgegenüber ist der Einfluss der Stroh-/Gründüngung und der Bodenbearbeitung auf das Niveau der Aggregatstabilität jedoch sehr stark ausgeprägt.	
C3	C3	A 3	A 3	C3	A 3	A 3	A 3	A 3	C3	C3	C6	C9 C 12	C 13	FRIEBE, 1994	Gestaltung der Fruchtfolge: durch Wechsel von Halm- und Blattfrüchten kann der Aufbau monospezifischer Populationen der Bodenflora und -fauna, was zu einer Verringerung der Diversität führen würde, verhindert werden. Bei längerer Nichtbestellung ist die Bodenoberfläche entweder durch eine Zwischenfrucht oder durch eine Bodenbedeckung durch Pflanzenreste abzudecken, um Witterungseinflüsse abzumildern (Starkregen, Sonneneinstrahlung). Es kann sich ein ausgeglicheneres Kleinklima ausbilden (relativ hohe Luftfeuchte und niedrige Temperaturamplituden), das förderlich für die Bodenfauna ist. → Stabilisierung der Bodenstruktur und Verbesserung der Infiltrationsbedingungen.	
C 3	C 3	C 2	A 3	C 2	C 2	C 2	C 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 10	C 13	HÖVELMANN & FRANKEN, 1993	Die Dynamik der Aggregatstabilität unter Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste ist gekennzeichnet durch einen klassischen Verlauf mit Sommermaxima und Winterminima. Die Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität und die mit einem Kleegrasanbau verbundene einjährige Bodenruhe erhöhen die Stabilität oberflächennaher Bodenaggregate unter Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste zum Teil signifikant.	

Teilziele										Hauptziel		Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern Verschlammungen vermeiden / verhindern Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Ober- flächenabfluss verzögern Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis						
C 3	A 3	-	A 3	C 3	-	C 2	A 3	A 3	C 3	A 3	A 6	C 9 C 11 *a	C 15 *a	KÄMPF, 1982	<p>Durch eine Zunahme der viehlosen Landwirtschaft und der monokulturellen Anbauform, vor allem von Mais, werden die organische Substanz und die biologische Tätigkeit sowie in der Folge die gesamten physikochemischen Eigenschaften des Bodens so verändert, dass dadurch die Aggregatstabilität des Bodens zurückgeht, Krusten entstehen und die Infiltrationsleistung reduziert wird.</p> <p>Maßnahme: Vermeidung von Monokulturen</p> <p>Der Zusammenhang zwischen Fruchtfolge (hier Monokultur Mais) und biologischer Aktivität und damit der Aggregatstabilität wird qualitativ dargestellt. Der Zusammenhang wird als eindeutig angesehen.</p> <p>*a: Die Realisierbarkeit, auf Monokulturen wie z. B. beim Maisanbau zu verzichten, ist zwar technisch gegeben, doch schränkt die wirtschaftliche Abhängigkeit einiger Betriebe von der Masentierhaltung die Gestaltung der Fruchtfolge ein.</p>	
B 3	B 3	-	B 3	B 3	-	C 3	B 3	B 3	B 3	B 3	B 6 *a	- *a	- *a	KLAGHOFER, 1985	<p>Die Landwirtschaft kann durch geeignete Bearbeitungsmaßnahmen und entsprechende Fruchtfolgen (konkretere Aussagen zu den Maßnahmen wurden im Text nicht gemacht) auf die Höhe und den Verlauf des durch Starkniederschläge hervorgerufenen Oberflächenabflusses dadurch einwirken, dass sie ein wasserstabiles, gut regenaufnehmendes Bodengefüge erzeugt.</p> <p>Berechnungsversuche auf verschiedenen Nutzungsvarianten belegten, dass unbewachsene, geeignete Böden die stärkste Verschlammungsneigung zeigten.</p> <p>Der Autor entwickelt seine sehr allgemein gehaltenen Aussagen anhand von Literatursäussagen und Berechnungsversuchen. Maximaler Oberflächenabfluss konnte nachgewiesen werden auf Böden mit hohen Anfangswassergehalten und stark verschlammter Bodenoberfläche.</p> <p>*a: Die vom Autor abgeleiteten Aussagen sind zu allgemein, als dass sie bewertet werden könnten, jedoch sind die vom Autor aus der Literatur abgeleiteten Aussagen nicht falsch und als solche eindeutig.</p>	
A 3	A 3	A 3	C 2	A 2	-	C 3	A 3	A 3	C 3	C 3	C 6	C 9 C 11	C 13	MOLLEN- HAUER & ORTMEIER, 1994	<p>Die Ergebnisse der im Rahmen eines FuE Vorhabens durchgeführten Bodenabtragsmessungen bestätigen für die angetroffenen Bedingungen auf den FuE-Betrieben, dass der Bodenbedeckungsgrad den größten Einfluss auf den Bodenabtrag durch Wasser hatte. Bei Bedeckungsgraden < 30 % stieg der relative Abtrag mit abnehmender Bodenbedeckung überproportional an, bei Werten > 30 % hingegen ging der Abtrag gegen Null.</p>	

Teilziele									Hauptziel	Gesamtbewertung				LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis		
C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	A 8	C 13	SCHMIDT ET AL., 1998	<p>Durch den abgestimmten Einsatz von flacharbeitenden Stoppelbearbeitungsgeräten, nichtselektiven Herbiziden, einem Direktsaatgerät, das durch geringe Bodenbewegung kaum die Unkrautkeimung anregt, sowie eine gezielte Unkrautbekämpfung im Nachauflauf gelingt eine wirtschaftliche, pfluglose Bestellung im Fruchtfolgeverlauf. Grundlage hierfür ist auch eine überlegte Fruchtfolgegestaltung, die durch den Wechsel von Winter und Sommerfrüchten Zeit lässt bzw. Möglichkeiten schafft für die zielgerichtete Unkrautbekämpfung vor und in der Folgefrucht. → infiltrationsfördernde Direktsaatverfahren werden durch eine angepasste Gestaltung der Fruchtfolge wirtschaftlich beherrschbar.</p> <p>Da die Maßnahme über die Direktsaat ihre Wirksamkeit erfährt, enthält die Bewertung nur Schlussfolgerungen und keine direkten Aussagen durch die Autoren. Die Realisierbarkeit für den Wechsel von Winter- und Sommerfrüchten hängt von den wirtschaftlichen Zwängen des Betriebs ab und kann nur als allg. realisierbar eingestuft werden. Die Realisierbarkeit der Maßnahme Direktsaat (siehe Unterkapitel konservierende Bodenbearbeitung) wird durch die guten Erfahrungen der Unkrautbekämpfung bei Pflugverzicht verbessert.</p>
C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	C 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	C 6	C 9	C 13	SCHMIDT ET AL., 1999	<p>Erosionsbedingte Bodenverluste und damit einhergehende Stoffeinträge in Oberflächengewässer können durch Anpassung der Bewirtschaftung (einschließlich der Gestaltung der Fruchtfolge) und Maßnahmen der Flurgestaltung erheblich minimiert oder sogar gänzlich vermieden werden.</p> <p>Die effektive Planung und Bemessung derartiger Maßnahmen setzt voraus, dass die erosiven Stofftransporte in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung möglichst genau beschrieben und die vorgesehenen Maßnahmen in ihrer Einzelwirkung, aber auch in ihren Wechselwirkungen und Synergieeffekten geprüft und aufeinander abgestimmt werden können. Die Anwendung eines solchen Modells wird anhand eines Beispiels aus der Praxis dargestellt.</p> <p>Wo der gegenwärtige „Stand der Technik“ keine Gewähr bietet, die Böden und ihre Funktionen langfristig zu sichern und benachbarte Biotope vor übermäßigen Stoffeinträgen zu schützen, sind Einschränkungen der Bodennutzung (z. B. durch begrünte Tiefenlinien) unumgänglich.</p>

Teilziele										Hauptziel		Gesamtbewertung			LITERATUR	Aussagen des zitierten Autors mit zum Teil Folgerungen / Bewertungen des Autors der vorliegenden Arbeit
Splashwirkung vermeiden / verhindern	Verschlämmungen vermeiden / verhindern	Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	Bodengefüge stabilisieren	Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern	Bodenverdichtungen vermeiden	Makroporen erhalten / -bildung fördern	Bodenerosion vermeiden / verringern	Infiltration erhöhen	Retentionsvermögen erhöhen	Wirksamkeit zur Reduzierung von Oberflächenabfluss	Aussagesicherheit	Umsetzbarkeit	heutige Verbreitung der Maßnahme in der Praxis			
A 3	A 3	A 3	A 3	C 3	-	A 3	A 3	A 3	C 3	A 3	C 6	C 9 C 11	C 13	SCHRÖDER, 1994	Zusammenfassend ergibt die Modellanwendung unter Einbeziehung von Abflussmessungen auf Erosionsmessparzellen für die Abflussbildung in landwirtschaftlichen Einzugsgebieten folgendes Bild: Für verschlämmungsanfällige Böden tritt Oberflächenabfluss bereits bei moderaten Niederschlagsereignissen auf. Der Oberflächenabfluss entsteht infolge einer im Bearbeitungszyklus variablen Verschlämmung des Bodens. Dabei besteht ein hoher Nutzungsbezug, da die Vegetation den Boden vor dem direkten Regentropfenaufschlag und der daraus resultierenden Verschlämmung schützt. Dies führt bei unterschiedlicher Nutzung zu einer kleinräumig hohen Variabilität. Oberflächenabfluss entsteht auf verschlämmungsanfälligen Feldern mit geringer Bedeckung. → Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen	
														SIEGERT, 1978	Bei Niederschlägen geringerer Intensität und Dauer ist der Einfluss der Vegetation in seiner Wirkung auf den Oberflächenabfluss weit aus größer als bei Niederschlägen mit hoher Intensität. Physikalische Bodeneigenschaften werden dann zur dominierenden Größe, da sie den Oberflächenabfluss steuern.	
-	-	-	-	-	A 3	-	A 3	C 3	C 3	C 3	C 6	C 8 C 11	C 13	TERBRÜGGE ET AL., 1998	Mit dem Vorerntesaatverfahren (VES) wird die Möglichkeit eröffnet, Winterraps und Zwischenfrüchte bereits in den abreifenden Getreidebestand zu bestellen, um vor allem in Spätdruschgebieten durch die vorgezogene Ausbringung den Anbau dieser Kulturen zu optimieren oder dort in die Fruchtfolge integrieren zu können. Das Verfahren, bei dem das Saatgut auf den unbearbeiteten Boden fällt, stützt sich auf die Ergebnisse 18-jähriger Bodenbearbeitungsversuche am Institut für Landtechnik der Justus-Liebig-Universität Gießen, insbesondere auf Untersuchungen bezüglich der Direktsaat von Winterraps. Es ließen sich durch die kontinuierliche Bodenbedeckung, ähnlich dem System der Direktsaat, Oberflächenabfluss und Bodenabtrag mit einhergehendem Austrag von Agrochemikalien erheblich reduzieren. Ebenso ist mit dem Verzicht auf eine Bodenbearbeitung eine Vermeidung von Bodenbelastungen (v. a. Bodenverdichtungen) durch Eingrenzung auf die vorhandenen Fahrgassen im Getreidebestand verbunden.	

Tab. 16 Literatur-Auswertungs-Tabelle: Wahl der Kultur und Gestaltung der Fruchtfolge (Legende siehe Tab. 2)

Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlung**Wahl der Kultur und Gestaltung der Fruchtfolge**

- Verbesserung der ganzjährigen Bodenbedeckung durch entsprechende Gestaltung der Fruchtfolge einschließlich dem Anbau von Zwischenfrüchten und der Gründung bzw. der Anlage von Wiesenstreifen
- Verringerung des Anteils von Kulturen mit besonders bodenbelastenden Bodenbearbeitungs- und Ernteverfahren an der Fruchtfolge
- Verminderung des Anteils besonders erosionsfördernder Kulturen (Sommerhackfrüchte inklusive Mais) an der Fruchtfolge bzw.
 - Anbau nur auf wenig geneigten Flächen bzw. nur mit konservierender Bodenbearbeitung
 - Begrenzung möglichst auf nur einem Drittel der Fruchtfolge
 - auf besonders stark erosionsgefährdeten Standorten möglichst nicht anbauen bzw. mittels konservierender Bodenbearbeitung und in eine Fruchtfolge integrieren, die eine mehrjährige Kunstwiese einschließt.

Tab. 17 Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlungen – Wahl der Kultur und Gestaltung der Fruchtfolge

6. Literaturanalyse - Dränagen und Hochwasserschutz

Unter Dränagen sollen in diesem Zusammenhang die technischen Maßnahmen zur Entwässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen verstanden werden. Dränung beinhaltet nach DIN 1185 die „Regelung des Bodenwasserhaushaltes mit den Verfahren der Rohrdränung, der rohrlosen Dränung und der Unterbodenmelioration“. Dränagen sind demnach künstliche Bauwerke zur Beeinflussung der Bodenwasserverhältnisse. Während früher die künstliche Dränung ausschließlich mittels offener Gräben erfolgte, werden heute vorwiegend unterirdische Rohrdräne verwendet. Dränagen werden in erster Linie mit dem Ziel angelegt, eine verbesserte Durchlüftung des Bodens zu erreichen. Werden Böden mit hohen Grundwasserständen gedränt und dabei entwässert, so vergrößert sich der durchlüftete und damit durchwurzelbare Bodenraum. Als weitere Gründe werden eine erhöhte Befahrbarkeit, eine verbesserte Bearbeitbarkeit und eine schnellere Erwärmung der Böden aufgeführt. Die Abschätzung der Dränbedürftigkeit, sowie die Bemessung des Dränumfangs erfolgt nach bestehenden Regelwerken und Dränanleitungen (LUTHIN, 1966; EGGELSMANN, 1981a; DIN, 1185).

Genauere Angaben über den Anteil der gedränten Flächen an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche existieren nicht. VAN DER PLOEG & SIEKER (2000) gehen aber davon aus, dass ein Großteil, wenn nicht die Gesamtheit der meliorationsbedürftigen Fläche der (alten) Bundesrepublik Deutschland entwässert bzw. gedränt wurde. Betrachtet man die Bemühungen für das Meliorationswesen zu DDR-Zeiten, so kann man davon ausgehen, dass dies auch für die neuen Bundesländer gilt. Die meliorationsbedürftige Fläche wird von EGGELSMANN (1970, 1971, 1981a) für die alten Bundesländer auf 4,4 Mio. ha und für die neuen Bundesländer auf 2,4 Mio. ha geschätzt. Damit wären rund 1/3 der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche der Bundesrepublik gedränt bzw. entwässert.

Dränagen greifen in den Gebietswasserhaushalt ein. Inwieweit sie zu einer Verschärfung oder einer Verminderung des Hochwassergeschehens beitragen ist in der Literatur sehr widersprüchlich beschrieben worden (z. B. PRENK, 1963; SCHUCH, 1979; KAO, 1980; EGGELSMANN, 1981a; ISTOK & KLING, 1982; SIEKER & HARMS, 1983 UND 1986; COLLINS, 1984; SCHUCK & JORDAN, 1984; ERNSTBERGER & SOKOLLEK, 1984; MEURER, 1985; ROBINSON ET AL., 1985; KONYHA ET AL., 1992; HERRMANN & ÜBERSCHÄR, 1993; SCHUH ET AL., 1993; BRONSTERT ET AL., 1995; BORK ET AL., 1998; VAN DER PLOEG & SIEKER, 2000; LENNARTZ, 2002 und WISKOW & VAN DER PLOEG, 2003).

In Bezug auf die hochwassermindernde bzw. -fördernde Wirkung werden in der Literatur vereinfacht zusammengefasst zwei gegenteilige Auffassungen vertreten. Die eine besagt, dass Dränagen sich hochwasserreduzierend auswirken, da durch sie der Bodenwasserspeicher entleert wird und somit bei einem darauffolgenden Niederschlagsereignis erheblich mehr Bodenwasserspeicherpotential zur Verfügung steht. Die andere hält entgegen, dass während eines stärkeren Niederschlagsereignisses das in den Boden infiltrierte Wasser durch die Dränagen so schnell dem Vorfluter zugeführt wird, dass es das Hochwassergeschehen zusätzlich verstärkt. Da die Wirkungsmechanismen in Abhängigkeit der Standortbedingungen sehr unterschiedlich ausfallen, kann die Frage letzten Endes nicht allgemeingültig, sondern nur bezogen auf bestimmte Standortverhältnisse beantwortet

werden. Hierbei müssen zum einen die aus der Dränierung resultierenden Landnutzungsänderungen betrachtet werden und zum anderen die direkt durch die Dränierung resultierenden Veränderungen im Abflussverhalten. Bei den durch die Dränierung resultierenden Änderungen im Gebietsabfluss macht eine weitere Differenzierung in unterschiedliche Substrat- und Grundwasserverhältnisse Sinn.

Einfluss von durch Dränierungen ermöglichte Landnutzungsänderungen auf den Hochwasserabfluss

Die Umwandlung von Grünland in Ackerland ist in der Regel verbunden mit einer Erhöhung der Erosionsanfälligkeit, einer Zunahme an Oberflächenabfluss und einem gesteigerten Gebietsabfluss. Diese Nutzungsänderungen wurden in den meisten Fällen erst durch die Dränierung der Böden möglich. Nach Angaben des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELF, 1966-1991; zitiert aus VAN DER PLOEG & SIEKER, 2000) verringerte sich die Wiesenfläche in der Bundesrepublik Deutschland allein in der Periode 1965 bis 1990 um nahezu 1,5 Mio. ha, also 8,3 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche. Dränierungen haben damit indirekt zu einem beschleunigten Abfluss auf einem nicht unbedeutenden Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche beigetragen.

Hinzu kommt, dass vielfach Grünlandstandorte im Überschwemmungsbereich von Fließgewässern in Ackerland umgewandelt wurden (FROWEIN, 1996). Diese neu geschaffenen Ackerflächen wurden später zum Teil eingedeicht, wodurch wichtige Retentionsräume letzten Endes durch die Dränung verloren gingen. Eine Wiederherstellung der Retentionsfunktion wäre aus Sicht des Hochwasserschutzes in der Regel sehr wünschenswert. Dies zu realisieren wäre nur mit Hilfe entsprechender Förderprogramme möglich, da es sich hierbei häufig um Flächen handelt, die unter viel Mühen vorheriger Generationen der Natur „abgerungen“ wurden und heute die Basis für die nun intensiv wirtschaftenden landwirtschaftlichen Betriebe bilden.

Substrat- und grundwasserspezifische Betrachtung der Effekte von Dränung auf den Hochwasserabfluss

Dränierte Moorböden

Natürliche, unbeeinflusste Moorböden weisen hohe Grundwasserstände auf. Sie besitzen ein vermindertes Retentionsvermögen, da sie bei hohen Grundwasserständen kein oder nur wenig Niederschlagswasser aufnehmen können und bei entsprechenden Reliefverhältnissen zu Oberflächenabfluss neigen. PRENG (1963) zieht daher die Schlussfolgerung, dass sich eine Dränierung der Moorböden hochwassermindernd auswirken muss.

Diese Schlussfolgerung wird allerdings den spezifischen Standortverhältnissen der Moorböden nicht gerecht, da Moorböden grundsätzlich einen verminderten Gebietsabfluss besitzen. Die Evapotranspiration bei Mooren ist viel höher, als bei klimatisch vergleichbaren land- und forstwirtschaftlich genutzten Mineralböden (EGGELSMANN, 1990). Die erhöhte Evapotranspiration bewirkt wie in Abb. 15 dargestellt eine starke Oszillation des Grundwasserstandes. Abb. 15 zeigt, dass gerade in den niederschlagsreicheren Sommermonaten der Grundwasserstand abgesunken ist und somit Niederschlagswasser zu dieser Zeit gut aufgenommen werden kann. Allerdings wäre es für den Einzelfall auch denkbar, dass eine hochwasserauslösende Witterungsperiode entweder zu einer

Auffüllung der Grundwasserstände mit anschließendem Oberflächenabfluss führt oder in eine Zeit mit ohnehin hohen Grundwasserständen fällt (EGGELSMANN, 1990).

Eine Dränierung der Moorböden wäre aus Sicht des Hochwasserschutzes nicht zu befürworten, da eine ständige Grundwasserabsenkung zum Moorschwund durch Mineralisierung, Sackung und Schrumpfung führt. Stärker ausgetrocknete Moorböden weisen irreversible Strukturveränderungen auf. Sie sind gekennzeichnet durch einen Vermullungshorizont an der Oberfläche und einen untergelagerten Bröckel- und Schrumpfungshorizont. Eine starke Verminderung der horizontalen und vertikalen Wasserdurchlässigkeit ist die Folge (SUCCOW & JESCHKE, 1990; ZEITZ & VELTY, 2002). Hinzu kommen zum Teil hydrophobe Eigenschaften der Bodenoberfläche. Die Infiltration des Niederschlagswassers kann somit stark behindert sein, so dass eine angestrebte Verbesserung der Retentionsfunktion nicht erzielt werden kann. Darüber hinaus fördern Dränierungen die Mineralisierung, die wiederum zu erheblichen Stoffausträgen führen, die auch in angrenzenden Ökosystemen zu erheblichen Problemen führen können. Eine Dränierung intakter Moore verbietet sich zudem aus Gründen des Naturschutzes.

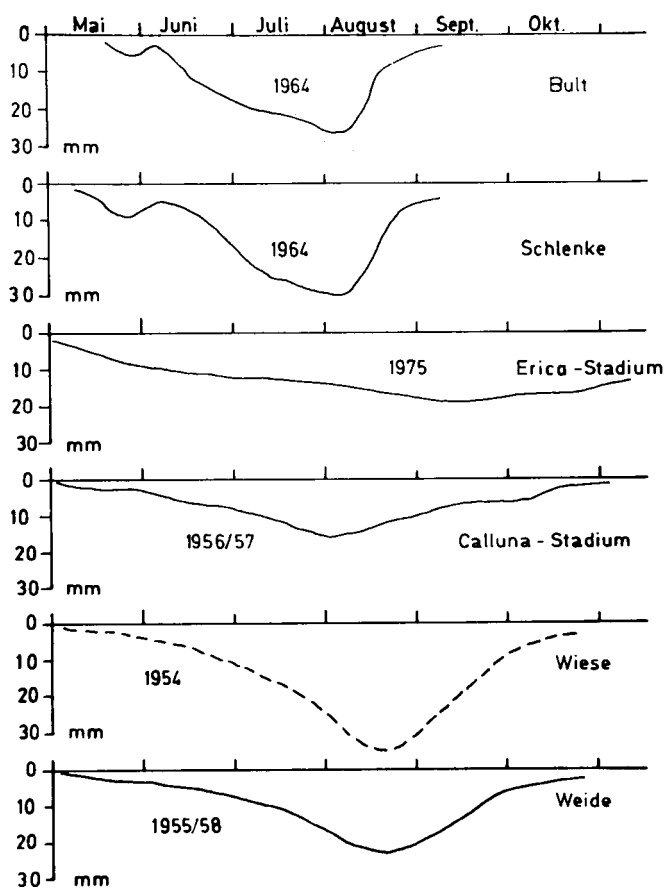


Abb. 15 Oszillation des Grundwasserstandes aufgrund gesteigerter Evapotranspiration bei verschiedenen Hochmoor-Stationen im Jahresgang von Mai bis Oktober (EGGELSMANN, 1981b)

Dränierete Mineralböden

Böden mit hohen Grundwasserständen weisen bei entsprechendem Relief ein verringertes Retentionsvermögen auf, wenn ihr Grundwasserspiegel während eines Niederschlagsereignisses bis zur Bodenoberfläche ansteigt und dadurch kein Wasser mehr in den Boden infiltrieren kann. Es kommt dann auf geneigten Flächen zu Oberflächenabfluss. Sind diese Standorte dränwürdig und werden sie gedränt, so wird der Grundwasserflurabstand künstlich herabgesenkt. Der Boden kann bei einem Niederschlagsereignis aufgrund der Zunahme des nun luftgefüllten Porenraums mehr Wasser aufnehmen und zwischenspeichern. Eine hochwassermindernde Retentionswirkung des Bodens wäre, wie z. B. COLLINS (1984) und PRENG (1963) dies hierdurch ableiten, denkbar.

Die hochwassermindernde Wirkung wird jedoch durch die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens in zweierlei Hinsicht begrenzt bzw. in Frage gestellt. Zum einen kann die Durchlässigkeit so gering sein, dass der Boden nicht schnell genug entwässert wird. Das durch die Dränage hinzugewonnene Retentionsvermögen wäre entsprechend so gering, dass eine hochwassermindernde Wirkung ausbleiben würde. Zum anderen könnte die Durchlässigkeit des Bodens so hoch sein, dass das infiltrierte Wasser zu schnell der Dränage zugeführt und dann ungehindert zum Vorfluter weitergeleitet wird. Der Gesamtabfluss wäre in diesem Fall größer als vor der Dränierung und würde zudem beschleunigt ablaufen.

Nach MENDEL (2000) wird in der Literatur in der Mehrzahl der Fälle durch die Dränung landwirtschaftlicher Flächen eine deutliche Erhöhung des Direktabflusses beschrieben. Auch BRONSTERT ET AL. (1995) fanden in der Literatur sowohl beschleunigende als auch hemmende Auswirkungen von Dränagen auf den Hochwasserabfluss, wobei auch hier die beschriebenen hochwasserverschärfenden Fälle dominierten. Beispielsweise traten nach der Dränung in einem landwirtschaftlichen Einzugsgebiet in England (1,6 km², tonige Lehm Böden) erhöhte Scheitelabflusswerte auf und die Anlaufzeiten der Hochwasserwellen verkürzten sich um durchschnittlich etwa drei Stunden.

Im Gegensatz dazu stellte ROBINSON (1989) bei den von ihm ausgewerteten Arbeiten, die sich mit der Auswirkung von Dränagen auf Scheitelhöhe und Anlaufzeit der Hochwasserwelle befassten, eher eine Abflussverminderung als eine Abflussverschärfung fest. In sechs von acht der in Großbritannien untersuchten Standorte wurde der Hochwasserabfluss bei hohen Jahresniederschlägen und bei extremen Einzelereignissen durch die Dränung reduziert und nur bei zwei der Standorte verschärft. Hierbei wiesen allerdings die sechs hochwasserreduzierenden Standorte extrem hohe winterliche Grundwasserflurabstände auf, so dass bei einem Niederschlagsereignis kein Wasser mehr in den Boden aufgenommen werden konnte (vgl. Tab. 18). Im Gegensatz dazu erhöhten sich in einem 1,5 km² großen dränierten nordenglischen Einzugsgebiet im Mittel die Hochwasserscheitel um 20 % und die Anlaufzeiten wurden um 25 % verkürzt. Diese Effekte verminderten sich nach Aufforstung. Ähnlich reagierte auch ein 3 km² großes Einzugsgebiet in Wales, dessen Fläche zu 30 % dräniert ist, sowie je ein weiteres Gebiet in England, SO-Finnland und Oberbayern.

	Hochwasserscheitelabfluss							
	Abnahme						Zunahme	
Standort-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Grundwasserflurabstand Winter [cm]	0	0	0	0	0	0	30-40	30-40
Tiefe einer undurchlässigen Schicht [cm]	24	24	37	25	27	20	45	40

Tab. 18 Wirkung der Dränage in acht kleinen Einzugsgebieten in Großbritannien auf den Hochwasserscheitelabfluss in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand und der Tiefenlage einer undurchlässigen Schicht (nach ROBINSON, 1989)

KAO (1980) verglich in einem hügeligen Teilgebiet des Grand River (Ontario, Kanada) von 20 km² Größe mit einem dränierten Flächenanteil von 8 km² Größe den gemessenen Abfluss eines Regenereignisses mit im Anschluss daran berechneten Abfluss für den hypothetischen Fall ohne Dränage (Abb. 16). Nach einem 8-stündigen Regen von insgesamt etwa 15 mm Höhe erzeugte der intensive, nachfolgende Regen eine unmittelbare steile Abflussspitze. Sie übertrifft den Rechenfall ohne Dränage um das 2,75-fache bei einem 20 Stunden früheren Scheiteleintritt. Hierzu passen Beobachtungen von SCHUCH (1989), der von einer kurzen, beträchtlichen, dränbedingten Erhöhung der Abflussspitzen berichtet. Darüber hinaus sei auf die Beobachtungen von HERMANN & UEBERSCHÄR (1993) verwiesen. Sie zeigten die Bedeutung von über die Dränstränge ablaufendem Grundwasser für die Hochwasserbildung in einem kleinen Einzugsgebiet in der südlichen Lüneburger Heide auf.

Grundwasserbeeinflusste Mineralböden kommen häufig im Bereich der Auen, in Muldenlagen und Verebnungen vor und lassen vor der Dränierung nur eine extensive Bewirtschaftung zu. Diese Böden können erst nach einer Dränierung in die intensive Nutzung überführt werden, wobei in der Regel ihre für den Naturhaushalt wichtige Retentionsfunktion verloren geht. Diese Standorte müssen daher wie oben erwähnt schon aus diesem Grund als hochwasserverstärkend eingestuft werden.

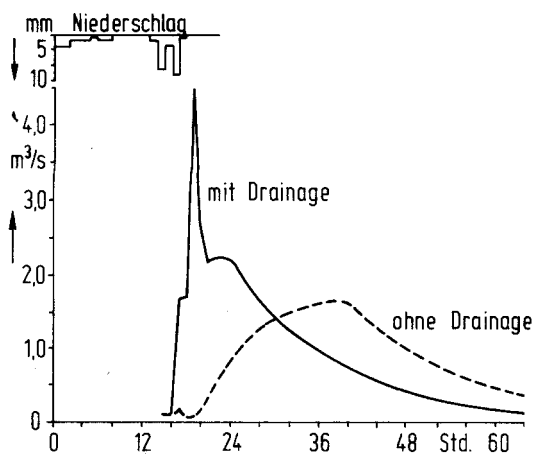


Abb. 16 Vergleich gemessener Abfluss mit Dränagen mit berechnetem Abfluss bei einer hypothetischen Landnutzung ohne Dränagen (KAO, 1980)

Von den grundwasserbeeinflussten Mineralböden können noch stauwasserbeeinflusste Mineralböden unterschieden werden. Diese Standorte zeichnen sich durch temporär erhöhte Wassergehalte, häufig im unteren Profilbereich aus. Dieses Stauwasser wird zum Teil durch Dränierungen bewirtschaftet. Im oberen Profilbereich weisen diese Böden in der Regel noch hohe Durchlässigkeiten auf, so dass eine Dränage zu einer beschleunigten Ableitung des Bodenwassers führt und damit sich tendenziell hochwasserverstärkend auswirkt. Darüber hinaus weisen die meisten der staunäsebeeinflussten Böden noch relativ gute Retentionseigenschaften auf. Handelt es sich bei diesen Böden um Löß-Böden mit Gefügeschäden, die auf Bodenverdichtungen und langjährige konventionelle Bewirtschaftung zurückzuführen sind, so würde eine Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung / Direktsaat eine Verbesserung der bodenphysikalischen Eigenschaften mit sich bringen. Aus pflanzenbaulicher Sicht könnte dann auf eine Dränierung in der Regel verzichtet werden (SCHMIDT, 2000).

Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlung

Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Dränagen

Dränierungen von Böden wirken sich tendenziell hochwasserverschärfend aus und sollten daher in der Regel vermieden werden. Es sei aber darauf hingewiesen, dass eine allgemeingültige Bewertung nicht unproblematisch ist, da die Wirkung im Einzelfall je nach Faktorenkombination sehr unterschiedlich ausfallen kann. Folgende Hinweise können jedoch für den Umgang mit Dränagen aus Sicht des Hochwasserschutzes gegeben werden:

- Flächen, die wichtige Retentionsfunktionen im Landschaftshaushalt übernehmen könnten, sollten im Rahmen von entsprechenden Förderprogrammen oder im Rahmen von Flurneuordnungsverfahren aus der intensiven ackerbaulichen Nutzung genommen werden, wobei die bestehenden Dränagen verschlossen werden sollten.
- Vor der Neuanlage von Dränagen sind die Auswirkungen auf das Abflussverhalten zu prüfen, so dass eine hochwasserverschärfende Wirkung ausgeschlossen werden kann.
- Bei der Neuanlage von Dränagen sollten Dränstränge und Sammler möglichst nicht in Falllinie angelegt werden (PREUBER, 1985).
- Die Dränabstände sollten nach VAN DER PLOEG & SIEKER (2000) nicht nach DIN 1185 bemessen werden, sondern weitere Abstände aufweisen. Für genaue Berechnungen sei auf WISKOW & VAN DER PLOEG (2003) verwiesen.
- BORK ET AL. (1998) empfehlen zur Hochwasserverminderung, nicht zwingend benötigte Dränagen zu beseitigen.
- Der Einsatz von Drosselorganen am Dränauslass sollte erforscht werden, damit eine akzeptable Abflusspende nicht überschritten wird.
- Dränmaßnahmen vor allem auf Staunässe beeinflussten Standorten sollten wenn möglich durch Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren / Direktsaat sowie durch Minimierung von Bodenschadverdichtungen vermieden werden.
- Dränierungen von Moorböden sollten unterbunden werden, da eine nachhaltig Bewirtschaftung nicht durchgeführt werden kann. Zudem verbietet sich eine Dränierung intakter Moore aus Gründen des Naturschutzes.

Tab. 19 Kurzzusammenfassung der Handlungsempfehlungen – Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Dränagen

7. Quantitative Bewertung von Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Oberflächenabflussreduzierung

In diesem Kapitel werden die Effekte, die sich aus der Umstellung auf eine angepasste Ackernutzung ergeben, quantifiziert. Die Quantifizierung erfolgt auf zwei Wegen. Zum einen wird in Kap. 7.1 mit Hilfe des Erosionsmodells Erosion 3D die Oberflächenabflussreduzierung für verschiedene Bodenbedingungen berechnet. Im Vordergrund steht dabei die Umgestaltung der konventionellen auf eine konservierende Bodenbearbeitung. In Kap. 7.2 werden die Effekte, die sich durch die angepasste Ackernutzung für den Hochwasserschutz ergeben, anhand einer Literaturanalyse quantifiziert. Eine Gesamtbilanz erfolgt im Kap. 9 (Fazit).

7.1 Simulation - Abschätzung der Effekte einer Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung mit Hilfe des Erosionsmodells Erosion 3D

7.1.1 Modell: Erosion 3D

Bei dem Bodenerosionsmodell Erosion 3D (VON WERNER, 1995) handelt es sich um ein gegliedertes Gebietsmodell für die ereignisbezogene Berechnung von Feststoffabtrag, -akkumulation und Oberflächenabfluss in kleinen Einzugsgebieten. Das Modell arbeitet rasterbasiert, wobei die Auflösung der Rasterzellengröße in der Regel von dem zu verwendenden digitalen Geländemodell abhängt. Die Simulation des Oberflächenabflusses und des Abtrags- und Akkumulationsprozesses beruht auf dem von SCHMIDT (1991, 1996) entwickelten und in der Hangprofilversion Erosion 2D realisierten, überwiegend physikalisch begründeten Modellansatz. Dieser setzt sich aus drei Teilmodellen zusammen: dem digitalen Hangmodell, dem Infiltrationsmodell und dem eigentlichen Erosionsmodell. Die Umsetzung der zweidimensionalen Hangversion zur GIS-gekoppelten dreidimensionalen Version erfolgte durch von Werner (VON WERNER, 1995).

Ausführliche Informationen über die mathematischen Grundlagen und die Funktionsweise aller drei Teilmodelle werden umfassend von SCHMIDT (1991a-c, 1996), VON WERNER (1995) und VON WERNER UND SCHMIDT (1996) beschrieben. Für die Modellierung des Oberflächenabflusses sind im Wesentlichen das digitale Hangmodell und das Infiltrationsmodell entscheidend, da sie über die Menge des Oberflächenabflusses bestimmen. Auf diese beiden Teilmodelle soll hier kurz eingegangen werden:

Das Reliefmodell dient der Berechnung der Hangneigung, der Exposition, der Einzugsgebietsgröße, von Abflusswegen und Abflussverteilung, der Länge des Fließweges und der Abflusskonzentration. Untersuchungen (VON WERNER, 1995) haben gezeigt, dass bei Rasterweiten zwischen 10 bis 20 m realistische Ergebnisse erzielt werden. Aus diesem Grund wurde ein digitales Geländemodell mit der Rasterweite von 12,5 m für die Berechnungen verwendet. Problematisch bei der für das Modell notwendigen einheitlichen Rasterweite ist, dass kleine Reliefstrukturen wie zum Beispiel kleinere Geländekanten, Böschungen und Gräben entweder nicht dargestellt werden können oder eine Rasterzelle mit der Kantenlänge von 12,5 m einnehmen müssen.

Das Infiltrationsmodell arbeitet nach dem häufig in nicht USLE-basierten Erosionsmodellen wie z. B. CREAMS, WEPP verwendeten Infiltrationsansatz nach GREEN UND AMPT (1911) (siehe Abb. 26 in Kap. 8). Wie schon in Kap. 8 beschreiben, beinhaltet diese Modellvorstellung starke Vereinfachungen, die von der Realität erheblich abweichen. So liegt dem Infiltrationsansatz von GREEN UND AMPT (1911) die vereinfachte Vorstellung zu Grunde, dass das Niederschlagswasser kolbenförmig in den Boden eindringt und hierbei den verfügbaren Porenraum vollständig ausfüllt (HARTGE, 1991). Dem Infiltrationsmodell liegt die vereinfachte Annahme zu Grunde, dass sich die Bodenmatrix wie ein starrer, in sich homogener Körper verhält (SCHMIDT, 1996). Das bedeutet, dass

- das Modell durch physikalisch und biologische Prozesse bedingte Sekundär- und Makroporen (z. B. Schrumpfrisse, Wurzel- und Wurmgänge) nicht oder nur unzureichend berücksichtigt,
- vertikale Veränderungen der physikalisch-chemischen Bodeneigenschaften (z. B. Substratwechsel, vertikal differenzierte Anfangswassergehalten, Verdichtung der Pflugsohle, Stauhohizonte) nicht simuliert werden und
- dynamische Prozesse (z. B. Verschlammung, Quellung), die den Infiltrationsprozess stark beeinflussen, nicht abgebildet werden können.

Daraus folgt, dass aufgrund der vereinfachten Modellannahmen das Infiltrationsmodell beispielsweise bei Böden mit einem hohen Makroporenanteil zu geringe Infiltrationsraten berechnen und auf der anderen Seite bei strukturschwachen, verschlammten Böden zu hohe Infiltrationsraten vorgeben würde. Da sich Bewirtschaftungsänderungen aber deutlich sowohl auf die Makroporenbildung als auch auf die Strukturstabilität und damit auf die Verschlammungsneigung auswirken, wurde der Korrekturfaktor K in die Berechnungen mit einbezogen, der diese Phänomene kompensiert. Der Korrekturfaktor beinhaltet damit die Gesamtheit der die Infiltration beeinflussenden Faktoren, die in dem vereinfachten Infiltrationsansatz von GREEN UND AMPT (1911) nicht berücksichtigt sind. Dieser wurde empirisch aus Beregnungsversuchen ermittelt und ergab sich rechnerisch mit Hilfe der berechneten und gemessenen Abflüsse. Die Korrekturfaktoren wurden hierzu innerhalb des Modells solange variiert, bis die errechneten Gesamtabflüsse mit den gemessenen übereinstimmten.

Für die Modellierung mit dem Erosionsmodell Erosion 3D werden die in Tab. 20 aufgeführten Eingangsdaten benötigt, um die in Tab. 21 aufgezeigten Ausgabegrößen berechnen zu können. Für jeden Eingangsdatensatz muss eine Rasterkarte erstellt werden, auf der der jeweilige Parameter flächendifferenziert enthalten ist. Die Generierung der Eingangsdatensätze wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit Hilfe des Geographischen Informationssystems GRASS durchgeführt, für das ein für das Untersuchungsgebiet und den Anforderungen von Erosion 3D abgestimmtes Eingabeskript programmiert wurde.

Modelleingangsgrößen	Abkürzung	Einheit
Bodenparameter		
Korngrößenverteilung an Bodenoberfläche (9 Fraktionen: fT, mT, gT, fU, mU, gU, fS, mS und gS, wobei in der Regel Gesamt-Ton = mT; und fT und gT mit 0 % belegt werden)	korn	Gew.- %
Lagerungsdichte in 10-15 cm Tiefe	bul	Kg/m ³
Gehalt an organischem Kohlenstoff im Oberboden	org	Gew.- %
Anfangswassergehalt in 10 – 15 cm Tiefe	moi	Vol.- %
Erosionswiderstand (kritischer Impulsstrom)	ero	N/m ²
Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche (Steine, Vegetation, Mulch)	cov	%
Rauigkeitsbeiwert (nach Manning/Strickler oder Garbrecht)	rou	s/m ^{1/3}
Korrekturfaktor (korrigiert die berechnete Infiltrationsrate)	cor	-
Reliefparameter		
Geländehöhenmodell (DGM)	dgm	m
Niederschlagsparameter		
Niederschlagsdauer (Dauer eines Niederschlagsereignisses als beliebiges Vielfaches von 10 Minuten)	nd	min
Niederschlagsintensität (Eingabe in 10-Minuten-Intervallen als Durchschnittswerte)	nd	mm/min

Tab. 20 Modelleingangsgrößen des Erosionsmodells Erosion 3D (SCHMIDT ET AL., 1996)

Modellausgabegrößen	Einheit
flächenhaftbezogene Ausgabegröße (bezogen auf das Zelleneinzugsgebiet einer Rasterzelle, getrennt in Oberflächen-Abfluss und Vorfluter-Abfluss)	
Oberflächenabfluss (kumulativer Abfluss während des gesamten Niederschlagsereignisses für beliebige Rasterzellen pro Meter Rasterzellenkante)	m ³ /m
Austrag	t/ha
Deposition	t/ha
Nettoaustrag	t/ha
punktbezogene Ausgabegröße (bezogen auf das Prozessgeschehen innerhalb einer Rasterzelle)	
Abfluss	m ³ /m
transportierte Sedimentmenge	kg/m
Sedimentkonzentration	kg/m
Korngrößenverteilung (T und U)	%

Tab. 21 Modellausgabegrößen des Erosionsmodells Erosion 3D (VON WERNER & SCHMIDT, 1996)

Bei den Ausgabegrößen (Tab. 21) von Erosion 3D wird in punkt- und flächenbezogenen Ausgabegrößen unterschieden. Bei den punktbezogenen Ausgabegrößen handelt es sich um Werte, die den Oberflächenabfluss und das Abtragsgeschehen der jeweiligen Rasterzelle selbst wiedergeben, wohingegen die flächenbezogenen Ausgabegrößen die Abfluss- und Abtragsbedingungen im Einzugsgebiet einer jeweiligen Rasterzelle aufzeigen. Für den Vergleich der verschiedenen Szenarien wurde der Gesamtgebietsabfluss bestimmt.

7.1.2 Simulationsszenarien

Bei den zu simulierenden Szenarien wurde kein real existierendes Einzugsgebiet für die Simulationsrechnungen genommen. Die Grundlage für die verschiedenen Simulationen bildete ein Höhenmodell (Abb. 17) sowie eine angenommene vereinfachte Landnutzung in Form von Wald (auf den oberen Hanglagen) und Ackerland. Dies Standartgebiet hat eine Größe von 2,5 km². In dem Gebiet dominieren Hangneigungen zwischen 3,5 und 10,5 %. Die abflusswirksamen Hanglängen des Ackerlandes fallen zu ca. 60 % in die Klasse 100-200 m, zu ca. 30 % in die Klasse 200-300 m und zu ca. 10 % in die Klasse 50-100 m. Als vereinfachte Randbedingung wurde der Wald als nicht abflusswirksam vorgegeben und dessen Bodenparameter bei allen Simulationen beibehalten. Im Gegensatz dazu wurden die Bodenparameter (gemäß Tab. 22 und Tab. 23) für das Ackerland (Flächenanteil etwa 1,9 km²) entsprechend den Bewirtschaftungsszenarien variiert.

Damit die Simulationsrechnungen auf einer abgesicherten Datenbasis begründet waren, wurden die Parameterdatensätze des Parameterkatalogs Sachsen (MICHAEL ET AL., 1996) verwendet. Diese wurden im Rahmen des Erosionsmessprogramms durch umfangreiche Berechnungsversuche und Laborauswertungen bestimmt und können damit als abgesichert angesehen werden (MICHAEL, 2001). Darüber hinaus bestand damit die Möglichkeit, Szenarien für unterschiedliche Substrate zu berechnen.

Verwendet wurden die in Tab. 22 dargestellten Bodenparameterdatensätze. Für alle acht in Tab. 23 aufgeführten Bodendaten wurden jeweils die Varianten konservierende und konventionelle Bodenbearbeitung verglichen. Der Bodenzustand wurde hierbei direkt nach der Bestellung aufgenommen und unterscheidet sich hinsichtlich der vorangegangenen Bodenbearbeitung in:

- konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug, Saatbettbereitung, Drillsaat und
- konservierende Bodenbearbeitung mit Tieflockerung (DUZI), Saatbettbereitung, Mulchsaat.

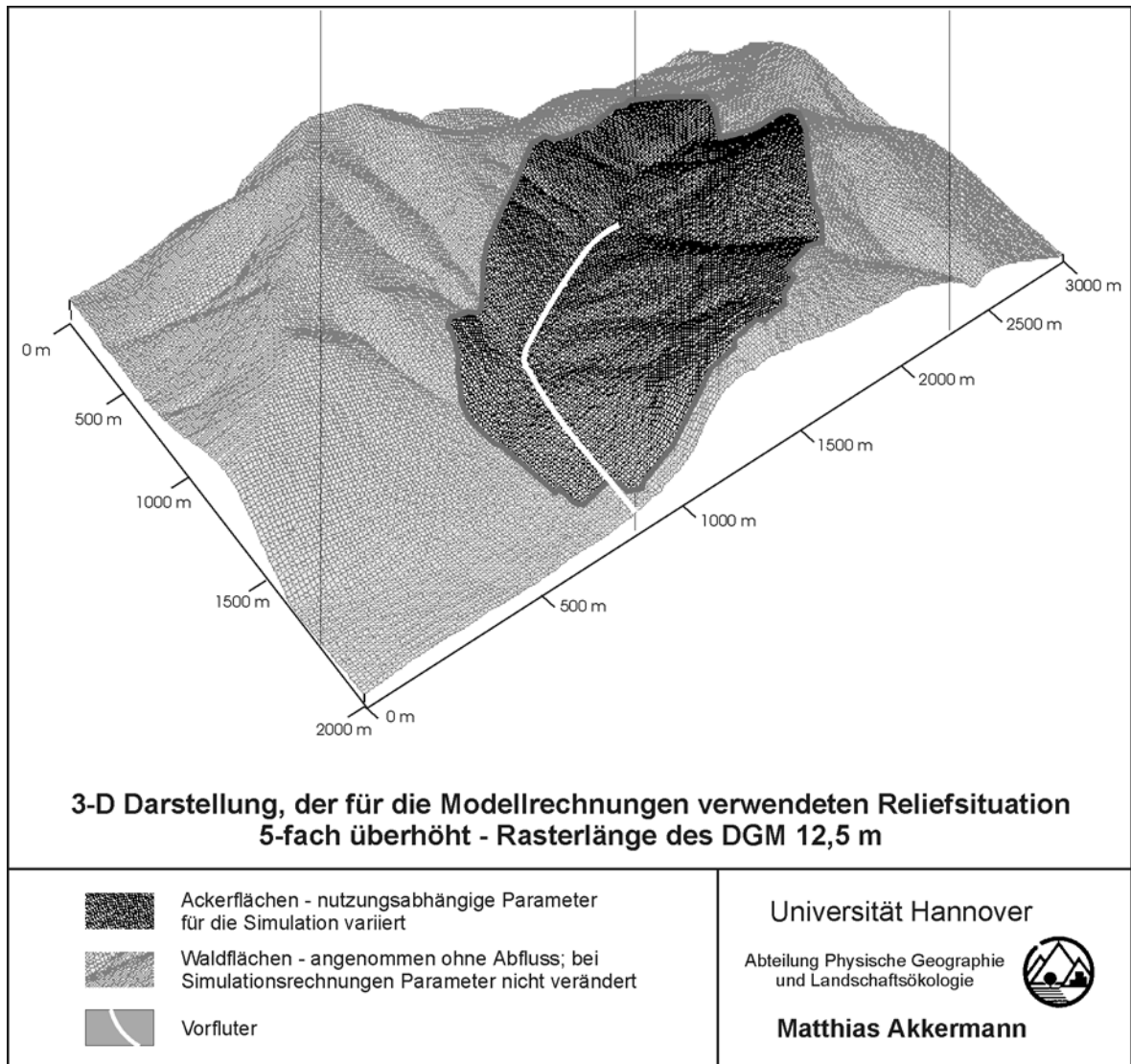


Abb. 17 3D-Darstellung des für die Modellierung verwendeten Standortgebietes

Simulations- Bezeichnung / Nr.	konservierend	konventionell	Bodenart	Lagerungsdichte	C-org.	Anfangswasser- gehalt	Erosionswiderstand	Rauigkeit	Bedeckungsgrad	Korrekturfaktor
Dateiname	*_s	*_v	korn	bul	org	moi	ero	rou	cov	cor
SI2_s	X		SI2	1400	1,2	20	0,005	0,023	10	10,0
SI2_v		X	SI2	1350	1,0	18	0,001	0,015	0	0,7
SI4_s	X		SI4	1400	1,4	27,5	0,005	0,023	10	10
SI4_v		X	SI4	1350	1,2	26	0,001	0,0015	0	0,7
Su3_s	X		Su3	1400	1,0	26,5	0,004	0,023	10	2,0
Su3_v		X	Su3	1350	0,8	25,5	0,0025	0,015	0	0,7
Slu_s	X		Slu	1370	1,5	30	0,004	0,023	10	2,0
Slu_v		X	Slu	1300	1,3	28,5	0,00025	0,015	0	0,7
Lu_s	X		Lu	1400	1,8	35	0,005	0,023	10	6,0
Lu_v		X	Lu	1320	1,5	34	0,0023	0,015	0	1,0
Uls_s	X		Uls	1400	1,7	31,5	0,002	0,023	10	22,0
Uls_v		X	Uls	1320	1,5	30	0,0009	0,015	0	1,5
Us_s	X		Us	1400	1,4	31,5	0,002	0,023	10	6,0
Us_v		X	Us	1320	1,2	30	0,0009	0,015	0	1,5
Ut4_s	X		Ut4	1400	1,8	30	0,0043	0,023	10	6,0
Ut4_v		X	Ut4	1320	1,6	27,5	0,00021	0,015	0	0,9

Tab. 22 Eingangsdaten für die Oberflächenabflusssimulation bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung, für verschiedene Bodenarten (MICHAEL ET AL., 1996)

Bodenart	fT	mT	gT	fU	mU	gU	fS	mS	gS
Dateiname	korn1	korn2	korn3	korn4	korn5	korn6	korn7	korn8	korn9
SI2	0	5	0	2	4	13	30	44	2
SI4	0	10	0	0	9	6	35	35	5
Su3	0	5	0	7	15	22	18	26	7
Slu	0	11	0	10	17	13	12	16	21
Lu	0	21	0	16	19	15	6	8	15
Uls	0	12	0	12	22	26	12	10	6
Us	0	6	0	12	32	37	4	4	5
Ut4	0	16	0	8	26	38	5	3	4

Tab. 23 Eingangsdaten für die Oberflächenabflusssimulation bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung, für verschiedene Bodenarten – Bodenartendateien (MICHAEL ET AL., 1996)

Außer den in Tab. 22 und Tab. 23 aufgeführten Bodendatensätzen für den Bodenzustand direkt nach der Einsaat wurden drei Datensätze für Winterweizen für den Zustand kurz vor der Ernte (Bestockungszustand) bei einer 100-prozentigen Bodenbedeckung simuliert (Tab. 24). Der Feldzustand und die vorausgegangene Bodenbearbeitung können für die drei Varianten wie folgt charakterisiert werden (Tab. 24):

- Simulation 012: trocken, verschlämmt / gepflügt, gegrubbert, gedrillt,
- Simulation 013: feucht, verschlämmt / gepflügt, gegrubbert, gedrillt und
- Simulation 014: feucht, verschlämmt / nichtwendende Bodenbearbeitung (DUTZI) mit Tieflockerung, Mulch.

Simulations- Bezeichnung / Nr.	konservierend	konventionell	Bodenart	Lagerungsdichte	C-org.	Anfangswasser- gehalt	Erosionswiderstand	Rauigkeit	Bedeckungsgrad	Korrekturfaktor
Dateiname			korn	bul	org	moi	ero	rou	cov	cor
012		X	Ut4	1320	1,0	25,4	0,001	0,014	100	0,15
013		X	Ut4	1360	1,0	25,2	0,0013	0,0179	100	0,03
014	X		Ut4	1450	1,0	43,5	0,00055	0,0208	100	36,5

Tab. 24 Eingangsdaten für die Oberflächenabflusssimulation bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung für die Bodenart Ut4 bei 100 % Bodenbedeckung kurz vor der Ernte (MICHAEL ET AL., 1996)

Die der Modellierung zu Grunde liegenden Niederschlagsereignisse wurden auch aus dem Parameterkatalog Sachsen (MICHAEL ET AL., 1996) entnommen, um die Modellrechnungen auf eine bestmöglich abgesicherte Datenbasis zu stellen. Es wurden die sechs in Tab. 25 aufgeführten Starkniederschlagsereignisse mit den in der Tabelle aufgeführten unterschiedlichen Wiederkehrzeiten ausgewählt.

Wiederkehrzeit [a]	Dateiname	max. Niederschlags- Intensität [mm/min]	Niederschlags- Dauer [min]	Niederschlags- Summe [mm]
2	1_002	1,14	40	12,2
5	1_005	1,45	190	23,5
10	1_010	1,68	60	30,9
20	1_020	2,12	60	41,5
50	1_050	2,45	90	55,6
100	1_100	2,7	190	65,1

Tab. 25 Für die Szenarien verwendete Extremniederschläge (MICHAEL ET AL., 1996)

7.1.3 Simulationsergebnisse der Szenarien

Den hier dargestellten Simulationsergebnissen liegen die in Kap. 7.1.2 aufgeführten Eingangsdaten zu Grunde, die im Geographischen Informationssystem GRASS mit Hilfe eines hierfür geschriebenen Eingabeskripts in 205 verschiedene Rasterkarten entsprechend den verschiedenen Bodendatensätzen generiert wurden und dann als Basis für die 114 Modellrechnungen mit dem Erosionsmodell Erosion 3D dienten.

Die Ergebnisse für die Simulationen des Saatbettzustandes (Eingangsdaten Tab. 22 und Tab. 23) zeigen Abb. 18 und Abb. 19. In Abb. 18 sind sechs verschiedene Diagramme dargestellt, die jeweils die prozentualen Abfluss-Anteile für die sechs verschiedenen, simulierten Wiederkehrwahrscheinlichkeiten der Starkniederschläge (1 mal in 100, 50, 20, 10, 5 bzw. 2 Jahren) aufzeigen. Jedes der Diagramme zeigt den prozentualen Anteil des Abflusses von der Gesamtniederschlagsmenge bei konservierender Bodenbearbeitung und bei konventioneller Bodenbearbeitung und zwar für jede der acht simulierten Bodenbedingungen (vgl. Tab. 22) sowie das arithmetische Mittel der verschiedenen Bodenarten der beiden Varianten. Die Ergebnisse spiegeln auf den ersten Blick schon die Komplexität der Abflussbildung wieder. Es wird deutlich, dass die verschiedenen Bodeneigenschaften sich nicht nur unterschiedlich auf die Abflussbildung innerhalb einer Bodenbearbeitungsvariante, sondern sich auch darüber hinaus extrem unterschiedlich auf die Reduzierung des Abflusses bei Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung auswirken.

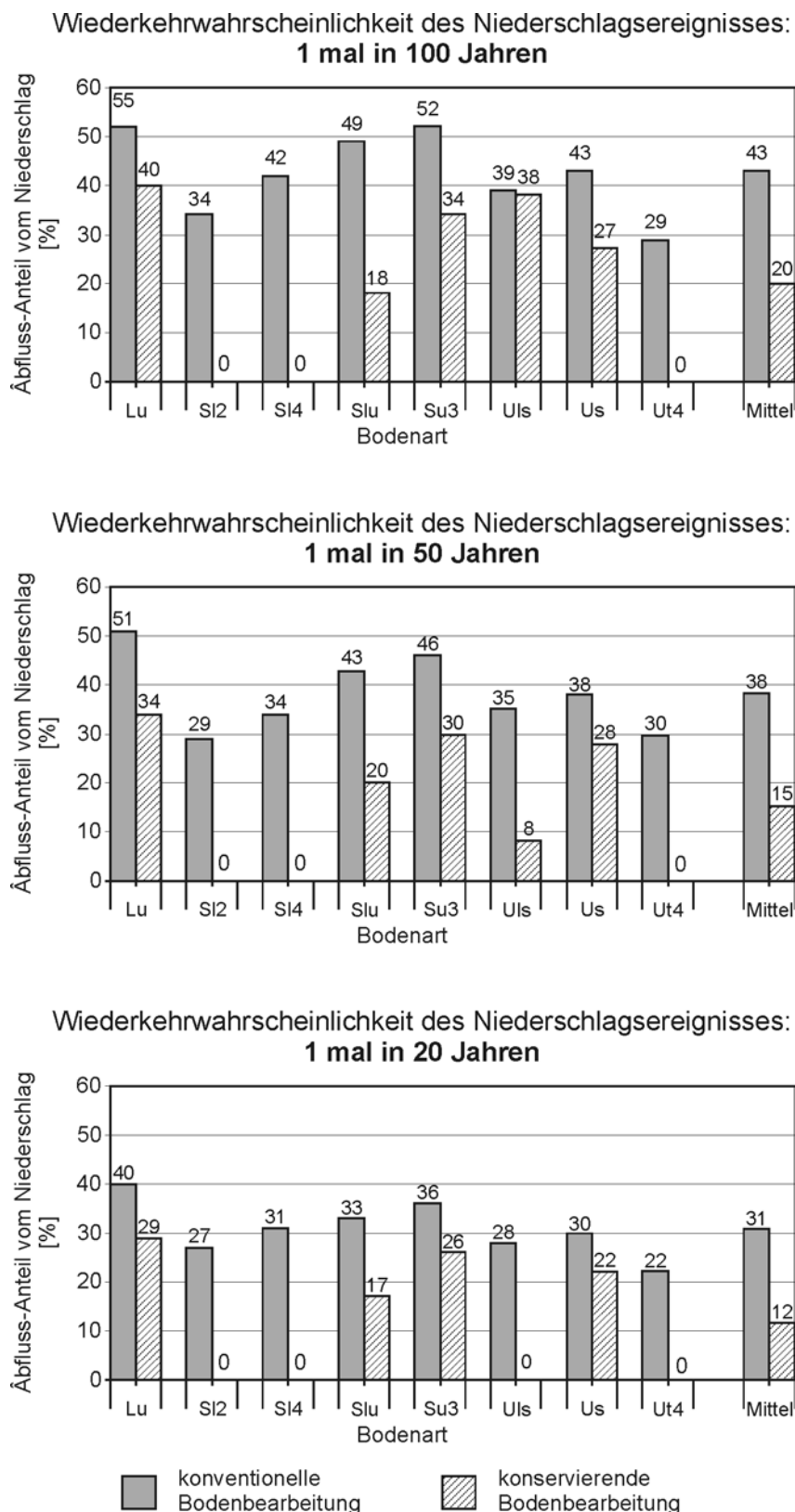


Abb. 18a Simulationsergebnisse: Vergleich der Oberflächenabflüsse bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung – Saatbettzustand, verschiedene Bodenbedingungen
 Oberflächenabfluss in % der Niederschlagsmenge; Saatbettzustand für unterschiedliche Bodenbedingungen gemäß Tab. 22 und Tab. 23; Die einzelnen Tabellen spiegeln die simulierten Wiederkehrintervalle der Starkniederschläge gemäß Tab. 25 wieder. Mittel: arithmetisch gemittelte Oberflächenabflüsse der verschiedenen Bodenbedingungen.

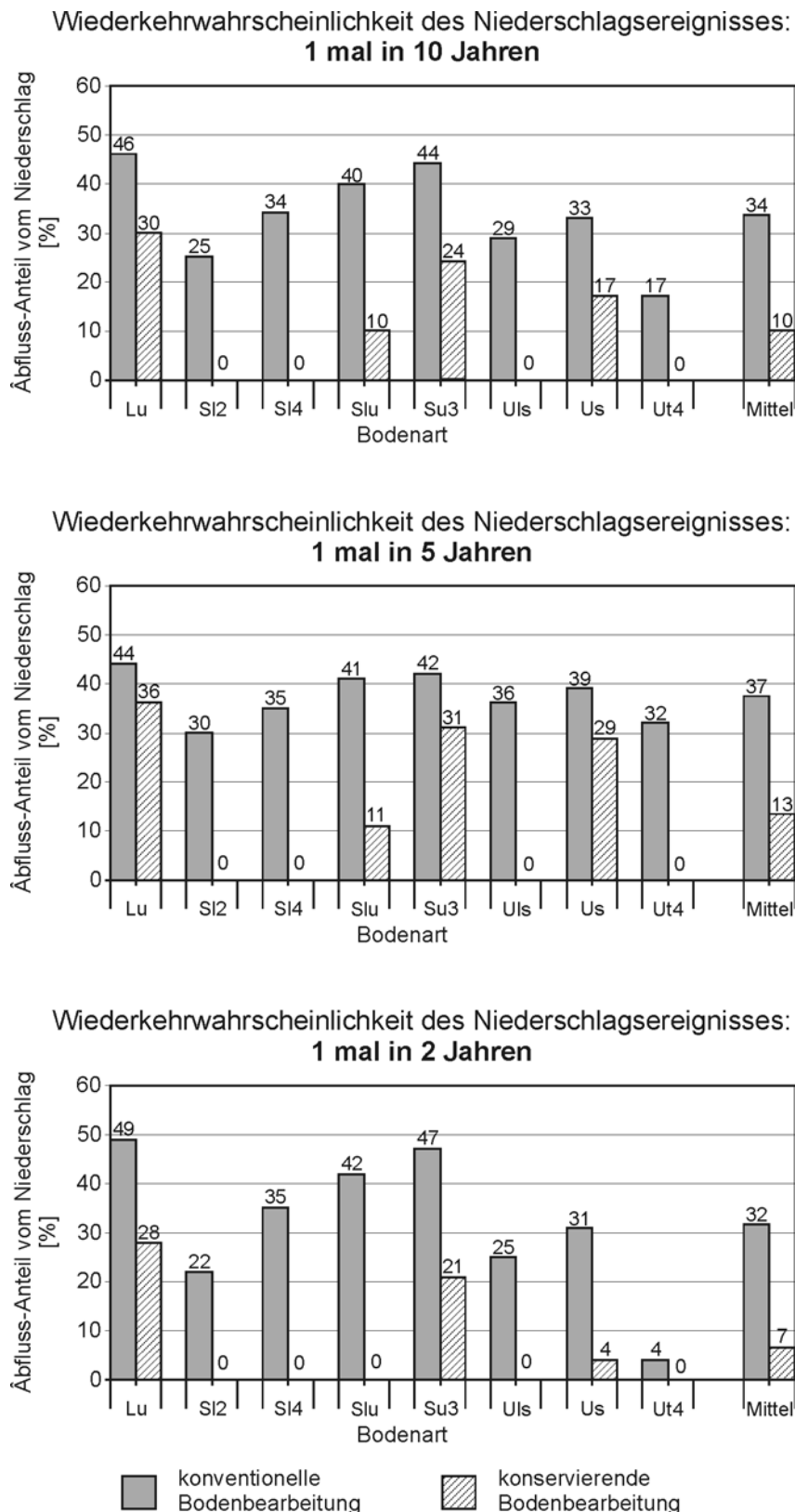


Abb. 16b Simulationsergebnisse: Vergleich der Oberflächenabflüsse bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung – Saatbettzustand, verschiedene Bodenbedingungen
 Oberflächenabfluss in % der Niederschlagsmenge; Saatbettzustand für unterschiedliche Bodenbedingungen gemäß Tab. 22 und Tab. 23; Die einzelnen Tabellen spiegeln die simulierten Wiederkehrintervalle der Starkniederschläge gemäß Tab. 25 wieder. Mittel: arithmetisch gemittelte Oberflächenabflüsse der verschiedenen Bodenbedingungen.

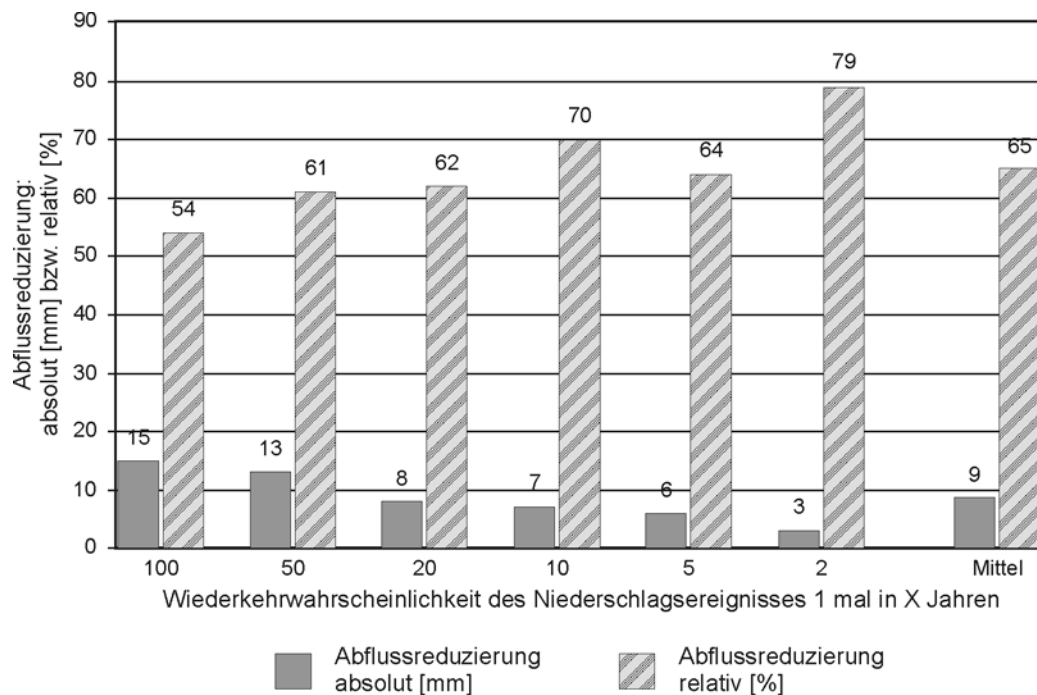


Abb. 19 Vergleich der Oberflächenabflussreduzierung durch Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung – Saatbettzustand, bei unterschiedlichen Niederschlagshäufigkeiten, gemittelt über verschiedene Bodenbedingungen

Abflussreduzierung = Oberflächenabflussreduzierung, arithmetisch gemittelt über die verschiedenen Bodenbedingungen gemäß Tab. 22 und Tab. 23, Saatbettzustand; absolut in mm = L/m² bzw. relativ in % bezogen auf Abfluss bei konventioneller Bodenbearbeitung; für unterschiedliche Starkniederschlagsereignisse gemäß Tab. 25.

Wie unterschiedlich sich die Umstellung auf eine konservierende Bodenbearbeitung auswirkt, soll exemplarisch anhand der Simulationsergebnisse des 100-jährigen Niederschlagsereignisses (Abb. 18a, oben) aufgezeigt werden. Das Diagramm zeigt beispielsweise beim Vergleich der Abfluss-Anteile von konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung bei den Bodenarten SI2, SI4 und Ut4, dass der Oberflächenabfluss ganz unterbunden wird (gegenüber zuvor 34, 43 bzw. 29 % Abfluss). Im Gegensatz dazu fällt bei der Bodenart Uls die abflussreduzierende Wirkung von 39 auf 38 % der Niederschlagssumme sehr gering aus. Diese Unterschiede im Einzelfall zu erklären ist schwierig, da sie auf sehr unterschiedlichen Teilprozessen, die im Modell implementiert sind, beruhen können. Mit Besonderheiten, die sich durch die Eingangsparameter ergeben, ist eine Erklärung nicht möglich (vgl. Tab. 22). Tendenziell zeigt sich jedoch im Durchschnitt eine eindeutige Reduzierung des Oberflächenabflusses bei einer Umstellung von konventioneller Bodenbearbeitung auf konservierende Bodenbearbeitung. So zeigt das arithmetische Mittel über alle Bodenarten bei dem betrachteten 100-jährigen Niederschlagsereignis eine Halbierung des Oberflächenabflusses von 43 % auf 20 %. Die Simulationsergebnisse für die anderen Starkniederschlagsereignisse zeigen tendenziell ähnliche Ergebnisse auf, wobei auffällt, dass bei einem 2-jährigen Niederschlagsereignis bei konservierender Bodenbearbeitung immer noch drei der acht Bodenvarianten Oberflächenabfluss liefern.

Abb. 19 zeigt das Ausmaß der Abflussreduzierung bei konservierender Bodenbearbeitung im Verhältnis zur konventionellen Bodenbearbeitung für die arithmetisch gemittelten Abflusswerte der unterschiedlichen Bodenbedingungen. Dargestellt ist in Abb. 19 sowohl die absolute als auch die relative Abflussreduzierung bei den unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten (1 mal in 100, 50, 20, 10, 5 bzw. 2 Jahren) sowie für das Gesamtmittel. Die relative Abflussreduzierung bezieht sich auf den Abfluss der konventionellen Bodenbearbeitungsvariante (Abfluss konventionell = 100 %). Die absolute Abflussreduzierung zeigt den Anteil, der bei der konservierenden Bodenbearbeitung im Gegensatz zur konventionellen Bodenbearbeitung im Gebiet zusätzlich zurückgehalten wird und stattdessen ebenfalls in den Boden infiltriert.

Die Abb. 19 zeigt die große Bedeutung der konservierenden Bodenbearbeitung für die Oberflächenabflussreduzierung. Diese beträgt im arithmetischen Mittel der verschiedenen Starkniederschlagsereignisse etwa 65 % vom Abfluss bei konventioneller Bodennutzung. Je extremer das Niederschlagsereignis ist, desto geringer wird der Anteil des Oberflächenabflusses, der durch eine Umstellung auf eine konservierende Bodenbearbeitung vermindert werden kann, wobei festgehalten werden muss, dass selbst bei einem 100-jährigen Niederschlagsereignis der Oberflächenabfluss immer noch um die Hälfte reduziert werden kann. Für die absolute Abflussreduzierung bedeutet das, dass 15 l/m² zusätzlich im Gebiet versickern. Dies entspricht fast einem Viertel der Gesamtniederschlagsmenge von 65,1 l/m², die im Gebiet zurückgehalten werden kann, wenn von der konventionellen Bewirtschaftung auf eine konservierende Bewirtschaftung umgestellt würde.

Die positive Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung auf die Abflussreduzierung ist nicht nur während des besonders empfindlichen Saatbettzustandes gegeben, sondern auch bei 100-prozentiger Bodenbedeckung im Bestockungsstadium. Dies zeigen die Ergebnisse in den Abb. 20 und Abb. 21. Simuliert wurden hierfür die Bodenbedingungen aus Tab. 24 für die Bodenart Ut4. Die Ergebnisse zeigen, dass auch hier die Abflüsse bei konservierender Bodenbearbeitung relativ zur konventionellen Bodenbearbeitung um über die Hälfte reduziert werden und damit wie beim Saatbettzustand über ein Viertel des Niederschlagswassers zusätzlich versickern kann.

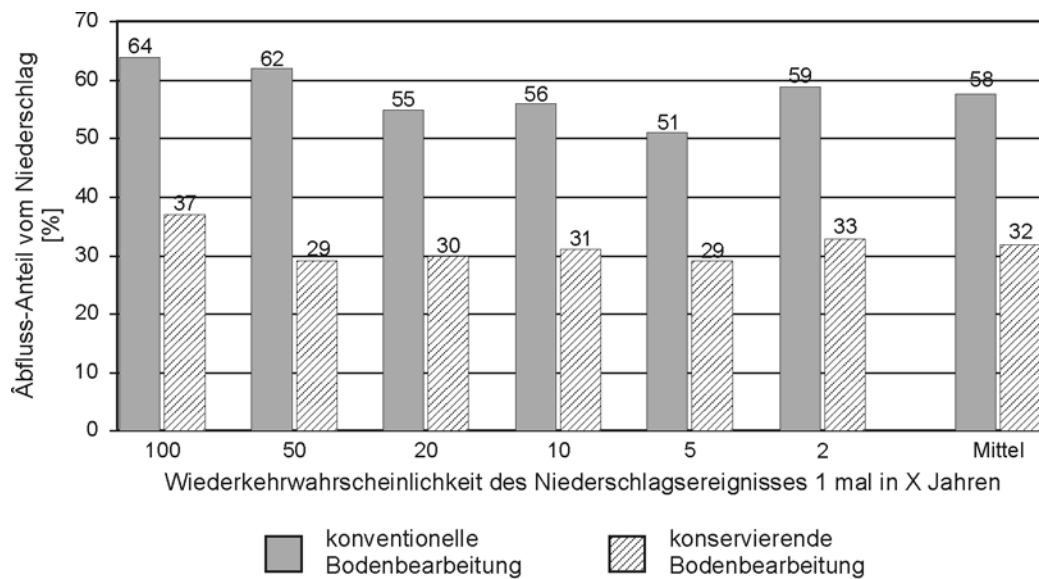


Abb. 20 Simulationsergebnisse: Vergleich der Oberflächenabflüsse bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung – Bestockungsstadium, Bodenart Ut4

Oberflächenabfluss in % der Niederschlagsmenge; Bestockungsstadium für die Bodenart Ut4 gemäß Tab. 24 und Tab. 23; unterschiedliche Starkniederschlagsereignisse gemäß Tab. 25.

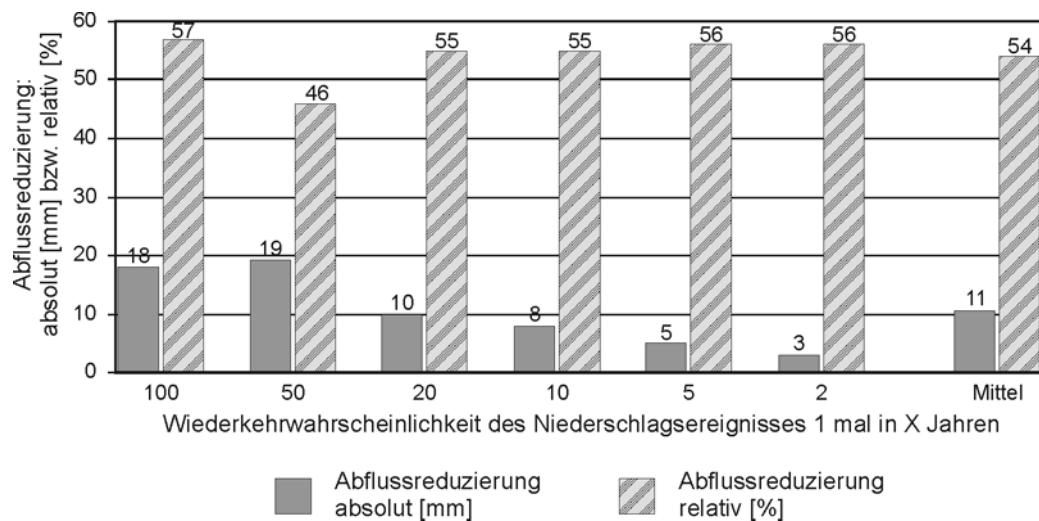


Abb. 21 Vergleich der Oberflächenabflussreduzierung durch Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung bei unterschiedlichen Niederschlagshäufigkeiten, Bestockungsstadium, Bodenart Ut4

Abflussreduzierung = Oberflächenabflussreduzierung, Bodenbedingungen gemäß Tab. 24 und Tab. 23, Bestockungsstadium; absolut in mm = L/m² bzw. relativ in % bezogen auf Abfluss bei konventioneller Bodenbearbeitung; für unterschiedliche Starkniederschlagsereignisse gemäß Tab. 25.

7.1.4 Kritik am Modell und an den Simulationsannahmen

Modelle für die Berechnung von Abfluss- und Erosionsvorgängen, bei denen Einflüsse der Bodenbewirtschaftung mitberücksichtigt werden können, sind zum einen sehr komplex, da sie auch diverse Rückkopplungen im Prozessgeschehen mitberücksichtigen müssen. Zum anderen sind sie schwer zu kalibrieren bzw. zu validieren. Eine exakte Überprüfung der Modellergebnisse ist nicht bzw. nur sehr bedingt und dann auch nur unter besonders hohem Aufwand, etwa mit Hilfe von Großberegnungsanlagen, im Feldversuch möglich. Einen gesamten Schlag mit seinem Spektrum unterschiedlicher Reliefstrukturen zu erfassen ist nicht möglich. Auch die hohe Variabilität der Bodeneigenschaften bereitet in diesem Zusammenhang Schwierigkeiten. Ergebnisse aus solchen Modellrechnungen müssen daher immer vor diesem Hintergrund mit Einschränkungen betrachtet werden.

Als problematisch muss der im Modell Erosion 3D implementierte Infiltrationsansatz nach GREEN & AMPT (1911), wie schon in Kap. 7.1.1 beschrieben, angesehen werden. Da eine genaue Bestimmung des Korrekturfaktors ohne Beregnungsversuche nicht möglich ist, musste auf die vorhandenen Parameterdatensätze zurückgegriffen werden, da sonst nicht mit abgesicherten Modellergebnissen gerechnet werden konnte. Der Vorteil, der sich hierdurch ergab, war die gute Vergleichbarkeit des Abflussverhaltens bei unterschiedlichen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen. Die Berechnungen werden mit dem Modell Erosion 3D rasterbasiert durchgeführt. Die Kantenlänge des Rasters wurde durch das Höhenmodell vorgegeben und betrug 12,5 m. Eine Modellierung von Kleinstrukturen bzw. von Gräben ist hierbei nicht oder nur eingeschränkt möglich. Da auf vorhandene Parameterdatensätze zurückgegriffen wurde, können die Ergebnisse als bestmöglich abgesichert angesehen werden.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigen (Abb. 22), dass mit abnehmender Niederschlagsintensität der relative Anteil des Niederschlagswassers, der zur Versickerung gelangt zunimmt. Dies ist auch zu erwarten, wobei verwunderlich ist, dass die Zunahme nur sehr gering ausfällt. Bei der Betrachtung der absoluten Versickerungswerte (Abb. 23) wird dies noch deutlicher. So können die Böden im Durchschnitt bei einem 100-jährigen Niederschlagsereignis 37 mm (bei konventioneller Bodenbearbeitung = konv) bzw. 52 mm (bei konservierender Bodenbearbeitung = kons) aufnehmen aber bei einem 2-jährigen Niederschlagsereignis insgesamt nur 8 mm (konv) bzw. 11 mm (kons). Dies Phänomen kann auch nicht auf eine etwaige verkürzte Niederschlagsdauer bei den geringeren Niederschlagsintensitäten zurückgeführt werden, da sowohl das 100-jährige und das 5-jährige, als auch das 20-jährige und das 10-jährige Niederschlagsereignis (vgl. Tab. 25) die gleiche Niederschlagsdauer besitzen. Es stellt sich die Frage, warum bei einem weniger intensiven Niederschlagsereignis nicht zumindest die gleiche Wassermenge in den Boden versickern kann, wie bei einem intensiveren. Inwieweit dieser doch nicht ganz plausibel wirkende Sachverhalt die Ergebnisse in Frage stellt, kann aber letzten Endes hier nicht geklärt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass hier die Prozesse in dem Modell nur unvollständig wiedergegeben werden oder das Modell den Abfluss im Verhältnis zum Niederschlag ermittelt.

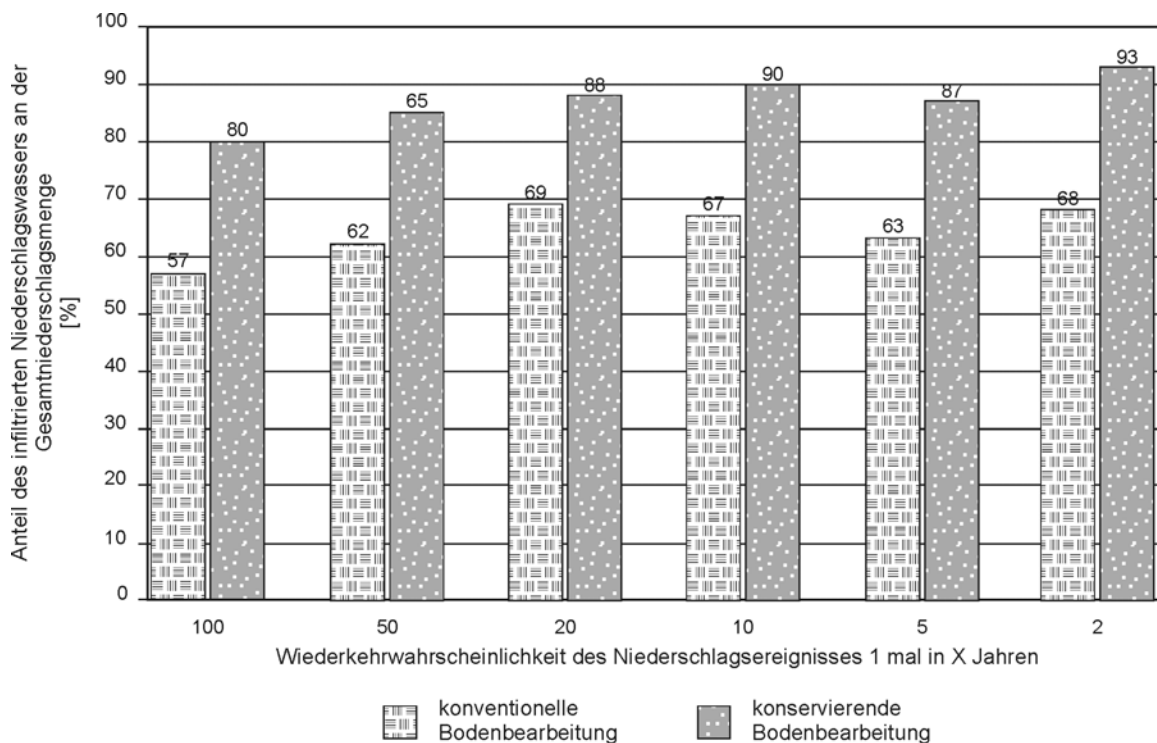


Abb. 22 Prozentualer Anteil des infiltrierten Niederschlagswassers an der Gesamtniederschlagsmenge des jeweiligen Niederschlagsereignisses (Tab. 25) bei verschiedenen Wiederkehrwahrscheinlichkeiten, arithmetisch gemittelt über verschiedene Bodenzustände (Tab. 22 und Tab. 23 - Saatbettzustand)

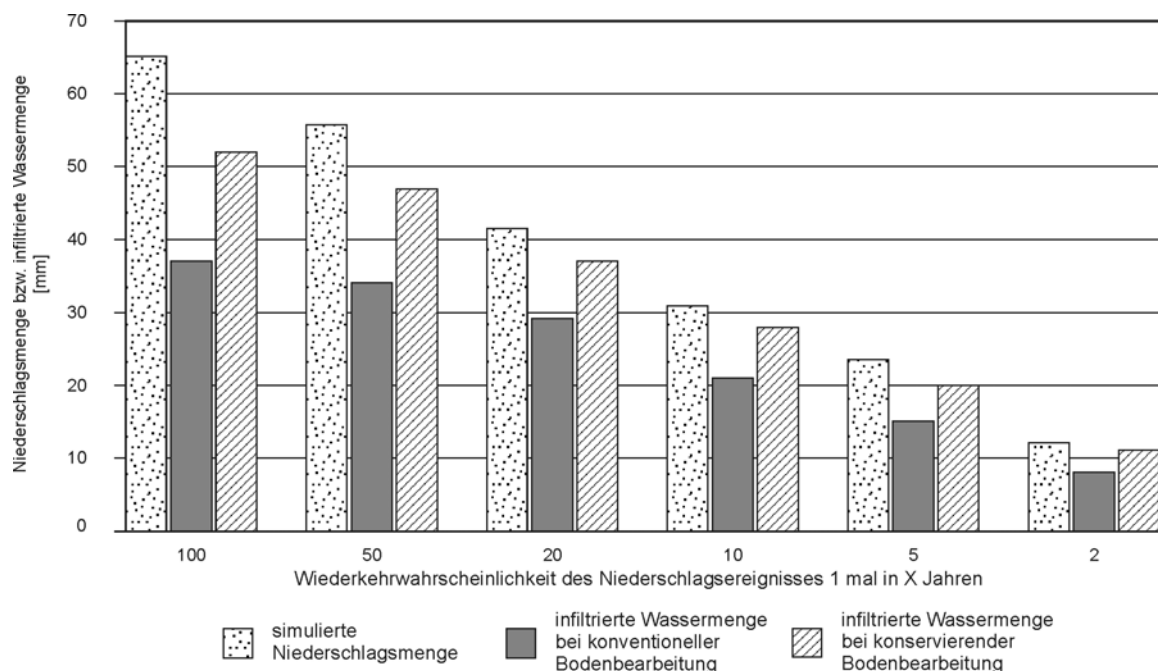


Abb. 23 Absolute Niederschlagsmengen und absolute Infiltrationsmengen im Vergleich von konventioneller mit konservierender Bodenbearbeitung bei unterschiedlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeiten der Niederschlagsereignisse – arithmetisch gemittelt über verschiedene Bodenzustände (Tab. 22 und Tab. 23 - Saatbettzustand), sowie die dazugehörigen Niederschlagsmengen

7.2 Literaturanalyse – Quantifizierung der Effekte von Änderungen in der Bewirtschaftung auf die Abflussreduzierung

Im Folgenden soll das quantitative Ausmaß der Oberflächenabflussreduzierung durch konservierende Bodenbearbeitung im Verhältnis zur konventionellen, wendenden Bodenbearbeitung aufgezeigt werden. In der Regel nimmt der Oberflächenabfluss bei konservierender Bodenbearbeitung stark gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung ab (EHLERS, 1975; KLAGHOFER, 1985; SCHEN, 1994; KAINZ, 1989; BEISECKER, 1994; FREDE ET AL. 1994; TEBRÜGGE & ABELSOVA, 1999; COLLA ET AL., 2000). Wurden bei den in der Literatur beschriebenen Versuchen keine oder nur undeutliche Unterschiede vorgefunden, so sind dies Ausnahmen, die auf besondere Bodenbedingungen zurückzuführen sind (TEBRÜGGE & ABELSOVA, 1999; WENDT & BURWELL, 1985, SIDIRAS ET AL., 1988), wie das folgende Beispiel belegen soll.

TEBRÜGGE & ABELSOVA (1999) konnten bei Versickerungsmessungen auf einem Tonboden (Auenpseudogley) keine gravierenden Unterschiede bei der Versickerungsleistung messen, da bei der Pflug-Variante der Tonboden im August wegen geringer Feuchtigkeit zahlreiche Schrumpfrisse aufwies und das applizierte Wasser schnell in den Bodenspalten abgeleitet wurde. Die Direktsaat-Variante hingegen wies wegen höherer Bodenfeuchte, die ursächlich auf die höhere Lagerungsdichte zurückzuführen war, keinerlei Schrumpfrisse auf. Dennoch wurde die aufgebrauchte Wassermenge in gleicher Zeitspanne nach TEBRÜGGE & ABELSOVA (1999) allein durch die Bioporen im Bodenkörper abgeleitet, welche auf den 10-fach höheren Regenwurmbesatz (200/m²) der Direktsaatvariante im Vergleich zur Pflugvariante (21/m²) zurückgeführt wurde.

Bei Vergleichsmessungen auf einer Tschernosem-Parabraunerde konnte TEBRÜGGE & ABELSOVA (1999) die sonst in der Literatur beschriebenen deutlichen Unterschiede vorfinden. Während auf der Direktsaat-Variante nahezu 19 mm/s (gesamtopplizierte Menge 40 mm) durch die biogenen Makroporen abgeleitet werden konnten, betrug die Infiltrationsleistung bei der Pflug-Variante nur 8,5 mm/s. Die Ergebnisse hierbei werden erklärt mit dem vertikal geprägten Bioporensystem, das in Abhängigkeit von dem Bodenmaterial bis zu 2 m tief in den Boden reichte und damit in der Lage war, erhebliche Niederschlagsmengen im Bodenkörper zügig abzuführen.

MOSTAGHIMA ET AL. (1987) fanden bei Beregnungsversuchen, die in der Tab. 26 wiedergegebenen Abflusswerte in Abhängigkeit von dem Bestockungsgrad und von der Bodenbearbeitung. Die Böden bestanden aus schluffigem Lehm und zeichneten sich durch einen gut durchlässigen Ah-Horizont und einen schwach durchlässigen B-Horizont aus. Inwieweit die Ergebnisse durch Randeffekte bei der 0,6 m² großen Beregnungsfläche in Bezug auf laterale Abflussbewegungen innerhalb des Ah-Horizontes über dem B-Horizont beeinflusst wurden, kann nicht beurteilt werden. Die Ergebnisse zeigen eine Abnahme der Abflusshöhe und der Spitzenabflüsse mit zunehmendem Bestockungsgrad, wobei die Abflusshöhe bei der konventionellen Bodenbearbeitung um die Hälfte und bei der unbearbeiteten sogar um $\frac{3}{4}$ vermindert wurde. Die Abflussreduzierung der konservierenden Bodenbearbeitung zeigte sich nicht nur in einer verminderten Gesamtabflusshöhe, sondern auch in einer Verminderung des Spitzenabflusses und in einer Verzögerung des Abflussbeginns (vgl. Tab. 26). Die Abflusshöhe kann mit der konservierenden Bodenbearbeitung um 87 bis 99 % gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung gesenkt werden.

Bestockungsgrad	Art der Bodenbearbeitung	Abflusshöhe [mm]	max. beobachteter Spitzenabfluss [mm * h ⁻¹]	Zeit des Abflussbeginns [min]	Abflussabnahme durch Nichtpflügen	
					[mm]	[%] vom Regen
0 kg ha ⁻¹	NT	4,5	17	8	31	62
	CT	35,5	51 ²	2		
750 kg ha ⁻¹	NT	2,6	09	12	30,1	60,2
	CT	32,7	34	5		
1500 kg ha ⁻¹	NT	0,2	1	17	17,8	35,6
	CT	18,0	26	7		
Mittelwert	NT	2,4	17 ¹	12	26,3	52,6
	CT	28,7	51 ^{1,2}	5		

Tab. 26 Effekte verschiedener Bestockungsgrade und Bodenbearbeitungsmethoden bei künstlicher Beregnung auf verschiedene Parameter des Oberflächenabflusses (MOSTAGHIMA ET AL., 1987)

NT = unbearbeitet; CT = konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug und Egge; Beregnungsdauer: 60 Minuten; Beregnungsintensität: 50 mm * h⁻¹; ¹ maximal beobachteter Spitzenabfluss; ² Dieser Wert muss sich auf eine Beregnungsdauer von 2 Stunden beziehen, da sonst der Spitzenabfluss größer als der applizierte Regen wäre

Substrat	Anfangsbodenfeuchte	Art der Bodenbearbeitung	Infiltration [% vom R]	Oberflächenabfluss [% vom R]	Oberflächenabfluss [mm]	Oberflächenabflussreduzierung	
						[mm]	[%]
sandiger Lehm	tro	konv	55,4	44,6	18,7	15,4	36,7
		kons ¹	92,1	7,9	3,3		
	feu	konv	32,9	67,1	28,2	16	38
		kons ¹	70,9	29,1	12,2		
Lehm	tro	konv	94,0	6,0	2,5	2,5	5,9
		kons ²	99,9	0,1	0,0		
	feu	konv	63,8	36,2	15,2	14,1	33,6
		kons ²	97,4	2,6	1,1		

Tab. 27 Effekte verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden bei künstlicher Beregnung auf den Oberflächenabfluss / die Infiltration (Originaldaten aus SCHMIDT ET AL., 2001)

Beregnungsfläche: 44 m², R = Regen (gesamt), Regenintensität: 0,7 mm * min⁻¹, Beregnungsdauer: 1 h, ¹ Mulchbedeckung 60 %, ² Mulchbedeckung 10 %, Oberflächenabfluss und Infiltration ergeben 100 %, tro / feu = Regensimulation auf trockenem / feuchtem Boden

Weiterhin belegen die Untersuchungen von SCHMIDT ET AL. (2001) die deutliche Reduzierung des Oberflächenabflusses der konservierenden Bodenbearbeitung gegenüber der konventionellen. Tab. 27 zeigt hierzu Infiltrationsverläufe verschiedener Bodenbearbeitungssysteme. Im Vergleich zur konservierenden Bodenbearbeitung zeigt der Infiltrationsverlauf bei konventioneller

Bodenbearbeitung schon nach zwei Minuten eine deutliche Abnahme der Infiltrationsrate und insgesamt kann der Boden, der konservierend bewirtschaftet wird, deutlich mehr Wasser aufnehmen während des Beregnungsversuches. In Tab. 27 sind die Ereignisse von Beregnungsversuchen auf sandigem Lehm- und auf Lehm-Böden dargestellt (SCHMIDT ET AL., 2001). Bei der Variante konservierende Bodenbearbeitung vermindert sich der Anteil des Oberflächenabflusses um 57 bis 98 % gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung. In absoluten Zahlen macht dies eine Oberflächenabflussverminderung von 2,5 bis 16 L * m² (im Mittel 12 l * m²) aus.

SCHMIDT UND MITARBEITER (zitiert aus DBU, 2002) weisen darauf hin, dass sich die positive Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung auf die Verminderung des Oberflächenabflusses nicht signifikant im ersten Jahr nach einer Umstellung von konventioneller Bodenbearbeitung nachweisen lässt. Erst bei mehrjähriger konservierenden Bodenbearbeitung treten signifikante Unterschiede auf. Die Differenzen streuen in einem weiten Bereich und liegen zwischen -13,7 (Abflussverstärkung) und 23,2 mm (Abflussverminderung). Der Median der Differenzen beträgt 4,6 mm. Das dazugehörige Konfidenzintervall von +4,2 bis +7,1 mm liegt vollständig im positiven Bereich (Abflussverminderung). Bei einer mehrjährigen Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung infiltrierten im Mittel 12 % (11,1 bis 18,7 %) mehr vom simulierten Niederschlag (38 mm in 20 min) als bei der konventionellen Bodenbearbeitung in den Boden.

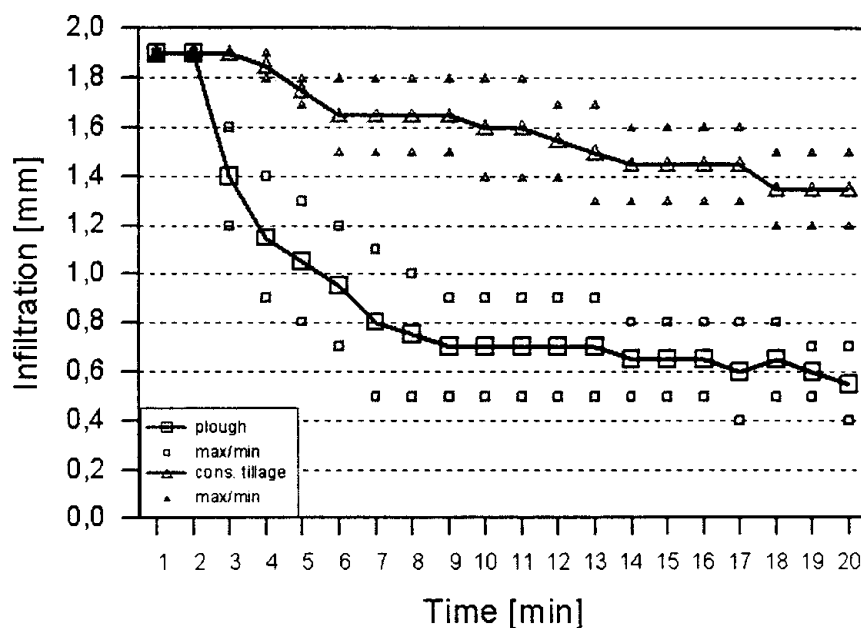


Abb. 24 Infiltrationsverlauf von Beregnungsversuchen auf Ackerland mit konventioneller sowie mit konservierender Bodenbearbeitung (SCHMIDT ET AL., 2001)
 Beregnungsfläche: 1 m², Beregnungsintensität: 1,9 mm * min⁻¹, Beregnungsdauer: 20 min, Substrat: sandiger Lehm

Große Unterschiede im Infiltrationsverhalten zwischen den Bodenbearbeitungssystemen konservierende und konventionelle Bodenbearbeitung konnten damit nachgewiesen werden. Darüber hinaus existieren auch Unterschiede innerhalb eines Bearbeitungssystems. So zeigten die Infiltrationsver-

läufe zweier unterschiedlich konservierend bearbeiteter Varianten, die direkt nebeneinander angelegt worden waren deutliche Unterschiede. Auf einer der beiden Varianten wurde zusätzlich zur normalen oberflächigen Grundbodenbearbeitung (Grubber, 10 cm tief) eine Lockerung mit Gänsefußscharen bis zu 20 cm Tiefe durchgeführt. Obwohl bereits durch eine konservierende Bodenbearbeitung ohne diese zusätzliche Lockerung eine Verbesserung der Infiltration gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung erreicht wurde, konnte die Infiltration durch die Lockerung nochmals um ca. 8 mm (entspricht ca. 21 % des Gesamtniederschlages) gesteigert werden (DBU, 2002).

Darüber hinaus zeigten sich große Unterschiede innerhalb einer Bearbeitungsvariante und Fruchtart, wenn die Beregnungsversuche zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden (DBU, 2002). Beispielsweise infiltrierte auf einem konventionell bearbeiteten Acker im November zeitnah nach der Bodenbearbeitung das gesamte applizierte Niederschlagswasser. Die Bodenoberfläche war zu diesem Zeitpunkt noch nicht durch natürliche Niederschläge verschlämmt. Im Gegensatz hierzu konnte der selbe Boden bei Beregnungsversuchen im April nur 38 % des Niederschlagswasser aufnehmen (DBU, 2002).

Die Effekte der Maßnahmen, die zu einer Verminderung / Vermeidung von Bodenverdichtungen beitragen, können wie folgt quantifiziert werden. Bodenverdichtungen bewirken nicht nur eine starke Verringerung des vor allem wasser- und luftführenden Grobporenanteils. Nach Messungen von EHLERS (2003) verminderte sich beispielsweise die hydraulische Leitfähigkeit im Bereich der Krumbasis (29 bis 36 cm) schon nach einer einzigen Überrollung mit einer Radlast von 5 t von etwa 50 cm/d auf 10 cm/d. Bei drei weiteren Überrollungen konnte nur noch eine hydraulische Leitfähigkeit von 1 cm/d gemessen werden. Hinzu kommt, dass die Abnahme des Porenanteils von $> 5 \mu\text{m}$ weiten Poren (KRETSCHMER, ET AL., 1994) nicht nur die Grobporen betrifft, sondern auch einen beträchtlichen Anteil der für die Feldkapazität wichtigen Mittelporen. Allein durch eine Vermeidung von Pflugsohlenverdichtungen könnte ein zusätzliches Speichervolumen von $3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ geschaffen werden. Eine Verringerung bzw. Vermeidung von Bodenverdichtungen bewirkt damit eine Verbesserung der Infiltrationsbedingungen und zugleich eine Steigerung des Wasserspeichervermögens.

8. Beurteilung der Wirksamkeit und Wechselwirkungen von Maßnahmen auf der Flussgebietsskala

In diesem Kapitel sollen die zuvor für einzelne Parzellen beschriebenen Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Steigerung der Infiltration auf ihre hochwasserreduzierende Wirkung auf der Flussgebietsskala beurteilt werden. Bei den vorherigen Betrachtungen lag die vereinfachte Annahme zu Grunde, dass das Retentionsvermögen der landwirtschaftlich genutzten Flächen vor allem durch Verbesserung der Infiltrationsbedingungen, etwa durch Minimierung von Bodenverdichtungen, Verschlammungen und Bodenerosion gesteigert werden kann, und damit der Anteil des schnell abflusswirksamen Oberflächenabflusses stark verringert wird.

Damit die Wirksamkeit der beschriebenen Maßnahmen hinreichend beurteilt werden kann, müssen bei der Betrachtung auf der Flussgebietsskala zusätzliche Phänomene Beachtung finden. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die hypodermische Abflusskomponente (der Zwischenabfluss). Diese ist besonders wichtig, da sich die hochwassererzeugende Wirkung eines Niederschlagsereignisses im Wesentlichen aus den beiden Komponenten Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss zusammensetzt. Die Beurteilung der Wirkung des Zwischenabflusses kann nicht mehr auf der Parzellenebene stattfinden, da sich Abflussvorgänge im Gegensatz zur Bewirtschaftung nicht an Parzellengrenzen ausrichten. Es muss nun der Frage nachgegangen werden, inwieweit das durch die beschriebenen Bewirtschaftungsmaßnahmen verbesserte Retentionsvermögen der landwirtschaftlich genutzten Flächen wirksam ist bzw. inwieweit die Wirksamkeit dieser Maßnahmen vermindert wird durch z. B. im Boden vorhandene schnelle präferenzielle Fließwege bzw. durch das Ausdrücken von Altwasser. Kann im Extremfall der Zwischenabfluss in seinem Ausmaß und seiner Geschwindigkeit Größenordnungen annehmen, die denen des Oberflächenabflusses entsprechen und damit die hochwasserreduzierende Wirkung zunichte machen?

Bevor diesen Fragen nachgegangen wird, soll hier kurz auf die Komplexität des Abflusskonzentrationsprozesses, der die Form der Abflussganglinie eines Gewässerabschnitts während einer bestimmten Witterungsperiode zur Folge hat, hingewiesen werden. Bei der Bildung des Abflusses sind vielfältige meteorologische, hydrologische und bodenkundliche Prozesse und Prozessgrößen beteiligt, die sich zum Teil durch vielfältige Rückkopplungen gegenseitig beeinflussen. Abb. 25 zeigt schematisch Beispiele für mögliche Einflussgrößen auf die Abflusskonzentration und damit auf die Form der Abflussganglinie. Auf der linken Seite der Abbildung sind variable, meteorologische Eingangsgrößen beispielhaft dargestellt, wie die Intensitätsverteilung innerhalb eines Niederschlagsereignisses (Abb. 25-1), der Einfluss einer ungleichmäßigen Überregnung (Abb. 25-2) sowie die unterschiedliche Durchzugsrichtung eines Niederschlagsfeldes (Abb. 25-3). Auf der rechten Seite der Abb. 25 sind Beispiele für den Einfluss von festen Gebietseigenschaften dargestellt, wie der Einfluss der unterschiedlichen Lage einer stärker abflussfördernden Fläche (Abb. 25-4), der Einfluss der topologischen Struktur der Flussgebiete (Abb. 25-5) und der Einfluss der Flussdichte (Abb. 25-6).

Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl von Einflussgrößen, die die Art des Gerinneabflusses vorgeben. Je nach Kombination der Einflussfaktoren ergeben sich unendlich viele Möglichkeiten

der Abflussganglinie. Es ist daher im Ausnahmefall auch möglich, dass ansonsten sehr effektiv

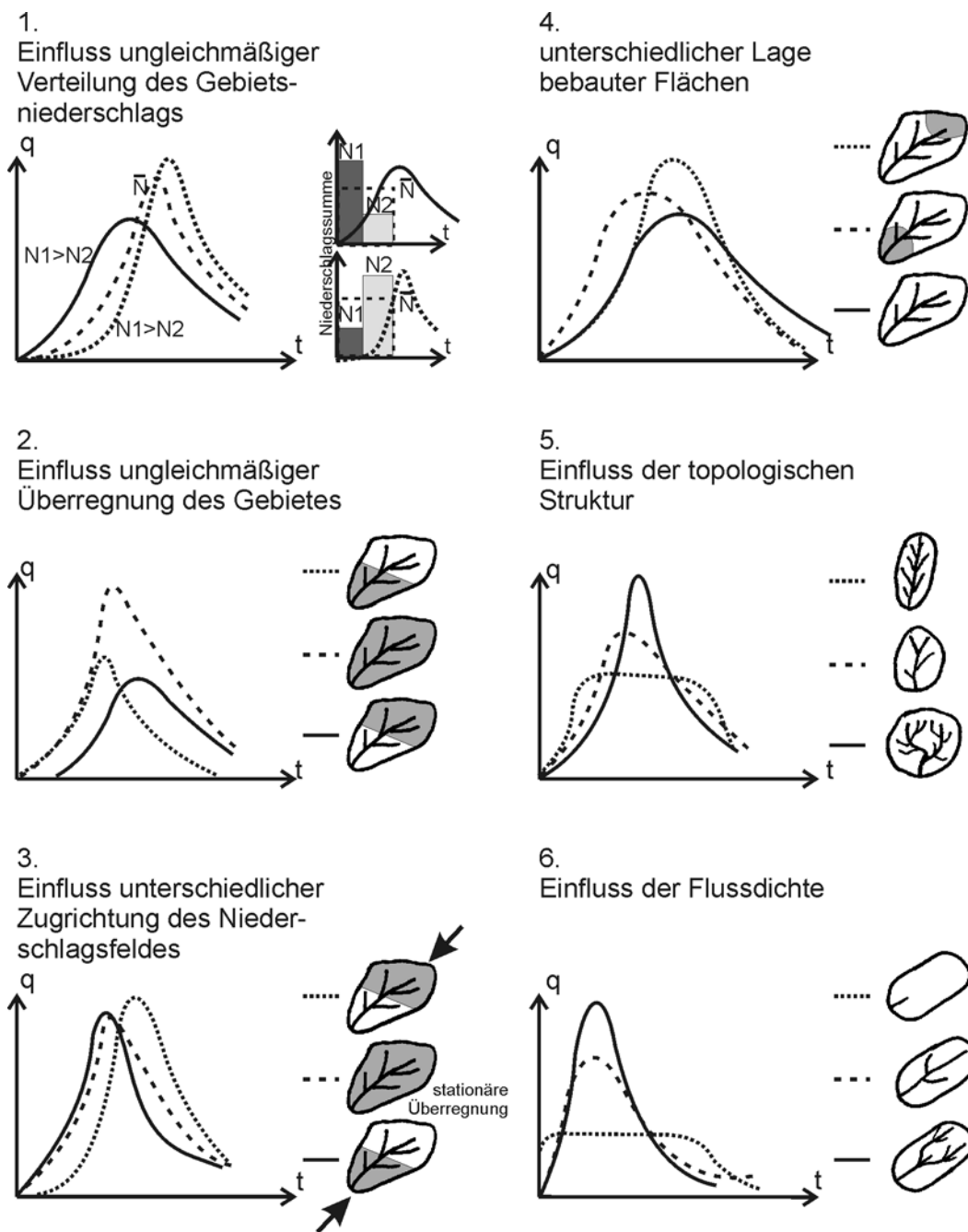


Abb. 25 Schematisch dargestellte Beispiele von Einflussgrößen auf die Form der Ganglinie in einem Gewässer (auf der Grundlage von DYCK & PESCHKE, 1995)

wirkende Hochwasserschutzmaßnahmen bei einer ungünstigen Kombination der natürlichen Bedingungen unwirksam werden oder sich sogar hochwasserfördernd auswirken. So wäre es zum Beispiel denkbar, dass die stark abgeflachte und verzögerte Abflussganglinie eines Gebietes, in dem durch Bewirtschaftungsmaßnahmen ein stark verbessertes Retentionsvermögen erzielt wurde, nun mit einer Abflusswelle eines anderen Gebietes zusammentrifft und beide sich zu einem schadbringenden Hochwasserereignis addieren. Dies wäre nicht passiert, wenn in diesem Fall das Wasser durch die Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht in dem Gebiet zurückgehalten worden wäre. Der

größte Anteil des Wassers wäre so schnell abgeflossen, dass er sich nicht mit dem Abfluss des anderen Gebietes hätte addieren können und es somit nicht zu einem schadbringenden Hochwasserabfluss gekommen wäre.

Hochwasserprobleme durch Überlagerungen von Abflusswellen von Haupt- und Nebenflüssen sind kein seltenes Phänomen. Die Ursache ist häufig ein Verlust an Retentionsräumen bzw. eine Veränderung der Gerinnegeometrie, die in einem der beiden Gewässer zu einem beschleunigten Abfluss führen. Das bekannteste Beispiel für Hochwasserentstehung bzw. Hochwasserverschärfung durch Überlagerung von Abflusswellen ist der Rhein. Durch Verkürzung der Laufstrecke und drastische Verminderung der Retentionsräume am Oberrhein kommt es zu einer starken Aufsteilung und Beschleunigung der Hochwasserwelle, die dann mit den Abflusswellen der Nebenflüsse zusammen trifft (VIESER, 1985).

Dass das Zusammenspiel der verschiedenen Teilabflüsse in größeren Einzugsgebieten für die Entstehung von Extremfluten entscheidend ist, konnte ENGEL (1997) am Beispiel der neun größten Hochwasser nach 1925 am Pegel Köln verdeutlichen. Ordnet man diese Hochwasser gemäß ihren Scheitelabflüssen absteigend und fügt die jeweilige Rangzahl der Abflussfülle hinzu, so zeigt sich, dass die Rangzahlen der Scheitel und der Füllen stark voneinander abweichen können: Das Hochwasser mit der größten Fülle (1988) hat einen Scheitelabfluss mit Rang 8 und das Hochwasser mit dem größten Scheitelabfluss (1925/26) erreicht nur Rang 3 hinsichtlich seiner Fülle (Tab. 28). Dies oft unterschätzte Phänomen einer komplexen Wellenüberlagerung haben HORAT ET AL. (1997) am Beispiel des extremen Hochwassers 1991 im Einzugsgebiet der Schüss (213 km², Schweiz) untersucht. Die im Modell simulierten Kombinationen der Faktoren Niederschlag,

Ereignis	Scheitelabfluss		Fülle	
	m ³ * s ⁻¹	Rang	Mrd. m ³	Rang
1925/26	11.100	1	9,4	3
1995	11.000	2	8,0	4
1993/94	10.800	3	7,4 *	5
1947/48	9.950	4	10,3	2
1983 (5)	9.910	5	3,5	9
1970	9.740	6	4,2	8
1983 (4)	9.690	7	4,2	7
1988	9.580	8	10,8	1
1955	9.550	9	6,9	6

Tab. 28 Die neun größten Scheitelabflüsse am Pegel Köln seit 1926 und die Abflussfüllen dieser Wellen oberhalb der jeweiligen Basisabflüsse (ENGEL, 1997)
 (* nur Hauptwelle)

Schneesmelze und Frost konnten als Folge der ungünstigen Überlagerungen der Zubringerdurchflüsse zu einer um 70 % höheren Abflussspitze führen. Der hier angesprochene Prozess des Ablaufs und der Überlagerung von Hochwasserwellen wird von Gerinneigenschaften dominiert, er ist im Maßstabbereich großer Einzugsgebiete angesiedelt.

Im Weiteren soll das Prozessgeschehen des Zwischenabflusses näher betrachtet werden. Es wird der am Anfang dieses Kapitels aufgeworfenen Frage nachgegangen, inwieweit die verbesserte Retentionswirkung durch die in Kap. 5 beschriebenen angepassten Bewirtschaftungsmaßnahmen durch z. B. im Boden vorhandene schnelle präferenzielle Fließwege bzw. durch das Ausdrücken von Altwasser vermindert wird. Unter präferenziellen Fließwegen werden Leitbahnen im Boden verstanden, in denen das Wasser im Verhältnis zur restlichen Bodenmatrix ungehinderter fließen kann. Der Preferential flow (auch Makroporenfluss), also die Wasserbewegung in den präferenziellen Leitbahnen wird vor allem durch die Schwerkraft und nicht durch die Matrixkräfte des Bodens induziert und kann daher im Verhältnis zur Wasserbewegung im restlichen Boden erheblich schneller sein.

Preferential flow findet in der Regel in einem kleinen Anteil des zur Verfügung stehenden Porenraums statt. Es können nach DEMUTH & HILTPOLD (1993) verschiedene Fließsituationen unterschieden werden, die auf die folgenden Bedingungen zurückgeführt werden können:

- unterschiedlich durchlässige / mobile Regionen in Böden aufgrund örtlicher Variabilitäten,
- strukturierte Böden mit großen Rissen, Poren (z. B. Regenwurmgingen) und Ähnlichem,
- instabiler Fluss, hervorgerufen durch Dichte- und Viskositätsunterschieden zwischen infiltrierendem und vorhandenem Wasser, durch eingeschlossene bzw. entweichende Luft, durch hydrophobes Bodenmaterial oder durch Schichtung unterschiedlich durchlässigen Bodenmaterials.

Lange Zeit ging man nahezu uneingeschränkt von einer vorwiegend Bodenmatrix-gesteuerten Wasserbewegung aus, obwohl es schon sehr früh Hinweise auf die überaus große Bedeutung des Makroporenflusses auf den Infiltrationsprozess (z. B. SCHUMACHER, 1864; LAWES ET AL., 1882) gab. Bei der durch die Bodenmatrix gesteuerten Wasserbewegung bilden sich im Boden nach einem Überstau mit Wasser theoretisch vier unterschiedliche Zonen aus, wie Abb. 26 zeigt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992). Direkt unter der Bodenoberfläche erreicht der Boden aufgrund des infiltrierten Wassers Sättigung. Diese Sättigungszone ist allerdings einschließlich der darunter befindlichen Übergangszone meist nur wenige Zentimeter mächtig. Es schließt sich die Transportzone an, deren Länge bei Wassernachlieferung kontinuierlich zunimmt. Unterhalb der Transportzone befindet sich die Befeuchtungsfront, die weiter in den Boden vordringt. Diese Vorstellung des Infiltrationsprozesses und der Wasserbewegung wurde modelltechnisch mit dem sogenannten Infiltrationsansatz nach GREEN & AMPT (1911) beschrieben (Abb. 26, rechts). Diesem Ansatz liegt die vereinfachte Vorstellung zu Grunde, dass das Niederschlagswasser kolbenförmig in den Boden eindringt und hierbei den verfügbaren Porenraum vollständig ausfüllt (HARTGE, 1991). Bei vielen Modellen zur Niederschlags-Abfluss-Simulation und auch bei physikalisch begründeten Erosionsmodellen wie z. B. CREAMS, WEPP und Erosion 2D / 3D ist dieser erheblich vereinfachte Infiltrationsansatz verwendet worden. Die Bodenwasserbewegung mittels schnell durchlässigen präferenziellen Fließwegen wird bei dem soeben beschriebenen Ansatz der Bodenwasserbewegung nach

GREEN & AMPT (1911) nicht berücksichtigt. Heute ist aus vielen Labor- und Felduntersuchungen bekannt, dass beträchtliche Anteile des in den Boden versickernden Wassers durch diese präferentiellen Fließwege schnell in und auch durch den Boden geleitet werden können. Der Kenntnisstand hierzu wird vor allem bei DEMUTH & HILTPOLD (1993), WHITE (1985) und BEVEN & GERMANN (1982) zusammengefasst. Die Traceruntersuchungen von ROTH ET AL. (1991) sollen beispielhaft die Wirkung des Preferential flow auf den Infiltrationsprozess aufzeigen. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass Teile des applizierten Tracers bereits nach einer Infiltrationsmenge von 31 mm in eine Tiefe von mehr als 2 m gelangen. Die Autoren gingen davon aus, dass während des gesamten Experiments 58 % des Tracers über präferentielle Fließbahnen in tiefere Regionen des Bodens gelangte.

Die Traceruntersuchungen von ROTH ET AL. (1991) verdeutlichen den bedeutenden Einfluss des Makroporenflusses vor allem auf die Versickerungsgeschwindigkeit und die Tiefenwirkung bei der Versickerung. Sollen die Phänomene des Makroporenflusses quantifiziert werden, so ergeben sich mehrere Probleme. Makroporenfluss findet nicht in jedem Boden statt. Es ist zumindest derzeit noch nicht möglich, anhand von Beobachtungen und Messungen Makroporenfluss zu prognostizieren. Dieser unterliegt einer besonders hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität. Abb. 27 verdeutlicht die hohe räumliche Variabilität im Vergleich mit der Variabilität des Mikroporensystems. Liegen die repräsentativen Elementarvolumina für das Mikroporensystem noch im Zentimeter-Bereich, so liegen sie für das Makroporensystem schon im Meter bis Zehn-Meter-Bereich. Die große räumliche Variabilität des Makroporenflusses wird auch aus Abb. 28 und Abb. 29 ersichtlich.

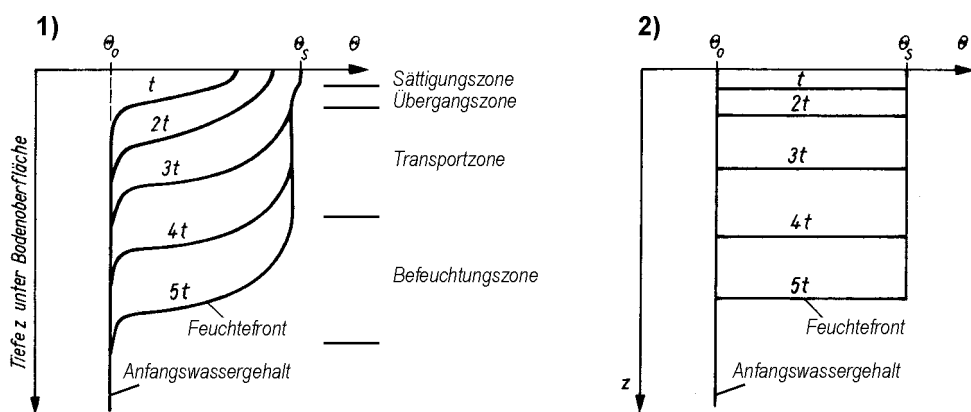


Abb. 26 Modellvorstellung der Infiltration und der Bodenwasserbewegung eines überstauten Mineralbodens, ohne Berücksichtigung von Preferential flow

1) experimentell ermittelte Wasserbewegung mit Angabe der verschiedenen Zonen, 2) Modellvorstellung nach Green & Ampt – Modellansatz (nach DYCK & PESCHKE, 1995).

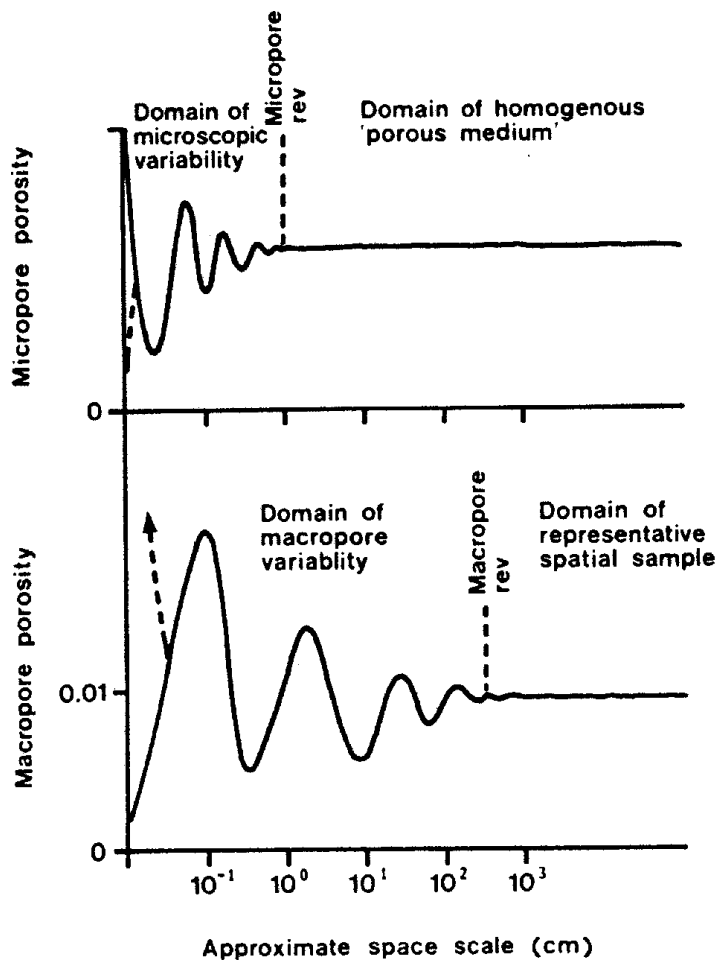
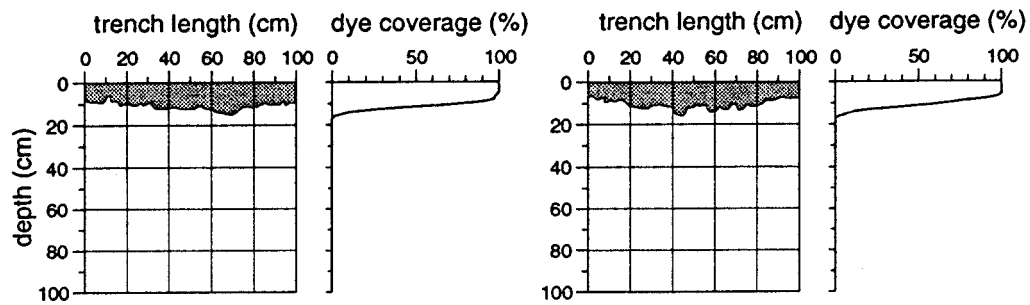


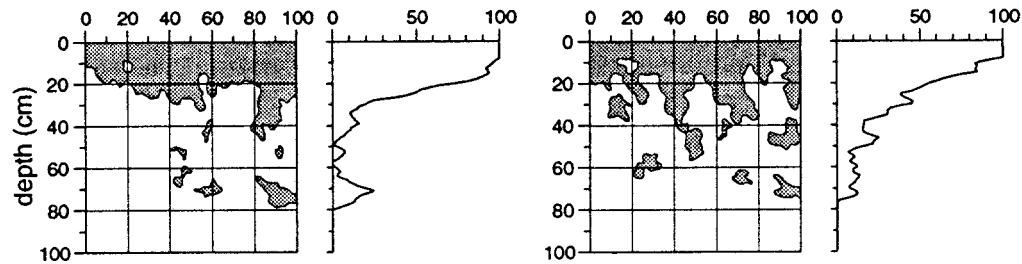
Abb. 27 Vergleich der Variabilität des Mikroporensystems mit dem Makroporensystem nach dem Konzept der repräsentativen Elementarvolumina (representative elementary volume = rev). (Beven & Germann, 1981)

Deutlich wird die besonders hohe räumliche Variabilität des Makroporensystems

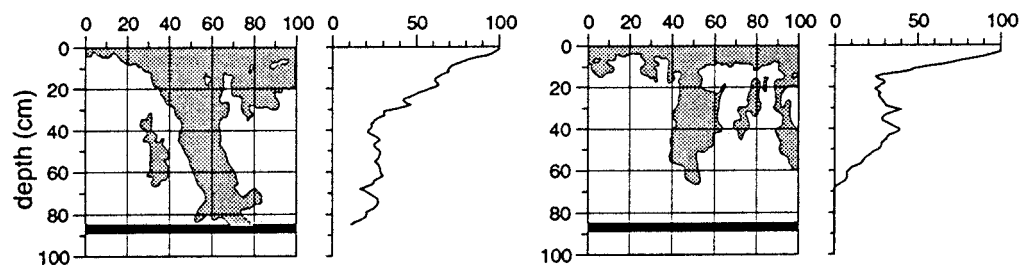
Um einen Einblick zu bekommen, welche Flächenrelevanz dem Makroporenfluss beizumessen ist, soll hier auf die Untersuchungen von FLURY & FLÜHLER (1994) hingewiesen werden. Sie untersuchten das Vorkommen von Makroporenfluss auf 14 repräsentativen, landwirtschaftlich genutzten Böden der Schweiz, indem sie 1,4 m² große Flächen mit dem Farb-Tracer Brilliant Blue bei unterschiedlichen Anfangsbodenwassergehalten beregneten und die Bodenverfärbungen auswerteten. Es zeigte sich, dass die meisten Böden Makroporenfluss aufwiesen. Die Eindringtiefe des Farbtracers variierte stark, wobei sie bei einigen Böden nur in den oberen 0,5 m und bei anderen Böden bis 1 m Tiefe (maximale Beprobungstiefe) anzutreffen war. Gut strukturierte Böden wiesen im Gegensatz zu weniger strukturierten stärkeren Makroporenfluss auf, wobei der Tracer schneller und tiefer in den Boden eindrang. Der Anfangswassergehalt machte sich bei einigen Böden schwach bemerkbar, indem der Farbtracer in feuchteren Böden tiefer in das Profil eindrang. Er zeigte aber bei den meisten Böden keinen Effekt auf den Makroporenfluss. Wurde statt mit Beregnung das Wasser durch einen Überstau appliziert, so zeigte sich von der Tendenz her eine stärkere Neigung zum Makroporenfluss.



Profil 1: "Les Barges", Structure grade: structureless; Structure Type an Class: fine granular, 1-2 mm



Profil 2: "Mettmenstetten" Structure grade: 5-15 cm depth moderate, 40-105 cm weak Structure Type an Class: 5-15,40-50 cm medium granular, 2-5 mm; 70-105 cm coarse granular, 5-10 mm



Profil 3: "Obermumpf" Structure grade: moderate, Structure Type an Class: 5-15 cm medium crumb, 2-5 mm; 40-50, 55-65 cm very coarse blocky, >50 mm

Abb. 28 Makroporenfluss - Beispiele für die Variabilität des vertikalen Verteilungsmuster des Brilliant Blue Tracers bei drei verschiedenen Böden (nach FLURY & FLÜHLER, 1994)

Dargestellt sind jeweils zwei verschiedene Profilschnitte (links und rechts) an ein und dem selben Boden zur Verdeutlichung der Variabilität innerhalb eines Bodens. Beim untersten Boden zeigt der dicke horizontale Strich die maximale Ausgrabungstiefe an, die bei den oberen Böden bei 1,0 m lag.

Für den Infiltrationsprozess bedeutet Preferential flow, dass die Infiltrationskapazität eines Bodens erheblich gesteigert werden kann. Makroporen wie z. B. Regenwurmgänge, die an der Bodenoberfläche enden, können sogar direkt Wasser von der Bodenoberfläche aufnehmen. Bei der konservierenden Bodenbearbeitung kommen diese Effekte zum Tragen, indem sie zum Beispiel günstige Lebensbedingungen für die makroporenbildende Regenwurmfauna schaffen oder beispielsweise durch Verzicht auf eine wendende Bodenbearbeitung dafür sorgen, dass vorhandene Makroporen nicht zerstört werden und eine Kontinuität gewährleistet ist. Das Wasser, welches sich in den Makroporen befindet, kann schnell in größere Tiefen transportiert, bzw. durch die Porenwandung an die Bodenmatrix weitergegeben werden. Makroporen können damit den Anteil des Oberflächenabflusses stark vermindern oder sogar ganz unterbinden.

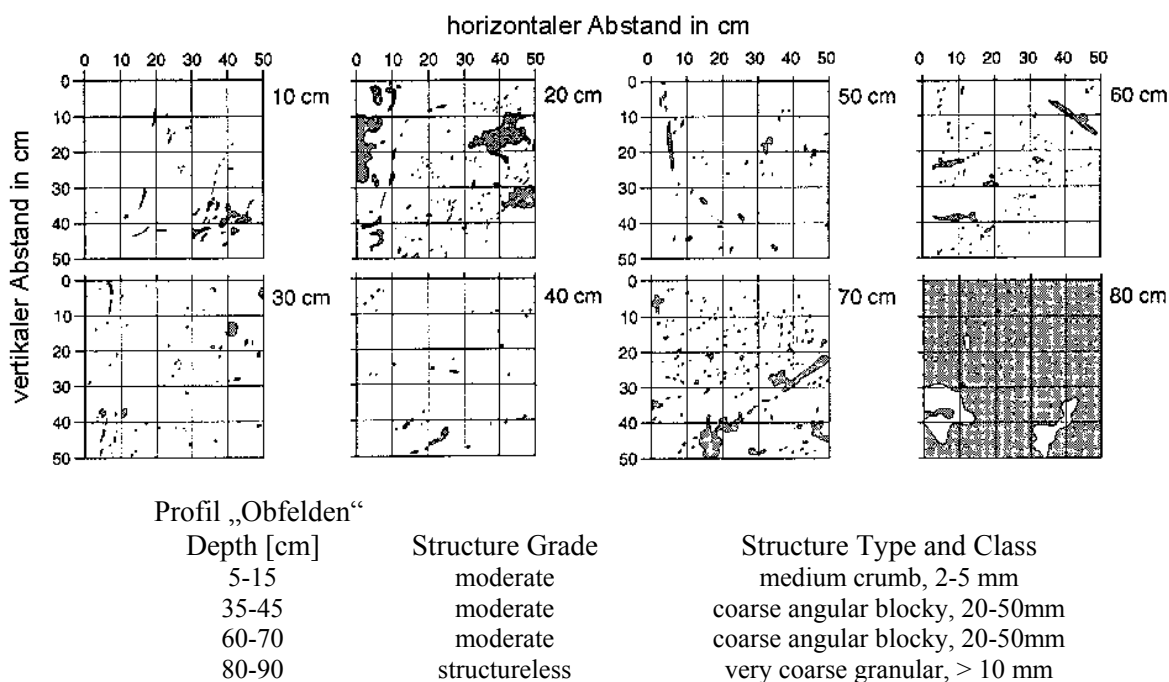


Abb. 29 Hohe räumliche Variabilität des Makroporenflusses innerhalb eines Bodens (nach FLURY & FLÜHLER, 1994)

Dargestellt ist das horizontale Verteilungsmuster des wiedergefundenen Tracers Brilliant Blue nach einer künstlichen Beregnung in verschiedenen Tiefenlagen.

Um eine Vorstellung zu bekommen, mit welchen Geschwindigkeiten Wasser mit Hilfe des Preferential flow innerhalb eines Hangsegmentes transportiert werden kann, sollen hier in der Literatur beschriebene Beispiele für Fließgeschwindigkeiten aufgezeigt werden. MOSLEY (1982) beobachtete zum Beispiel mittlere Geschwindigkeiten beim Makroporenfluss von 0,0089 m/s (84.672 cm/d) und extreme von 0,0208 m/s (179.712 cm/d). RAHE ET AL. (1978) fanden Fließgeschwindigkeiten von 0,0042 m/s (36.288 cm/d) und BEVEN (1980) von 0,005 m/s (43.200 cm/d) vor. NEWSON & HARRISON (1987) konnten sogar bei Traceruntersuchungen in natürlichen Röhren mittlere Fließgeschwindigkeiten von 0,06 bis 0,2 m/s (518.400 bis 1728.000 cm/d) messen. Bedenkt man, dass eine hydraulische Leitfähigkeit von > 300 cm/d nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (ARBEITSGEMEINSCHAFT BODEN, 1994) als äußerst hoch einzustufen ist, wird deutlich, in welchen Dimensionen der Makroporenfluss anzutreffen ist.

Makroporenfluss verbessert somit zum einen die Infiltrationsbedingungen, kann aber auch andererseits dazu beitragen, dass das Bodenwasser durch die präferentiellen Fließbahnen entweder als Zwischenabfluss oder über die schnelle Anhebung des Grundwasserspiegels zum Vorfluter gelangt. Er kann damit eine beschleunigte Abflusskomponente darstellen. Dass die unterirdischen Abflusskomponenten einen wesentlichen Anteil am Ausmaß des Abflussgeschehens nach einem Starkniederschlagsereignis haben, ist nicht nur aus Einzugsgebieten mit nur wenig oder keinem Oberflächenabfluss bekannt (z. B. ROESSEL, 1950; HEWLETT & HIBBERT, 1961, 1967; MOSLEY, 1979). Auch Untersuchungen der Abflussganglinien-Separation basierend auf Tracer-Untersuchungen bzw. unter Berücksichtigung der chemischen Eigenschaften des Regen-, Boden- und Grundwassers zeigen, dass das im Einzugsgebiet vorhandene Altwasser einen deutlichen Anteil am Abflussge-

schehen ausmacht (z. B. MARTINEC, 1975; SKLASH & FARVOLDEN, 1979; HERRMANN & STICHLER, 1980). Dabei ist es nicht unbedingt notwendig, dass das Altwasser direkt in den Vorfluter gelangt. Es kann auch als sogenannter return flow aus dem Boden exfiltrieren und dann als sekundärer Oberflächenabfluss zum Vorfluter fließen (DUNNE & BLACK, 1970; DUNNE, 1978).

Eine Erhöhung der unterirdischen Abflusskomponenten kann mit Hilfe des Makroporenflusses auf verschiedene Arten erfolgen. Zum einen kann infiltriertes Wasser direkt durch Makroporenfluss zum Vorfluter gelangen, wobei Abflussgeschwindigkeiten erreicht werden können, die denen des Oberflächenabflusses entsprechen (BEVEN & GERMANN, 1982). Zum anderen wird auch mit Hilfe der Makroporen das Ausdrücken von Altwasser gefördert. HEWLETT & HIBBERT (1967) sprachen hierbei vom „translatory flow“, bei dem durch infiltrierendes Wasser Altwasser aus dem Boden an hangabwärts gelegenen Stellen gedrückt wird. Die Makroporen stellen hierbei quasi kommunizierende Röhren dar. Darüber hinaus gibt es noch durch die Verdrängung von Bodenluft Druck-Effekte, die zu einem Ausdrücken von Altwasser führen können (DIXON & LINDEN, 1972; LINDEN & DIXON, 1975; RICHTIG, 1995).

In schlecht durchlässigen Böden kann Wasser mit Hilfe der Makroporen durch gering leitfähige Schichten hindurchgeleitet werden. Es kann dabei in gut durchlässige Schichten gelangen, in denen es zum Vorfluter fließt. So stellte beispielsweise GERMANN (1981) fest, dass in dem von ihm untersuchten Einzugsgebiet die Bodenoberfläche mit der im Untergrund liegenden durchlässigen Molasse über Wurzelkanäle hydraulisch verbunden war und somit das wenig durchlässige Moränenmaterial einer Infiltration und Ableitung des Wassers nicht im Wege stand.

Verschiedene Untersuchungen zeigen die Bedeutung des Zwischenabflusses an der Gesamtabflussbildung. FULLEN (1991) führte beispielsweise in einem Einzugsgebiet in Hilton (Wolverhampton, England) Abflussmessungen durch, bei denen der Oberflächenabfluss und der Zwischenabfluss verschiedener Bodentiefen aufgefangen und verglichen wurden. Die leicht bis mäßig steinigen, lehmigen Sandböden zeigten unter Grünlandnutzung im Gegensatz zur Ackernutzung fast keinen Oberflächenabfluss. Dieser lag nur etwa bei 0,12 % des Niederschlages. Es dominierten die unterirdischen Abflusskomponenten, wobei 98,8 % des Zwischenabflusses innerhalb des Ah-Horizonts zum Abfluss gelangte. Leider geben die Untersuchungen aber keine Auskunft über die Retentionswirkung des Zwischenabflusses.

Wie stark die verschiedenen Abflusskomponenten schon innerhalb von wenigen Tagen variieren können, zeigen beispielsweise die Untersuchungen von MAULÉ & STEIN (1990). Sie untersuchten mit Hilfe zweier Tracer die unterschiedlichen Abflusskomponenten im Frühling während der Schneeschmelze. Das 68 ha große Untersuchungsgebiet lag in Kanada. Es ist das Einzugsgebiet des Lac Laflamme, der sich ca. 80 km nördlich der Stadt Québec befindet. Abb. 30 zeigt eine Abflussganglinien-Separation des Untersuchungsgebietes für die Tage 29. April bis 11. Mai 1988. Aus dieser geht hervor, dass zum einen der Anteil des Altwassers einen bedeutenden Anteil an der Abflussbildung hat und zum anderen, dass die verschiedenen Abflusskomponenten schon innerhalb der 13 Tage stark variieren.

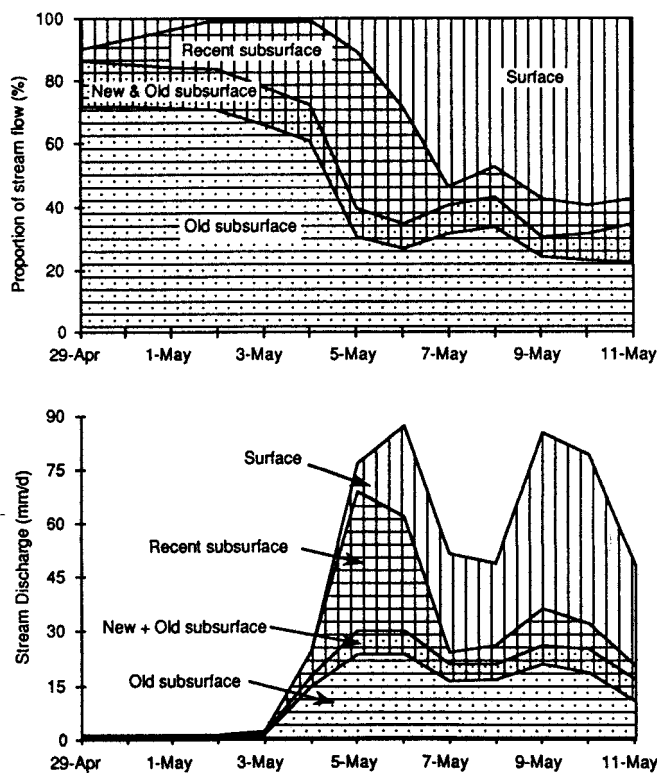


Abb. 30 Prozentuale Aufteilung der Abflusskomponenten (oben), sowie der Abflussganglinien Separation (unten) bei Schneeschmelze in einem Einzugsgebiet in Kanada (MAULÉ & STEIN, 1990)

Auch Untersuchungen in dem Einzugsgebiet Maimai an der West-Küste von Neuseeland weisen auf die hohe räumliche Variabilität der unterschiedlichen Abflusskomponenten und die vielfältige Funktion des Makroporenflusses hin (SKLASH ET AL., 1986; MCDONNELL, 1990; MCDONNELL ET AL., 1991). Die Autoren fanden heraus, dass die unterirdische Abflusskomponente mit 90 % des Gebietsausflusses völlig dominiert und diese vor allem aus Altwasser gebildet wird. Aktuelles Niederschlagswasser macht nur bei sehr extremen Niederschlagsereignissen einen bedeutenden Anteil aus und ist in der Regel völlig unbedeutend. Es zeigte sich, dass ca. 80 % des Abflusses aus Grundwasser und nur 12-16 % aus Bodenwasser bestand. Der Makroporenfluss ist in zweierlei Hinsicht von Bedeutung. Zum einen bewirkt er eine schnelle Ableitung von Niederschlagswasser innerhalb des Bodens. Sein Anteil wird im oberen Hangbereich auf 30-40 % geschätzt, wohingegen im Bereich des Tals der Anteil des Makroporenflusses zu neuem Niederschlagswasser auf 10 % zurückgeht. Inwieweit durch Makroporenfluss Altwasser ausgedrückt wird, ist nicht genau geklärt, liegt aber nahe. Zum anderen bewirkt der Makroporenfluss eine vertikale Weiterleitung von infiltriertem Niederschlagswasser in das Grundwasser und dadurch wiederum eine schnelle Reaktion des Grundwasserspeichers mit dem Ergebnis, dass der Grundwasserabfluss den Gebietsausfluss dominiert.

Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass bei der Betrachtung des Prozessgeschehens auf der Einzugsgebietskala im Gegensatz zu den Betrachtungen auf den einzelnen Schlägen die Prozesse der Abflussbildung in den Vorflutern und den Gewässern höherer Ordnung mit einbezogen werden müssen. Entscheidend sind hierbei nicht nur die Einflüsse beispielsweise durch den Witterungsverlauf oder durch die Form und Lage des Einzugsgebietes, sondern auch die oberirdischen und vor allem unterirdischen Fließwege zum Vorfluter. Wird durch eine angepasste Landbewirt-

schaftung dafür gesorgt, dass die Infiltrationsbedingungen, das Retentionsvermögen und die Makroporenkontinuität verbessert werden, so soll damit aus Sicht des Hochwasserschutzes vor allem der Anteil des Oberflächenabflusses verringert werden. Dies hat den Vorteil, dass der relativ schnell abflusswirksame Oberflächenabfluss minimiert wird und Bodenerosion und Verschlammungen zudem verringert werden. Die Maßnahmen wirken sich somit sowohl positiv auf die Verbesserung der Retentionseigenschaften als auch auf den Bodenschutz aus.

Die Reduzierung des Oberflächenabflusses hat in humiden Gebieten zwangsläufig eine Zunahme der unterirdischen Abflusskomponente bzw. eine gesteigerte Grundwasserneubildung zur Folge. Reagiert die Abflussganglinie eines Vorfluters auf ein Niederschlagsereignis, so wird dies bei geringem Oberflächenabfluss durch unterirdische Abflusskomponenten ausgelöst. Diese können durch die oben beschriebenen Phänomene des Makroporenflusses und durch das Ausdrücken von Altwasser verstärkt werden. Die Wirkungen und Wechselwirkungen von Matrixfluss und Makroporenfluss können dabei im Boden sehr komplex sein. Abb. 31 zeigt schematisch verschiedene Möglichkeiten des Makroporenflusses innerhalb eines Bodens. So gibt es hydraulische Verbindungen der Bodenoberfläche mit verschiedenen Bodentiefenbereichen und sogar Verbindungen der Bodenoberfläche mit dem Untergrund. Innerhalb des Bodens existieren präferentielle Leitbahnen bzw. Sättigungsabflüsse auf relativ dichter gelagerten Bereichen wie etwa der Pflugsohle eines konventionell bewirtschafteten Ackers oder auf einer relativ undurchlässigen Schicht im Untergrund. Zwischen den verschiedenen Bodenhorizonten kann zudem durch Makroporen das Wasser schnell abgeleitet werden. Durch Wechselwirkungen mit der Bodenmatrix kann sowohl Wasser in die Makroporen perkolieren als auch aus diesen in den Boden eindringen.

Das Vorhandensein von Makroporen sowie deren Kontinuität unterliegt einer sehr hohen räumlichen Variabilität. Es ist derzeit noch nicht möglich, anhand von Bodenparametern Informationen über das Vorhandensein von präferentiellen Fließwegen bzw. über das Ausmaß des Makroporenflusses abzuleiten. Auch messtechnisch bestehen heute noch erhebliche Schwierigkeiten, die Phänomene des Makroporenflusses zu erfassen. Dass es daher auch noch nicht möglich ist Modelle zu erstellen, mit deren Hilfe das Prozessverständnis gefördert werden kann bzw. die für die Berechnung von Szenaranalysen verwendet werden könnten, bedingt sich. Hieran ändern auch die vielen neu erstellen Modelle der jüngsten Vergangenheit nichts. Diese vernachlässigen entweder immer noch die präferentiellen Fließvorgänge oder sie leiden an einer unzureichenden Validierung. Es liegt daher nahe, dass auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Abschätzung der quantitativen Auswirkung des Makroporenflusses bzw. des Ausdrückens von Altwasser nicht geleistet und deshalb hier nur eine Beurteilung des Sachverhalts aufgezeigt werden kann.

Innerhalb der präferentiellen Fließwege im Boden kann das Wasser mit Geschwindigkeiten abfließen, die denen des Oberflächenabflusses entsprechen. Wie verschiedene Untersuchungen zeigten, gelangt aber in der Regel nur ein Teil des infiltrierten Niederschlagswassers hierdurch zum Vorfluter. Durch Wechselwirkungen zwischen Kapillarkräften der ggf. ungesättigten Bodenmatrix und dem Wasser in den Makroporen wird zudem der Anteil des Zwischenabflusses verringert. Darüber hinaus kann von Störungen der Porenkontinuität ausgegangen werden, so dass es auch zu Engpässen im Fließquerschnitt kommen kann. Diese Engpässe bewirken dann eine zusätzliche Retentionswirkung.

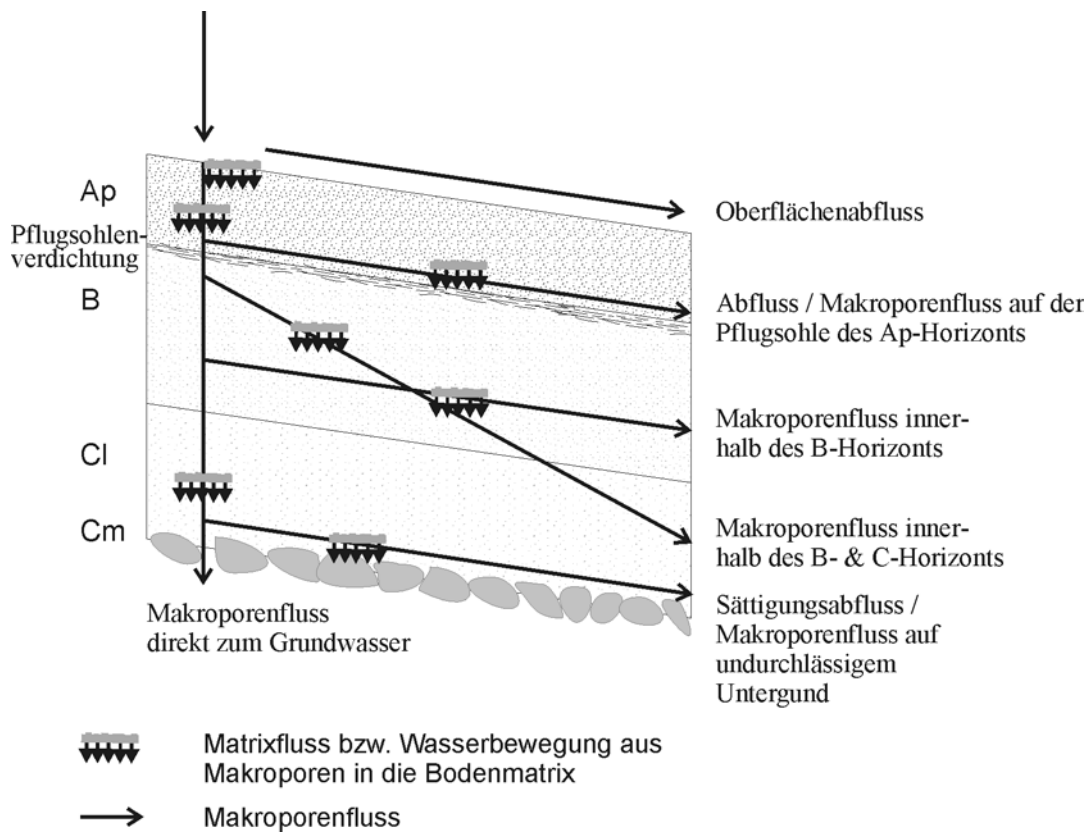


Abb. 31 Schematisch dargestellte Fließwege der Wasserbewegung in einem Boden mit Makroporen

Biogene Makroporen machen in vielen Böden den bedeutendsten Anteil an Makroporen aus, der infolge einer Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung zunimmt. Diese Makroporen verlaufen von der Tendenz her eher vertikal als horizontal. Auch aus diesem Grund werden beispielsweise für die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit mittels Stechzylinder die Stechzylinder horizontal entnommen, damit die gesättigte Durchlässigkeit der Bodenmatrix bestimmt werden kann und Makroporen die Messung nicht unmöglich machen. Die Folge der überwiegend vertikal verlaufenden Makroporen ist vor allem eine Erhöhung der Infiltrations- und Perkulationsrate in tiefere Bodenregionen.

Aus dem dargelegten Sachverhalt kann gefolgert werden, dass durch eine angepasste Landwirtschaft die Infiltrationsleistung erheblich gesteigert werden kann und somit deutlich mehr Wasser in den Boden infiltriert. Der Oberflächenabfluss wird dabei wirksam vermindert. Von dem infiltrierten Wasser wird je nach Faktorenkonstellation ein nach heutigem Stand des Wissens nicht quantifizierbarer Anteil überwiegend durch Makroporenfluss zum Teil mit erheblichen Geschwindigkeiten zum Vorfluter transportiert, der dann die Abflusswelle des Gebietsausflusses maßgeblich mit beeinflusst. Es ist aber davon auszugehen, dass wie oben im Text erläutert durch eine angepasste Ackernutzung die Retentionsleistung des Bodens insgesamt verbessert wird.

9. Fazit

Quantifizierung des Beitrags einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss

a) Quantifizierung der Reduzierung des Oberflächenabflusses

Bei den in der vorliegenden Arbeit in Kap. 5 behandelten Bewirtschaftungsmaßnahmen ist die Umstellung der konventionellen Grundbodenbearbeitung auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren für die Quantifizierung der Effekte auf den Hochwasserabfluss von sehr großer Bedeutung. Da die Gestaltung der Fruchtfolge eng mit der Wahl der Bodenbearbeitungsverfahren verknüpft ist und zudem vorwiegend von marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten geleitet wird, wird eine Quantifizierung hierfür nicht gesondert durchgeführt. Die Reduzierung bzw. Vermeidung von Bodenverdichtungen wirkt sich sowohl auf die Infiltrationseigenschaften als auch auf die Speichereigenschaften des Bodens aus. Die Effekte können hierbei nur schwer quantifiziert werden, da sie sich auf eine breite Palette von Maßnahmen beziehen. Insgesamt ergeben sich aber sehr positive Effekte auf die Hochwasserreduzierung, wie in Kap. 5.2 geschildert.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen aus Kap. 7.1 sind in Tab. 29 und Tab. 30 zusammengefasst. Grundlage für die Simulationsrechnungen waren die Daten aus dem Parameterkatalog aus Sachsen, die auf ein einheitliches Reliefmodell, dem nicht real existierenden Standortgebiet angewendet wurden (vgl. Kap. 7.1.2). Tab. 29 zeigt die Abflussreduzierung der konservierenden Bodenbearbeitung gegenüber der konventionellen für acht verschiedene Bodenverhältnisse in Abhängigkeit von der Regenintensität. Die Abflussreduzierung ist sowohl in absoluten Werten (in mm vom simulierten Niederschlag) als auch in relativen Werten (% vom simulierten Niederschlag) dargestellt. Nach den Berechnungen zeigt sich, dass mit zunehmender Niederschlagsintensität die Retentionswirkung der konservierenden Bodenbearbeitung größer wird. Je nach Bodenverhältnissen fällt diese zum Teil modellbedingte (vgl. Kap. 7.1.4) Zunahme unterschiedlich stark aus. Gemittelt über alle Bodenverhältnisse (Saatbettzustand) ergibt sich bei der konservierenden Bodenbearbeitung eine Abnahme der Oberflächenabflüsse um rund 28 % der Niederschlagsmenge. Das heißt, es kann bei Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung fast ein Drittel des Niederschlagswassers mehr zurückgehalten werden. Für die simulierten Niederschläge (vgl. Tab. 25) bedeutet dies eine mittlere Zunahme der Flächenretention von 10,8 L * m² (Minimal 4,8 L * m² und Maximal 27,4 L * m²). Auch die Berechnungen für verschiedene Bestockungsgrade (Tab. 30) liegen mit 13,0 L * m² (Minimal 5,1 L * m² und Maximal 18,6 L * m²) in dieser Größenordnung.

Aus der Literaturanalyse (vgl. Kap. 7.2) ergibt sich eine mittlere Abflussreduzierung der konservierenden Bodenbearbeitung gegenüber der konventionellen von 12 bis 52 % (bzw. 4,6 bis 26,3 mm) der Niederschlagssumme (Tab. 31). Bei dieser weiten Spanne handelt es sich nicht um Minimal- und Maximalwerte, sondern um die Spanne der Mittelwerte der einzelnen Untersuchungen, die miteinander verglichen wurden. Die absolute Streuung ist wesentlich größer. In Einzelfällen konnte sogar eine Abflussverstärkung beobachtet werden (SCHMIDT ET AL., 2001). Insgesamt kann aber von einer mittleren Oberflächenabflussreduzierung von 30 % ausgegangen werden. Die in Kap. 7.1 simulierten Oberflächenabflussvermindierungen liegen mit 28 % (bzw. 10,8 mm) etwa in der gleichen Größenordnung. Zwar können die absolut zurückgehaltenen Mengen nicht miteinander

Abflussreduzierung in mm bei der konservierenden Bodenbearbeitungsvariante zur konventionellen									
Wiederkehrzeit Niederschlag	Bodenarten der simulierten Varianten (vgl. Tab. 23)								Mittelw.
	[mm]								
	Lu	Sl2	Sl4	Slu	Su3	Uls	Us	Ut4	
100	9,9	22,0	27,4	19,8	11,8	10,8	10,9	18,6	15,1
50	9,4	16,4	18,7	12,6	8,8	14,9	5,3	16,9	12,9
20	4,8	11,2	12,7	6,7	3,9	11,5	3,3	8,9	7,9
10	4,9	7,7	10,6	9,4	6,1	8,9	5,1	5,1	7,2
Mittelw.	7,2	14,3	17,4	12,2	7,7	9,0	6,2	12,4	10,8
Abflussreduzierung in % der Niederschlagsmenge bei der konservierenden Bodenbearbeitungsvariante zur konventionellen									
Wiederkehrzeit Niederschlag	Bodenarten der simulierten Varianten (vgl. Tab. 23)								Mittelw.
	[%]								
	Lu	Sl2	Sl4	Slu	Su3	Uls	Us	Ut4	
100	15,2	33,8	42,0	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	32,5
50	16,8	29,5	33,7	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	28,4
20	11,6	27,0	30,7	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	25,5
10	15,9	24,9	34,2	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9
Mittelw.	14,9	28,8	35,2	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	27,8

Tab. 29 Abflussreduzierung bei der konservierenden Bodenbearbeitungsvariante gegenüber der konventionellen - Ergebnis der Simulationsrechnungen von Kap. 7.1 (oben: Angaben absolut [mm] und unten: Angaben relativ [%])

Wiederkehrzeit Niederschlag	Abflussreduzierung					
	in mm der Niederschlagsmenge [mm]			in % der Niederschlagsmenge [%]		
	Bodenbedeckungsgrad			Bodenbedeckungsgrad		
	0 - 10 % ¹	100 % ²	Mittelw.	0 - 10 % ¹	100 % ²	Mittelw.
100	18,6	18,0	18,3	33,8	27,6	30,7
50	16,9	18,5	17,7	29,5	33,3	31,4
20	8,9	10,3	9,6	27,0	24,8	25,9
10	5,1	7,8	6,5	24,9	25,1	25,0
Mittelw.	12,4	13,6	13,0	28,8	27,7	28,2

Tab. 30 Abflussreduzierung der konservierenden Bodenbearbeitungsvariante zur konventionellen für Böden mit der Bodenart Ut4 - Ergebnis der Simulationsrechnungen von Kap. 7.1

¹ Abflussreduzierung aus dem Verhältnis von Ut4_v zu Ut4_s; ² Abflussreduzierung aus dem Verhältnis von Mittelwert aus 012 und 013 zu 014; vgl. Tab. 24

verglichen werden, da unterschiedliche Gesamtregenmengen zugrunde liegen, doch sollen diese Werte ein Gefühl für die Größenordnung der Wassermenge geben, die durch die konservierende Bodenbearbeitung zurückgehalten werden kann.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden nicht die besonderen Effekte des ökologischen Landbaus auf das Abflussverhalten und damit auf den Hochwasserschutz beurteilt, da hierzu zu wenig quantifizierbare Informationen vorlagen. Nach SCHNUG & HANEKLAUS (2002) stellt die Umstellung der Bodenbearbeitungsverfahren von konventionell auf konservierend in nicht ökologisch wirtschaftenden Betrieben lediglich einen isolierten Faktor in einem ansonsten ungünstigen Umfeld dar. Im Gegensatz dazu wirken sich in ökologisch wirtschaftenden Betrieben eine Vielzahl von Faktoren positiv auf die Infiltration aus. Insbesondere durch günstigere Bedingungen für die Bildung von Bioporen weisen ökologisch bewirtschaftete Ackerböden unter sonst vergleichbaren Bedingungen etwa doppelt so hohe Infiltrationsraten auf wie konventionell bewirtschaftete (SCHNUG & HANEKLAUS, 2002).

b) Quantifizierung der Effekte auf den Gebietsabfluss

Um den Gebietsabfluss reduzieren zu können, muss das bei der konservierenden Bodenbearbeitung zusätzlich in den Boden infiltrierte Wasser dort zwischengespeichert werden. Nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 1994) können die Böden bei einer mittleren nutzbaren Feldkapazität zwischen 140 und 320 L * m² Wasser bei einer Gründigkeit von 1 m pflanzenverfügbar zurückhalten. Hierbei wird der Anteil des Porenvolumens der feinen Bodenporen (Durchmesser < 0,2 µm) noch nicht einmal mitberücksichtigt. Da die Bodenporen teilweise mit Wasser gefüllt sind, steht nicht das gesamte Volumen der nutzbaren Feldkapazität zur Verfügung. Hinzu kommt, dass bei geringmächtigen Böden die nutzbare Feldkapazität entsprechend vermindert ist. Insgesamt erscheint es jedoch aus Sicht der Speichermöglichkeiten des Bodens denkbar, dass eine Niederschlagsmenge von beispielsweise 4,6 bis 26,3 mm (Tab. 31) vom Boden zusätzlich aufgenommen und zwischengespeichert werden kann, zumal durch Maßnahmen zur Verminderung von Bodenverdichtungen die Speichereigenschaften des Bodens verbessert werden können.

Eine exakte Quantifizierung der Wirksamkeit der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Maßnahmen zur Reduzierung des Hochwasserabflusses kann nicht erstellt werden. Je nach Faktorenkonstellation variieren die Effekte in einem weiten Bereich. So können im Extremfall die Effekte so gering ausfallen, dass nicht von einem wirksamen Hochwasserschutz gesprochen werden kann. Im Regelfall kann bei vorsichtigen Schätzungen davon ausgegangen werden, dass durch eine Umstellung der Landbewirtschaftung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung der Oberflächenabfluss in einer Größenordnung von mind. 12 % (kleinster Wert der Literaturanalyse für die Rückhaltung aus Tab. 31) der Niederschlagssumme vermindert werden kann.

Nach einer Umstellung des Bewirtschaftungsverfahrens einschließlich den damit verbundenen Änderungen in der Fruchtfolge nehmen die unterirdischen Abflusskomponenten zu. Sie können sogar im Extremfall durch Effekte des Präferential flow's und durch Ausdrücken von Altwasser Abflussgeschwindigkeiten in der Größenordnung des Oberflächenabflusses annehmen. Da die unterirdischen Abflusskomponenten des Zwischenabflusses und des Grundwasserabflusses aber in der Re-

Quelle	siehe auch	Abflussreduzierung	
		in % vom Niederschlag	in mm ¹
Berechnungsversuche			
MOSTAGHIMA ET AL., 1987	Tab. 26	52	26,3
SCHMIDT ET AL., 2001	Tab. 27	28,6	12,0
DBU, 2002	Text ²	12	4,6
	Mittelwert	30,9	14,3
Simulationsrechnung			
Simulation Kap. 7.1 gemittelt für 8 Bodenbedingungen	Tab. 29	27,8	10,8
Simulation Kap. 7.1 gemittelt für die Bodenart Ut4, verschiedene Bodenbedeckungsgrade	Tab. 30	28,2	13
	Mittelwert	28	11,9

Tab. 31 Angaben zur Abflussreduzierung der konservierenden Bodenbearbeitungsvariante gegenüber der konventionellen aus verschiedenen Quellen

¹ absolute Abflussreduzierung, die sich bei dem Versuch / der Simulationsrechnung zeigte, bei unterschiedlichen Gesamtregnenmengen; ² Die Angaben beziehen sich auf die im Text gemachten Angaben zu den Ergebnissen aus Berechnungsversuchen; darüber hinaus wurden Angaben im Text gemacht, die sich in Tab. 32 finden.

gel gegenüber dem Oberflächenabfluss verzögert ablaufen, muss davon ausgegangen werden, dass sie die hochwasserreduzierende Wirkung insgesamt nicht in Frage stellen (vgl. Kap. 8). Hinzu kommt, dass ein Teil des infiltrierten Wassers zur Grundwasserneubildung von tiefer gelegenen, nicht am Abflussgeschehen direkt beteiligten Grundwasserstockwerken beiträgt.

Die Wirksamkeit von Maßnahmen einer angepassten Ackernutzung vor allem auf den Hochwasserspitzenabfluss ist nicht zuletzt auf den großen Flächenanteil des Ackerlandes zurückzuführen, der im Bundesdurchschnitt bei 34 % liegt. Dies belegen auch die Modellrechnungen von SPAROVEK ET AL. (2002). Sie zeigten anhand eines einfachen Modells, mit dessen Hilfe der Einfluss der Infiltrationsrate als Einzelfaktor auf Häufigkeit und Intensität von Überflutungen simuliert wurde, dass eine verringerte Infiltration zwar keinen Einfluss auf die Häufigkeit von Überflutungen, wohl aber auf deren Intensität hat.

Um das Potenzial aufzuzeigen, mit dem durch eine Änderung in der Landbewirtschaftung zu rechnen ist, wurde das folgende Rechenbeispiel erstellt. Für die Berechnung wurde von einer geringen Steigerung des Wasserrückhalts von nur 3 mm ($3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$) ausgegangen. Der gesteigerte Wasserrückhalt von 3 mm wurde als sehr vorsichtige Annahme aus dem geringsten Wert der Tab. 31 hergeleitet, unter der zusätzlichen Annahme, dass von diesen 4,6 mm $1/3$ durch unterirdische, schnelle Abflussvorgänge nicht zurückgehalten werden kann und dies, obwohl in der zitierten Literatur unterirdische Abflusskomponenten schon berücksichtigt wurden.

Das Rhein-Einzugsgebiet oberhalb von Köln hat eine Größe von etwa 120.000 km². Würden nur $3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ Niederschlag durch eine veränderte Landbewirtschaftung auf den Ackerflächen im Einzugsgebiet zurückgehalten werden, so könnten hiermit allein 122,4 Mio. m³ Wasser am direkten

Abfluss gehindert werden. Das auf der Fläche zurückgehaltene Volumen entspräche dem derzeit vorhandenen und nutzbaren Speichervolumen des Rheins in Form von Poldern, Rückhaltebecken usw. und würde damit eine Verdopplung des im Rheineinzugsgebiet vorhandenen künstlich geschaffenen Retentionsvolumens bedeuten. Bezogen auf die Hochwässer im Dezember 1993 und Januar 1994 würde hiermit eine Abflussreduzierung von fünf bis sechs Prozent erreicht werden. Der Scheitelabfluss ließe sich analog zu einer Berechnung von SIEKER (1995) um ca. 500 bis 600 m³/s senken, was eine Wasserstandsänderung um bis zu 50 cm mit sich bringen würde. Da es sich hierbei um eine sehr vorsichtige Annahme handelt, kann davon ausgegangen werden, dass der hochwasserreduzierende Effekt größer ausfallen wird.

Bezogen auf das Rückhaltebecken Salzderhelden der Leine nördlich von Göttingen ergeben sich aufgrund des im Verhältnis zum Rhein mit 2.200 km² kleinen Einzugsgebietes folgende Werte: Das Einzugsgebiet weist einen Anteil an Ackerland von 36 % auf (berechnet aus Werten aus: NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM, 1992). Würden wieder 3 L pro m² mehr durch Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung auf der Fläche zurückgehalten werden können, so könnte das Abflussvolumen um 2,4 Mio. m³ vermindert werden. Dies Volumen entspricht 5,5 % des Stauvolumens vom Rückhaltebecken. Geht man von einer Abflussverminderung von 10,8 % des Niederschlags (kleinste Wert der Tab. 31) und von einem für die Region 100-jährigen Starkniederschlagsereignis von etwa 90 mm in 24 Stunden aus, so würde sich ein Abflussvolumen von 8,6 Mio. m³ ergeben, das etwa ein fünfteil des Stauvolumens vom Rückhaltebecken Salzderhelden entsprechen würde.

Die Rechenbeispiele belegen, dass selbst bei sehr vorsichtigen Annahmen ein nicht unerheblicher Teil durch eine veränderte Ackernutzung zurückgehalten werden kann. Es können, wie zu erwarten war, keine Hochwässer verhindert werden, doch tragen die Maßnahmen einen wichtigen Beitrag zur Abflussverminderung und damit zum Hochwasserschutz bei. Dies wurde auch durch Berechnungen deutlich, die im Rahmen eines DBU-Projektes (DBU, 2002) für das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße durchgeführt wurden. Modellrechnungen zeigten, dass bei flächendeckender Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße der Abfluss „natürlicher Flächen“ (hiermit sind wahrscheinlich die Ackerflächen gemeint) um bis zu 60 % reduziert werden kann (vgl. Tab. 32). Diese flächenhafte Retentionswirkung würde für das Juli-Hochwasser von 1981 eine Abflussverminderung von 15 % zur Folge haben und für das Juli-Hochwasser 1997 maximal 18 %.

BORK ET AL. (1998) sieht beim Oderhochwasser im Sommer 1997 die geringen Infiltrationskapazitäten der heutigen erodierten und schadverdichteten ackerbaulich genutzten Böden, die lange, ungebremste Fließwege aufweisen, als wesentliche Mitursache für die starke Abflussbildung an. Er geht davon aus, dass die Wasseraufnahmekapazitäten vor allem erosions-, struktur- und landnutzungsbedingt verringert sind und daher heute ein Starkregen mindestens dreimal mehr Abfluss verursacht als ein vergleichbares Ereignis im frühen oder hohen Mittelalter. Das theoretische Potential zur Abflussreduzierung, welches sich aus diesen Überlegungen für heutige Änderungen in der Landnutzung ergibt, wäre dabei noch größer als die errechneten Potenziale aus Tab. 32.

	Hochwasser Juli 1997 - Niederschlagssumme 239 mm vom 15.06. - 06.08.1997		Hochwasser Juli 1981 – Niederschlagssumme 304 mm vom 21.06. - 20.08.1981	
Szenarien	Abfluss- volumen [Mio. m ³]	Abfluss natürlicher Flächen * ¹ [mm]	Abfluss- volumen [Mio. m ³]	Abfluss natürlicher Flächen ¹ [mm]
Ist-Zustand	34,2	38	54,3	53
25% konservierende Bodenbearbeitung	32,7 4%	33 13 %	52,1 4 %	46 14 %
50% konservierende Bodenbearbeitung	31,4 8%	28 26 %	50,1 8 %	38 29 %
100% konservierende Bodenbearbeitung (nicht optimiert* ²)	29,8 13%	21 45 %	47,2 13 %	24 55 %
100% konservierende Bodenbearbeitung (optimiert ²)	28,1 18%	17 55 %	46,1 15 %	21 61 %

Tab. 32 Abflussvolumina und Oberflächenabfluss des deutschen Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße unterhalb von Görlitz und oberhalb von Zittau für den simulierten Ist-Zustand und verschiedene simulierte Szenarien (DBU, 2002)

Fläche: 451 km²; 46 % der Fläche Ackernutzung; ¹ Hiermit ist wahrscheinlich der Abfluss von Ackerflächen gemeint; ² „optimiert“ meint eine kontinuierliche Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung.

Im Gegensatz dazu relativieren NIEHOFF UND BRONSTERT (2001 und 2002) die möglichen Effekte, die von Landnutzungsänderungen ausgehen könnten. Sie gehen aufgrund einer Modellierungsstudie davon aus, dass nur für hochintensive Starkregenereignisse die Landnutzung von Relevanz für das Volumen und die Abflussspitze eines Hochwassers ist, was insbesondere durch mögliche Änderungen der Infiltrationseigenschaften der Bodenoberfläche zu erklären ist. Anhand der Modellierungsstudie sollte ermittelt werden, in welcher Weise, in welcher Größenordnung und unter welchen Umständen die Art der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung Einfluss nimmt. Im Gegensatz zu den hochintensiven Starkniederschlagsereignissen ist nach Meinung von NIEHOFF UND BRONSTERT (2001 und 2002) für advective Starkniederschläge (geringe Intensitäten, große Überregnungsflächen und -dauern) die Landnutzung dagegen von geringer bis sogar vernachlässigbarer Relevanz, da diese Niederschlagstypen fast ausschließlich unterirdisch kontrollierte Abflussprozesse auslösen, die kaum durch die Bedingungen an der Landoberfläche beeinflusst werden. Da die Hochwasserereignisse an den großen Flüssen Mitteleuropas i. d. R. durch advective Niederschläge hervorgerufen werden, sind für diese großen Einzugsgebiete Landnutzungsänderungen nach Auffassung der Autoren von untergeordneter Bedeutung.

Die Ergebnisse von NIEHOFF UND BRONSTERT (2001 und 2002) könnten allerdings auch so interpretiert werden, dass ackerbauliche Maßnahmen, die darauf abzielen, die Retentionseigenschaften der Böden zu verbessern, gefördert werden müssten. Dies wäre vor allem durch Maßnahmen mög-

lich, die zu einer Verringerung der Bodenverdichtungen beitragen und somit die Speichereigenschaften erhöhen.

Als Beleg für die positive Wirkung von Änderungen in der Ackernutzung auf das Abflussverhalten sei abschließend noch auf die Untersuchungen von POTTER (1991) hingewiesen. POTTER (1991) untersuchte das Abflussverhalten eines überwiegend landwirtschaftlich genutzten, 572 km² großen Einzugsgebietes im Süden von Wisconsin/USA. Mit Hilfe von statistischen Verfahren durchgeführte Zeitreihenanalysen, konnte er folgende Änderungen im Abflussregime, nachdem im Einzugsgebiet die Bewirtschaftung an die Belange des Bodenschutzes (vor allem des Erosionsschutzes) angepasst wurde, nachweisen. Die Spitzenabflüsse reduzierten sich um 25 %. Der Hochwasserscheitel trat zeitlich verzögert auf und die Hochwasserhäufigkeit reduzierte sich. Der mittlere jährliche Abfluss wurde hierbei nicht verändert, zeigte jedoch eine ausgeglichene Abflussverteilung. Da die veränderten hydrologischen Trends nicht mit einem Klimawandel erklärt werden können und auch anderweitige Landnutzungsänderungen als Ursache ausgeschlossen werden können, kann davon ausgegangen werden, dass die geänderten Anbaumethoden für das geänderte Abflussverhalten verantwortlich sind.

Zusammenfassende Quantifizierung

Die Effekte, die sich aus einer angepassten Ackernutzung ergeben, können wie folgt zusammengefasst quantifiziert werden. Auf der Ebene der einzelnen Parzelle ist die Spannweite des Ausmaßes der möglichen Oberflächenabflussreduzierung sehr groß. Bei sehr ungünstigen Konstellationen der beteiligten Faktoren können die Effekte, wie in der vorliegenden Arbeit beschrieben, so gering sein, dass der Nutzen für den Hochwasserschutz gegen Null geht. Andererseits konnte auch eine vollständige Versickerung des Niederschlagswassers bei extremen Niederschlagsereignissen beobachtet werden. Im Durchschnitt kann von einer beträchtlichen Reduzierung des Oberflächenabflusses / einem stark gestiegenen Gebietsrückhalt ausgegangen werden. Diese Oberflächenabflussreduzierung liegt bei einer angepassten Bewirtschaftung, also bei einer Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung einschließlich der Verminderung oder Vermeidung von Bodenverdichtungen, in einer Größenordnung von rund 10 bis 50 % - im Mittel von 30 % der Niederschlagssumme (Abb. 32).

Auch wenn durch unterirdische Abflusskomponenten diese Abflussreduzierung nicht zu 100 % im Fließgewässer wirksam wird, macht sie sich deutlich bemerkbar. Ihr Ausmaß nimmt mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes ab, da dann andere Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Überlagerung von Abflusswellen, dominieren. Eine exakte Quantifizierung der Effekte kann daher nicht durchgeführt werden. Es kann aber aufgrund der Literaturanalyse mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass das Abflussvolumen und der Spitzenabfluss bei einem Hochwasserereignis um einen Betrag von mind. 12 % der Niederschlagssumme verringert wird (vgl. Tab. 31 und Tab. 32 sowie POTTER, 1991). Das bedeutet, dass sich durch Änderungen in der Ackernutzung spürbare Effekte in Bezug auf Abflussvolumen und Abflussspitze eines Hochwassers ergeben. Den mittleren jährlichen Abfluss werden die verbesserten Speicherbedingungen des Bodens nur sehr geringfügig verringern, wobei aber insgesamt mit einer ausgeglicheneren Abflussverteilung zu rechnen ist. Die beiden wichtigsten Effekte sind stark vereinfacht in Abb. 32 visualisiert.

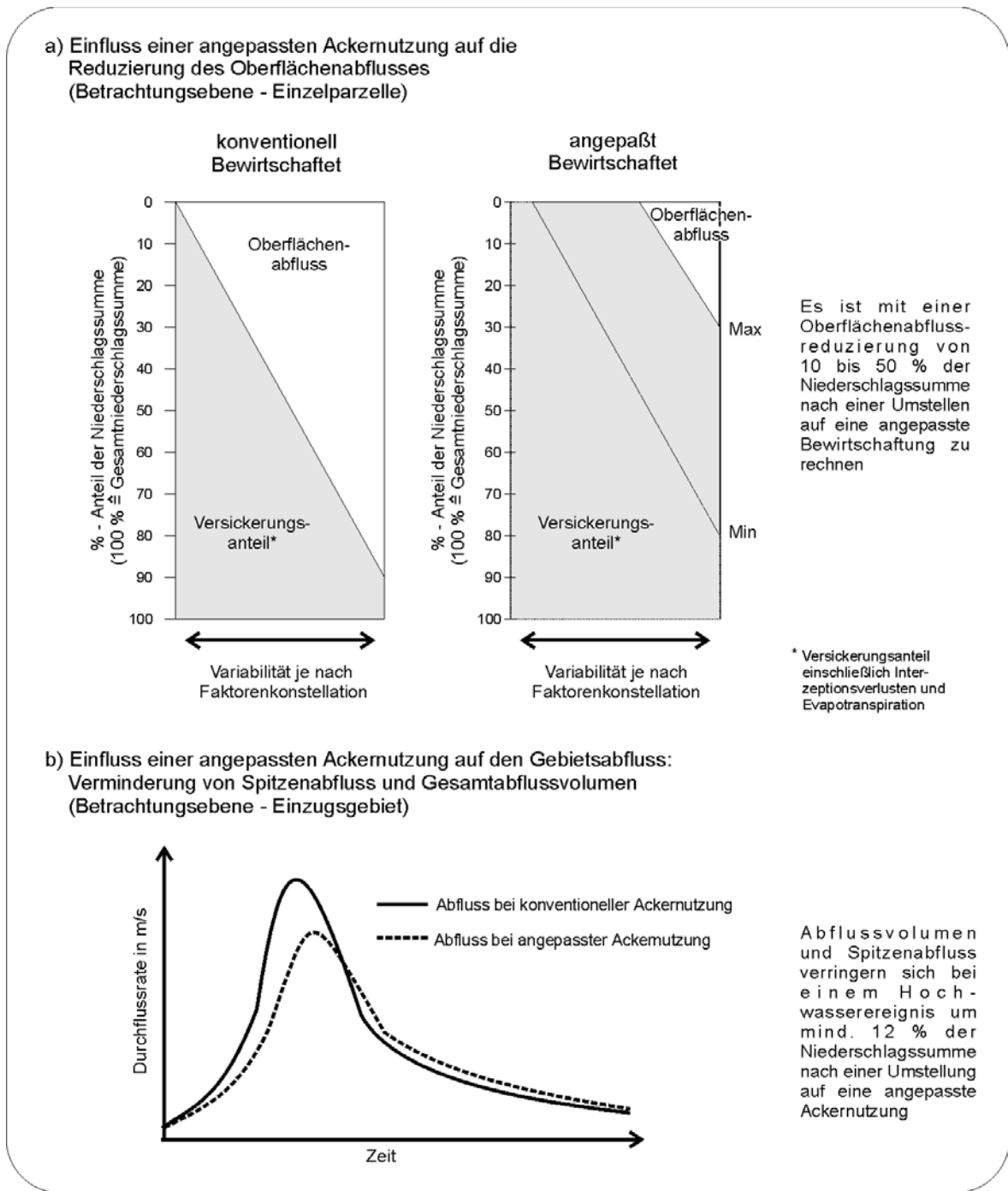


Abb. 32 Stark vereinfachte, schematische Darstellung der Effekte einer Umstellung auf eine angepasste Ackernutzung (vor allem konservierende Bodenbearbeitung und Schutz vor Bodenverdichtungen)

Konsequenzen, die sich für den Hochwasserschutz ergeben

Die Effekte, die sich aus einer angepassten Ackernutzung für den Hochwasserschutz ergeben, sind so bedeutend, dass sie in den künftigen Hochwasserschutz integriert werden müssen. Auch gemessen an dem Aufwand und der Effektivität technischer Hochwasserschutzbauten schneiden die hier aufgeführten Maßnahmen sehr gut ab (vgl. Beispiel Salzderhelden und Rhein in diesem Kapitel). Hochwasserereignisse können zwar nicht verhindert werden, doch kann und muss die Landwirt-

schaft ihren wichtigen Beitrag für den Hochwasserschutz leisten. Bei den Bewirtschaftungsmaßnahmen nimmt die konservierende Bodenbearbeitung eine Schlüsselstellung ein, auch wenn sie, wie beispielsweise auf sehr steilen Hängen, kein Patentrezept darstellt und durch andere geeignete Maßnahmen ergänzt werden muss. Insgesamt bildet sie ein wichtiges Kompartiment im Hochwasserschutz.

Eine gesonderte Förderung der Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren ist von Seiten des Hochwasserschutzes allerdings nicht erforderlich, da die konservierende Bodenbearbeitung auch als das Schlüsselverfahren im Bodenschutz angesehen wird und über diese Schiene Verbreitung finden muss. Die Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung entspricht einer nachhaltig arbeitenden Landwirtschaft, wie sie im Bundesbodenschutzgesetz (BBODSCHG, 1998) gefordert wird. Sie zielt vor allem auf die Minimierung der Bodenerosion durch Wasser und führt zudem zu einer Verringerung von Bodenverdichtungen. Darüber hinaus werden mit ihrer Hilfe weitere wichtige Bereiche wie beispielsweise die Verbesserung der Lebensbedingungen der Bodenfauna verwirklicht. Die wissenschaftlichen Zusammenhänge sind für eine Umsetzung von Maßnahmen in der Praxis ausreichend geklärt und es liegen genügend Erfahrungen aus der Praxis vor.

Auch beim Schutz vor Bodenverdichtungen besteht besonderer Handlungsbedarf aus Sicht des Boden- und Hochwasserschutzes, da die ackerbaulich genutzten Böden heute vielfach schon extreme Verdichtungen aufweisen, die im Bereich der Krumbasis Werte der Proktordichte annehmen und Verdichtungen noch in Tiefen von 70 bis 80 cm deutlich nachzuweisen sind. Es müsste, wie dies eine internationale Arbeitsgruppe schon vor fünfzehn Jahren gefordert hat, zumindest eine Begrenzung der Radlasten auf max. 5 t erfolgen (HORN ET AL., 2000). Konkrete Handlungsempfehlungen für die in der vorliegenden Arbeit behandelten verschiedenen Maßnahmen können den Tabellen: Tab. 10, Tab. 13, Tab. 17 und Tab. 19 entnommen werden.

10. Zusammenfassung

Die Häufigkeit extremer Hochwasserereignisse der letzten Jahre, die zum Teil zu erheblichen Schäden an Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen geführt haben, zeigen den Handlungsbedarf für Maßnahmen zum Hochwasserschutz auf. Hochwasserschutz wird gegenwärtig vor allem durch Maßnahmen im Bereich des technischen Hochwasserschutzes, also vor allem durch Deiche, Mauern, Rückhaltebecken und Talsperren dominiert. Diese sehr kostenintensiven Maßnahmen sind häufig mit negativen Auswirkungen auf die Ober- und Unterlieger sowie auf den Naturhaushalt verbunden. Alternative Schutzkonzepte, die auf eine Begrenzung der Abflusssentstehung hinwirken, wurden in der Vergangenheit nur unzureichend entwickelt oder umgesetzt. Im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft hat in den letzten Jahren ein Umdenken stattgefunden, so dass hier der Regenwasserversickerung und -retention gegenüber der ungedrosselten Ableitung der Vorzug gegeben wird.

Noch unzureichend erforscht sind die Möglichkeiten im Bereich der Landwirtschaft, die zu einer Verringerung des Hochwasserabflusses beitragen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit geprüft, inwieweit durch Änderungen in der Ackernutzung der Wasserrückhalt auf landwirtschaftlich genutzten Flächen verbessert werden kann und welche Maßnahmen hierfür notwendig sind. Änderungen in der Ackernutzung sind aufgrund des hohen Flächenanteils für den Hochwasserschutz von besonderer Bedeutung. Etwa ein Drittel der Fläche der Bundesrepublik Deutschland wird als Ackerland genutzt.

In der vorliegenden Arbeit wurden keine unrealistischen Forderungen an eine veränderte Landwirtschaft untersucht. Es wurden die Wirkungen von Maßnahmen einer auf die standörtlichen Verhältnisse angepassten Landbewirtschaftung bewertet. Maßnahmen, die der im BundesBodenschutzGesetz geforderten guten fachlichen Praxis entsprechen. Hierzu gehören unter anderem Maßnahmen zum Bodenerosionsschutz und zum Schutz vor Bodenverdichtungen, da diese in einem engen Wirkungsgefüge mit dem Oberflächenabfluss stehen und damit auch das Hochwassergeschehen beeinflussen.

Der Betrachtungsmaßstab bei dieser Fragestellung war zunächst auf einzelne Parzellen beschränkt, da hier die verschiedenen Bewirtschaftungsmaßnahmen durchgeführt werden. Es wurde zunächst davon ausgegangen, dass alle Maßnahmen, die den Oberflächenabfluss reduzieren oder zumindest verzögern, sich hochwassermindernd auswirken. Im Mittelpunkt der Betrachtung standen daher alle Maßnahmen, die zu einer Erhöhung der Infiltration beitragen. Die Beurteilung der Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen erfolgte auf Grundlage einer verbal argumentativen, systematischen Auswertung aller verfügbaren Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen. Modellrechnungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur ergänzend eingesetzt und bilden nicht die Grundlage der Bewertung.

Bei der Untersuchung wurde so vorgegangen, dass im ersten Schritt das Prozessgefüge der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf das Abflussverhalten analysiert wurde. Auf dieser Grundlage wurden die folgenden sieben Teilziele abgeleitet, die eine Steigerung der Infiltration und eine Verminderung des Oberflächenabflusses zur Folge haben:

- Splashwirkung vermeiden / verringern
- Verschlämmung vermeiden / verringern
- Bodenbedeckung ganzjährig erhöhen
- Bodengefüge stabilisieren
- Rauigkeit erhöhen / Oberflächenabfluss verzögern
- Makroporen erhalten / Makroporenbildung fördern
- Bodenverdichtungen vermeiden

Da die Vermeidung bzw. Minimierung der Bodenerosion in den genannten Teilzielen enthalten ist, taucht sie nicht gesondert auf. Sie stellt vielmehr, wie die Steigerung der Infiltration, die Summenwirkung verschiedener Teilziele dar. Die beiden Teilziele „Splashwirkung vermeiden / verringern“ und „Verschlämmung vermindern / vermeiden“ nehmen eine Sonderstellung ein, da sie vor allem nur indirekt über die anderen Teilziele durch die Bewirtschaftung beeinflusst werden können.

Im Weiteren wurden konkrete acker- und pflanzenbauliche Bewirtschaftungsmaßnahmen im Hinblick auf ihre abflussreduzierende Wirkung bewertet. Die Maßnahmen wurden in ihrer Wirksamkeit auf die zuvor definierten Teilziele eingestuft. Anschließend erfolgte eine Gesamtbewertung der jeweiligen Maßnahme hinsichtlich ihrer Gesamtwirkung zur Reduzierung des Oberflächenabflusses. Die Aussagesicherheit, mit der die Gesamtbewertung erfolgte, wurde hierbei ausgewiesen. Darüber hinaus erfolgte eine Bewertung der Realisierbarkeit und der heutigen Verbreitung der jeweiligen Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis.

Die einzelnen Maßnahmen wirken sich sehr unterschiedlich auf die verschiedenen Teilziele aus. Da sie sich in ihrer Wirkung ergänzen, sollten sie als Maßnahmenbündel eingesetzt werden. Eine herausragende Bedeutung für den Hochwasserschutz kommt dem Verzicht auf die wendende Bodenbearbeitung zu. Aus Sicht des Hochwasserschutzes wäre daher eine Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitungsverfahren bzw. auf die Direktsaat besonders wichtig.

Die in der Literatur kontrovers diskutierten Auswirkungen von Dränagen auf den Hochwasserabfluss wurden gesondert behandelt. Ihre Wirkung fällt je nach Faktorenkombination (Standortbedingungen, Bewirtschaftung und Witterung) unterschiedlich aus. Tendenziell wirken sich Dränierungen hochwasserverstärkend aus. Darüber hinaus fördern sie indirekt das Hochwassergeschehen, wenn durch sie Intensivierungen ermöglicht werden, die die natürlichen Retentionsfunktionen der Landschaft vermindern. Hinweise zur Begrenzung der hochwasserverstärkenden Auswirkungen wurden abgeleitet.

Fast alle hier behandelten Bewirtschaftungsmaßnahmen, die eine angepasste Ackernutzung ermöglichen, sind in der Praxis nur mäßig verbreitet oder werden kaum bzw. nur auf Einzelflächen praktiziert. Obwohl die technische Realisierbarkeit bei allen Maßnahmen gegeben ist, müssen fast alle aufgrund innerbetrieblicher Zwänge, äußerer Rahmenbedingungen, Gewohnheiten bzw. fehlender Sensibilität für eine nachhaltig wirtschaftende Ackernutzung als schwer umsetzbar eingestuft werden.

Bei der Bewertung der zuvor behandelten Maßnahmen auf den einzelnen Parzellen wurde vereinfacht angenommen, dass eine Erhöhung der Infiltration verbunden mit einer Verringerung des Oberflächenabflusses sich hochwassermindernd auswirkt. Bei einer Beurteilung der Wirksamkeit dieser infiltrationsfördernden Maßnahmen auf der Flussgebietskala müssen die Einflüsse der Abflussbildung und -konzentration sowie die des Zwischenabflusses einschließlich der im Boden vorhandenen schnellen präferenziellen Fließwege und den Phänomenen des Ausdrückens von Altwasser in die Beurteilung mit einbezogen werden.

Der Zwischenabfluss im Boden kann in den präferentiellen Fließwegen Geschwindigkeiten erreichen, die denen des Oberflächenabflusses entsprechen. Verschiedene Untersuchungen haben aber gezeigt, dass hierdurch nur ein Teil des infiltrierten Niederschlagswassers direkt zum Vorfluter gelangt. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass eine Verbesserung der Infiltrationsbedingungen sich aufgrund von schnellen unterirdischen Abflussvorgängen des Zwischenabflusses und dem Ausdrücken von Altwasser nicht vollständig hochwassermindernd auswirkt, wobei eine gesicherte Quantifizierung zur Zeit noch nicht möglich ist.

Die Wirksamkeit der angepassten Landbewirtschaftung ist nicht zuletzt auf die schon oben erwähnte große Flächenrelevanz zurückzuführen. Es können zwar keine Hochwasser hierdurch verhindert werden, doch kann das Abflussvolumen wirksam vermindert werden. Das Ausmaß der Abflussreduzierung ist abhängig von der konsequenten Umsetzung der in der vorliegenden Arbeit behandelten Maßnahmen und von der aktuellen Konstellation aus Witterung und Standortverhältnissen. Bei einer sehr ungünstigen Kombination der Ausgangsbedingungen kann die Wirksamkeit dieser Maßnahmen gegen Null gehen. Im Durchschnitt kann von einer beträchtlichen Reduzierung des Oberflächenabflusses bzw. einem stark gestiegenem Gebietsrückhalt ausgegangen werden, der in einer Größenordnung von 10 bis 50 % - im Mittel von 30 % der Niederschlagssumme liegt.

Auch wenn durch unterirdische Abflusskomponenten diese Abflussreduzierung nicht vollständig im Fließgewässer wirksam wird, macht sie sich deutlich bemerkbar. Ihr Ausmaß nimmt mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes ab, da dann andere Einflussfaktoren dominieren. Eine exakte Quantifizierung der Effekte kann daher nicht durchgeführt werden. Es kann aber aufgrund der Literaturanalyse mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass das Abflussvolumen und der Spitzenabfluss bei einem Hochwasserereignis um einen Betrag von mind. 12 % der Niederschlagssumme verringert wird. Das bedeutet, dass sich durch Änderungen in der Ackernutzung spürbare Effekte in Bezug auf Abflussvolumen und Abflussspitze eines Hochwassers ergeben, die mancherorts darüber entscheiden, ob aus dem Hochwasserereignis ein schadbringendes Hochwasserereignis wird, das auch die höhergelegenen bzw. ansonsten durch Deiche geschützten Flächen mit höherwertiger Nutzung überschwemmt.

Für die insgesamt deutlich hochwassermindernde Wirkung der angepassten Ackernutzung können aufgrund der Untersuchungsergebnisse konkrete Handlungsempfehlungen für ausgewählte Bewirtschaftungsmaßnahmen und den Umgang mit Dränagen gegeben werden.

11. Literatur

- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG (1990): Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser. Regelwerk Abwasser-Abfall DK 628.29 (0833.1): 628.396. Arbeitsblatt A 138, St. Augustin, 15 S.
- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland. 4. verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover, 392 S.
- AEBY, P., J. FORRER, C. STEINMEIER & H. FLÜHLER (1997): Image analysis for determination of dye tracer concentrations in sand columns. *Note, Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 61, S. 33-35.
- AGASSI, M., I. SHAINBERG & J. MORIN (1981): Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 45, S. 848-851.
- AKKERMANN, M. (1996): Methode zur kostengünstigen Einschätzung der standortkundlichen Bedingungen für eine dezentrale Regenwasserbewirtschaftung am Beispiel der Südstadt von Halle an der Saale. Diplomarbeit, 176 S.
- ALTEMÜLLER, H.-J. (1991): Der morphologische Bau des Bodens in Abhängigkeit vom Bodentyp und der Bodennutzung. In: *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit*. Band 2, Bodengefüge, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, S. 12-32.
- ANGULO-JARAMILLO, R., F. MORENO, B. E. CLOTHIER, J.-L. THONY, G. VACHAUD, E. FERNANDES-BOY & J. A. CAYUELA (1997): Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 61, S. 27-32.
- ANGULO-JARAMILLO, R., J. P. GAUDET, J.-L. THONY & M. VAUCLIN (1996): Measurements of hydraulic properties and mobile water content of a field soil. *Soil Science Soc. Am. J.*, Vol. 60, S. 710-715.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover, 392 S.
- ASSAN, M. A., O. SLAYMAKER & S. M. BERKOWICZ (Hrsg.), (2000): *The Hydrology Geomorphology Interface: Rainfall, Floods, Sedimentation, Land Use*. International Association of Hydrological Sciences, No. 261, 326 S.
- BAEUMER, K. (1971). *Allgemeiner Pflanzenbau*. Ulmer, Stuttgart.
- BARBERI, P. (2002): Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Reseach*, 42, S. 177-193.
- BARKUSKY, U. (1991): Kalkulative Ermittlung der Einflusses von Schlaggrößen, -form und Besatz mit Bewirtschaftungshindernissen unter besonderer Berücksichtigung der schlagspezifischen Verdichtungsdisposition der Bodensubstrate auf materielle und finanzielle technologische Aufwendungen. Dissertation, HU Berlin.
- BARLOW, C. P. (1989): Stress in the Soil Conservation Service. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2/1989, S. 105116.
- BARTELS, G. (1999): Höhere Kosten bei Stoppelweizen. *Landwirtschaft ohne Pflug*, 2/1999, S. 13-14.
- BAUER, S. & C. SCHÄFER (1993): Agrarökonomische Vorschläge und Vorstellungen zur Honorierung ökologischer Leistungen der Landwirtschaft. In: Jarre (Hrsg.): *Die Honorierung ökologischer Leistungen der Landwirtschaft. Fallbeispiele, Probleme, Zukunftsperspektiven*. Loccumer Protokolle 5 / 93, Rehburg-Loccum, S. 65-94.
- BAUER, S. & P. TRÖTSCHLER (2000): Ökonomische Ansätze für eine nachhaltige Landwirtschaft. In: Härdtlein et al. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft. Initiativen zum Umweltschutz*, Band 15, Berlin, S. 149-163.
- BAUMGARTL, T. & R. HORN (1999): Influence of mechanical and hydraulic stresses on hydraulic properties of swelling soils. In: M. van Genuchten, F. J. Leij & L. Wu (Hrsg.): *Characterisation and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. University of California, Riverside Publ., S. 449-457.
- BÄUMLER, W. (2000): Beutegreifer dezimieren Feldmäuse. *Landwirtschaft ohne Pflug*, 5/2000, S. 5-8.

- BECHER, H. H. & W. MARTIN (1987): Physikalische Eigenschaften von drei Bodentypen unter Acker und Grünland. Z. Pflanzenernährung Bodenkunde, Heft 150, S. 290-2396.
- BECHTLE, W. (1985): Erfahrungen und Ergebnisse aus Tiefenlockerungen in Baden-Württemberg. DVWK-Schriften, Heft 70: Die Gefügemelioration durch Tiefenlockerung - Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse. Teil 2. Hamburg-Berlin. S. 37-73.
- BECK, R. & J. LEPSCHY (2000): Ergebnisse aus dem Fusarium-Monitoring 1989-1999 - Einfluss der produktionstechnischen Faktoren Fruchtfolge und Bodenbearbeitung. In: Risiken durch den Ährenparasiten *Fusarium graminearum* - Ergebnisse eines LBP-Forschungsverbundes. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (Hrsg.), 4. Jhrg., 3/00, S. 39-47.
- BEISECKER, R. (1994): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eine Löß- und eines Sandbodens. Dissertation, Bodenökologie und Bodengesehe Heft 12, 183 S.
- BESTE, A. (2002): Das Problem mit dem Wasser ist ein Bodenproblem. Ökologie und Landbau, 124, 4, S. 24-28.
- BEVEN, K. & P. GERMANN (1982): Macropores and water flow in soils. Water Resources Research, Bd. 18, Heft 5. S. 1311-1325.
- BEVEN, K. (1980): The Grendon Underwood field drainage experiment. Report 65, Institut Hydrol. Wallingford, England, 30 S.
- BEVEN, K. (1989): Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models. Journal of Hydrology, 105, S. 157-172.
- BEVEN, K. J. & CLARKS, R. T. (1986): On the variation of infiltration into a homogeneous soil matrix containing a population of macropores. Water Resources Research, Bd. 22, Heft 3, S. 383-388.
- BEYER, L. (1991): Gefügeeigenschaften von Parabraunerden und Podsolen unter Wald- und Ackernutzung. Z. Pflanzenernährung Bodenk., 154, S. 107-114.
- BEYER, L., M. SACHT & H. P. BLUME (1992): Die Veränderung ökologischer Bodeneigenschaften innerhalb von 5 Jahren Ackerextensivierung. VDLUFA-Schriftenreihe 35, Kongressband, S. 619-622.
- BISCHOFF, J. (1999): Raps ohne Pflug bestellt. Landwirtschaft ohne Pflug, 3/1999, S. 17-18.
- BISMUTH, C. ET AL. (1998): Hausgemachte Überschwemmungen – Vorsorge gegen zukünftige Hochwasserschäden (Maßnahmenvorschläge). Aktualisierte Auflage 3/1998, Heft 18, Umweltbundesamt, 113 S.
- BLUME, H.-P. (Hrsg.) (1990): Handbuch des Bodenschutzes – Bodenökologie und –belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. ecomed-Verlag, 686 S.
- BML (1999): Gute fachliche Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung. Broschüre, 24 Seiten, Hrsg. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Postfach, 53107 Bonn.
- BMVEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, HRSG.), (2002): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. BMVEL, 103 S.
- BOHNE, H. (1988): Neue Aspekte der Bedeutung des Bodengefüges für die Durchwurzelung des Bodens und die Ausnutzung von Wasser und Nährstoffen durch die Wurzel. Kali-Briefe 19 (5) S. 325-334.
- BOHNE, H. (1991): Stabilität des Bodengefüges unter Einfluss der Bodennutzung – Voraussetzungen, Anforderungen, Möglichkeiten. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 2, Bodengefüge, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, S. 43-54.
- BOLLING, I. (1984): Bodenverdichtung und Bereifung bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Landtechnik 2, S. 54-57.
- BOLLING, I. (1986): Beanspruchung des Bodens beim Schlepper- und Maschineneinsatz. KTBL-Schrift 308, Bodenverdichtung beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup (Westf.).
- BOLLING, I. (1986): Bodenverdichtungen und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden. Forschungsberichte Max-Eyth Gesellschaft, 133.
- BONDAREV, A. G., V. W. MEDVEDEV, A. V. RUSANMOV & A. V. SUDAKOV (1987): Mobile farm machines-

- standards for admissible effects of running gear on the soil. Comments on GOST 26955-86, Zemledelie, No. 9, S.29-30.
- BORCHERT, H. & R. GRAF (1985): Über die Entwicklungstendenzen des Bodengefüges in tiefgelockerten Böden aus verschieden geologischen Substraten. DVWK Schriften, 70, S. 75-135.
- BORK, H.-R. (1991): Bodenerosionsmodelle - Forschungsstand und Forschungsbedarf. Berichte über Landwirtschaft. NF. Sonderheft. 205: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Bd 3. Bodenerosion. Paul Parey Verlag. Hamburg, Berlin. S. 51-67.
- BORK, H.-R. ET AL. (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Klett, v.a. Kap. 3 und 4, 328 S.
- BÖRNER, H. (1990): Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. UTB Agrarwissenschaften, 6. Auflage, Stuttgart, 518 S.
- BOTSCHKE, J., S. KRAUSE, T. ABEL & A. SKOWRONECK (1987): Hydological parameterization of piping in loess-rich soils in the Bergisches Land, Nordrhein-Westfalen, Germany. J. Plant Nutr. Soil. Sci, 165 / 4, S. 506-510.
- BOUMA, J. (1980): Soil morphology and preferential flow along macropores. Agricultural Water Management, Bd. 3 (1980/1981). Amsterdam. S. 235-250.
- BRANDT, T. (1995): Hochwasserschutzkonzepte in Deutschland. Kasseler Wasserbau-Mitteilungen Nr. 2, S. 45-49.
- BRIESE, D. & CH. ERPENBECK (1986): Landwirtschaftliche Wege im Rahmen des Boden- und Gewässerschutzes - Probleme und Lösungsmöglichkeiten. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 27, S. 158-164.
- BRIESE, D. (1984): Zur Problematik landwirtschaftlicher Wege in Einzugsgebieten von Trinkwassersertalsperren. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 40, S. 43-48.
- BROCK, TH. D. (Hrsg.) (2001): Mikrobiologie. Spektrum Verlag Heidelberg – Berlin, 1175 S.
- BRONSTERT, A., N. DEMUTH & A. MEUSER (1999): Einfluss von Versiegelungen mit anschließender Versickerung des Niederschlagswassers auf den Wasserhaushalt von Hängen. Wasser & Boden, 51/6, S. 9-15.
- BRONSTERT, A. & D. KATZENMAIER (2001): The role of infiltration conditions for storm runoff generation at the hillslope and small catchment scale. Leibundgut, C. & S. Uhlenbrook (Hrsg.): Freiburger Schriften zur Hydrologie, 13, 60-67.
- BRONSTERT, A., S. VOLLMER & J. IHRINGER (1995): Die Bedeutung von Flurbereinigungsmaßnahmen für das Abflussverhalten von Starkniederschlägen in ländlichen Gebieten. In: Wasser & Boden, 47. Jahrg. Heft 9/1995. S. 29-46.
- BROWN, S. M., H. F. COOK & H. C. LEE (2000): Topsoil characteristics from a paired farm survey of organic versus conventional farming in Southern England. Biol Agriculture Hortic, 18, S. 37-54.
- BRUCK, W. (1995): Monetäre Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen als Bestandteil des Planungs- und Abwägungsprozesses. Kasseler Wasserbau-Mitteilungen Nr. 2, S. 63-78.
- BRUNOTTE, J. & C. SOMMER (1998): Mulchsaat – ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Landwirtschaft. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode, Amazonen-Werke, H. Dreyer GmbH & Co. KG (Hrsg.).
- BRUNOTTE, J. (1990): Landtechnische Maßnahmen zum bodenschonenden und bodenschützenden Zuckerrübenanbau. Dissertation, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitsreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft 183, 182 S.
- BRUNOTTE, J. (1991): Maßnahmen zum Bodenschutz im Zuckerrübenanbau. KTBL-Arbeitspapier 159, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.), Darmstadt, 102 S.
- BRUNOTTE, J. (1999): Einordnung der Sähverfahren in Bodenbearbeitungskonzepte. KTBL-Schrift 383, S. 81-88.
- BRUNOTTE, J., C. H. ROTH, P. HOLLMANN & C. SOMMER (1995A): Einzelbetrieblicher Nutzen-Kosten-Vergleich von Erosionsschutz durch Mulchsaatverfahren. In: Landbauforschung Völkenrode, 45. Jahrgang, Heft 3, S. 122-134.
- BRUNOTTE, J., C. H. ROTH, P. HOLLMANN & C. SOMMER (1995B): Was Erosionsschutz bringt. DLG Mitteilungen 8, S. 20-25.

- BRUNOTTE, J., M. WEIBBACH, H. ROGASIK, E. ISENSEE & C. SOMMER (2000): Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrüben-Erntetechnik. Zuckerrübe, 49. Jg. (1), S. 34-40.
- BRUNOTTE, J., SCHÄFER, B., C. & D. WOLLENWEBER (1999): Mulchsaat: Balsam für Böden und Rüben. Top agrar, S. 54-59.
- BRUNOTTE, J., WINNIGE, B., FRIELINGHAUS, M. & C. SOMMER (1999): Der Bodenbedeckungsgrad - Schlüssel für gute fachliche Praxis im Hinblick auf das Problem Bodenabtrag in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz, 2/1999, S. 57-61.
- BUCHER, B. & S. DEMUTH (1985): Vergleichende Wasserbilanz eines flurbereinigten und eines nicht flurbereinigten Einzugsgebietes im Ostkaiserstuhl für den Zeitraum 1977-1980. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 29. Jahrg., Heft 1. S. 1-4.
- BUCHNER, W. (2000): Erosion dauerhaft abwehren. Mais, 28. Jg. (4), S. 144-148.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (HRSG.) (1997): Hochwasser – Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht. BfG-1022, 53 S.
- BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (1998): BBodSchG Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17.3.1998, Bundesgesetzblatt Jg., 1998 Teil I, Nr. 16, ausgegeben zu Bonn am 24.3.1998.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (HRSG.) (2001): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. 105 S.
- CARTER, M., R. (HRSG.) (1994): Conservation Tillage in temperate Agroecosystems. Lewis Publishers, 182 S.
- CASALE, R. & C. MARGOTTINI (HRSG) Floods and Landslides. Springer 1999 373 S.
- CASALE, R., M. BORGA, E. BALTAS & P. SAMUELS (Hrsg.), (1999): River basin modelling, management and flood mitigation. Proceedings of the workshop / expert meeting, 25. / 26. Sept. 1997, Monselice, Padua, Italy, 277 S.
- CHAMEN, W. C. T., R. E. COPE, A. GEIKIE & J. V. STAFFORD (1985). Divisional Note. Nat. Inst. Agric. Eng. UK, No. DN 1263.
- COLLA, G. ET AL. (2000): Soil physical properties and tomato yield and quality in alternative cropping systems. Agronomy Journal, 92, S. 924-932.
- COLLINS, H.-J. (1984): Dränung fördert den Schutz der Umwelt. In: Wasser & Boden, Bd. 9. Hamburg - Berlin. S. 436-442.
- DANFORS, B. (1994): Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. Soil Tillage Res. 29, S. 135-144.
- DBU (DEUTSCHE BUNDESTIFTUNG UMWELT) (HRSG.) (2002): Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße. DBU Projekt AZ 15877, Endbericht 183 S.
- DEBRUCK, J. (1999): Goldene Regeln beim Umgang mit Stroh. Landwirtschaft ohne Pflug, 3/1999, S. 15-16.
- DEMMELE, M., HAHNENKAMM, O., KORMANN, G. & M. PETERREINS (2000): Gleichstandsamt bei Silomais. Landtechnik, 55. Jg. (3), S. 210-211.
- DEMUTH, N. & A. HILTPOLD (1993): „Preferential flow“: Eine Übersicht über den heutigen Kenntnisstand. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bd. 156, Weinheim. S. 479-484.
- DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT (HRSG.) (2001): Bodenschonung mit moderner Technik. Arbeitsunterlage, 30 S.
- DEXTER, A. R. (1986): Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. I. Effects of seed-bed aggregate size and sub-soil strength on wheat root. Plant and Soil 95, S. 123-133.
- DEXTER, A. R. (1987): Tunnelling in soil by earthworms. Soil Biol. & Biochem. 10, S. 447-449.
- DEXTER, A. R. (1988): Advances in characterization of soil structure. Soil Tillage Res. 11.S.199-238.
- DICKEY ET AL. (1989): To till or not to till during drought. Eight experts share their views on the performance of conservation tillage and no till (...), Journal of Soil and Water Conservation, March-April, S. 117-120.
- DIETZ, T. (1990): Erosionsschäden vermeiden. AID Nr. 108, Bonn, S. 32 S.

- DIEZ, T. (1993): Erosionsschäden vermeiden. AID-Schrift 1108, Bonn, 32 S.
- DIKAU, R. (1986): Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen. Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 81., Heidelberg, 195 S.
- DIN 1185 (1950): Dränanleitung. Deutscher Normenausschuss.
- DITTRICH, I. & A. MÜNCH (1999): Künstliche Niederschlagsversickerung und die Änderung der Grundwasserneubildung. In: Wasser & Boden, 51. Jahrg. Heft 9, Hamburg - Berlin. S. 11-16.
- DIXON, D. M. & D. R. LINDEN (1972): Soil air pressure and water infiltration under border irrigation. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36, S. 948-953.
- DLG (Hrsg.), (2003): DLG Mitteilungen: Sommergetreide pfluglos bestellen – USA: Direktsaat plus „Gensoja“ – Grenzen des Systems? – Ein Drittel Mulchsaat., <http://www.dlg-mitteilungen.de/de/mulchsaat/index.html> (Zitiert am 13.3.2003).
- DOMSCH, H. (1995): Veränderung des Bodengefüges in Regelspuren. Landtechnik 50 (1), S. 10-11.
- DUNNE, T. & R. D. BLACK (1970): An experimental investigation of runoff production in permeable soils. Water Resour. Res., 6 (2), S. 478-490.
- DUNNE, T. (1978): Field studies of hillslope processes. In: M. J. Kirkby (Hrsg.): Hillslope Hydrology, John Wiley, New York, S. 227-294.
- DUTTMANN, R., TH. MOSIMANN & W. THIEM (1999): Partikelgebundene Stofftransporte in Agrargebieten (Löbbecke im Niedersächsischen Berg- und Hügelland). – Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., 90, Exkursionsführer Jahrestagung Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft in Hannover, Exkursion H 2, Oldenburg, S. 437-457.
- DVWK (Hrsg.) (1980): Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte. Teil I: Grundansprache der Böden. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 105, 18 S.
- DVWK (Hrsg.) (1982): Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte. Teil II: Ermittlung von Standortkennwerten mit Hilfe der Grundansprache der Böden. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 116, 15 S.
- DVWK (Hrsg.) (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden – Teil I Mechanische Belastbarkeit. DVWK Materialien 234/1995, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden – Teil II: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. DVWK Materialien 235/1997, Bonn, 7 S.
- DVWK (Hrsg.) (1998): Bodenverdichtung - Grundlagen für eine nachhaltige Landwirtschaft aus bodenkundlicher Sicht. DVWK Materialien 4/1998 Bonn 59 S.
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. stark bearbeitete Auflage. Verlag für Bauwesen, Berlin, 563 S.
- ECKERT, H. & G. BREITSCHUH (1994): Kritische Umweltbelastungen Landwirtschaft (KUL) Eine Methode zur Analyse und Bewertung der ökologischen Situation von Landwirtschaftsbetrieben. In: EULANU. Effiziente und umweltverträgliche Landnutzung. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Schriftenreihe Heft 10. Selbstverl. Jena.
- ECKERT, H., G. BREITSCHUH & D. SAUERBECK (1999): Kriterien umweltverträglicher Landwirtschaft – ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben. Agrobiol. Res., 52, 1, S. 57-76.
- EDWARDS, C. A. (1980): Interactions between agricultural practice and earthworms. In: Dindal, D. L. (Hrsg.): Soil biology as related to land use practice. roc. VII Int. Coll. Zool., Syracuse, S. 3-12.
- EDWARDS, W. M., ET AL. (1993): Tillage Studies with a Corn-Soybean Rotation: Hydrology and Sediment Loss. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, S. 1051-1055.
- EGGELSMANN, R. (1970): Dränaufwand und Dränbedarf in der Bundesrepublik Deutschland. Wasser und Boden 22, S. 344-346.
- EGGELSMANN, R. (1971): Umfang und bodenbedingter Bedarf der Landeskultur-Maßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 12, S. 153-162.

- EGGELSMANN, R. (1981a): Dränanleitung für Landbau, Ingenieurbau und Landschaftsbau. 2. Aufl. Paul Parey Verlag, Hamburg Berlin, 290 S.
- EGGELSMANN, R. (1981b): Ökohydrologische Aspekte von anthropogen beeinflussten und unbeeinflussten Mooren Norddeutschlands, Diss. Univ. Oldenburg, 175 S.
- EGGELSMANN, R. (1990): Moor und Wasser. In: K. Göttlich (Hrsg.): Moor- und Torfkunde. 3. neubearbeitete Aufl., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 288-320.
- EGLI, T. (2001): Gefahrenkarten für die Bauvorsorge und Notfallplanung. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. Forschungsbereich 20016114, S. 75-85.
- EHLERS, W. & K. BAEUMER (1988): Effect of the paraplow on soil properties and plant performance. International Soil Research Organization. Proceedings of 11th International Conference, S. 637-642.
- EHLERS, W. (1973): Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung in unbearbeiteten und bearbeiteten Lössböden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 134. Band, Heft 3, S. 192-206.
- EHLERS, W. (1975): Observation on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soils. Soil Sci. 119, s. 242-249.
- EHLERS, W. (1983): Auswirkungen der Bodenbelastung mit schwerem Gerät und der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge und das Pflanzenwachstum. Kali Briefe 16 (9), S. 499-516.
- EHLERS, W. (1991): Wirkung von Bearbeitungssystemen auf gefügeabhängige Eigenschaften verschiedener Böden. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 2, Bodengefüge, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, S. 118-137.
- EHLERS, W. (1992): Reduzierte Bodenbearbeitung – Ökologische Folgen und ackerbauliche Grenzen. VDLUFA-Schriftenreihe 35, Kongressband, S. 35-58.
- EHLERS, W. (1993): Kann Bodenbearbeitung zum Schutz des Bodens vor Verdichtungen und Erosion beitragen? Mitteilungen der dt. Bodenkundl. Gesellschaft 72, S. 1447-1450.
- EHLERS, W., D. WERNER & S. FENNER (1994): Reconsolidation of a deep-loosened silt loam under plowing and conservation tillage. International Soil Tillage Research Organization. Proceedings of 13th International Conference, S. 55-60.
- EHLERS, W., D. WERNER & S. FENNER (1994): Reconsolidation of a deep-loosened silt loam under plowing and conservation tillage. ISTRO, Proc. of 13th Intern. Conference, Aalborg, Denmark, S. 55-60.
- EHLERS, W., D. WERNER & TH. MÄHNER (2000): Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Lössparabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde 163, S. 321-333.
- EHLERS, W., K. SCHMIDTKE & R. RAUBER (2003): Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. Landnutzung und Landesentwicklung 44, Heft 1, S. 9-18.
- EHRMANN, O. (1996): Regenwürmer in einigen südwestdeutschen Agrarlandschaften: Vorkommen, Entwicklung bei Nutzungsänderungen und Auswirkungen auf das Bodengefüge. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 35, Stuttgart, 135 S.
- EITZINGER, J. & E. KLAGHOFER (1995): Einfluss unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung auf ausgewählte bodenphysikalische Eigenschaften. Wasser & Boden, 47. Jahrg., Heft 11, S. 43- 48.
- EMMERLING E. & U. HAMPL (2002): Wie sieht reduzierte Bodenbearbeitung aus. Ökologie und Landbau, 124(4), S. 19-23.
- EMMERLING, C. & U. HAMPL (2002): Wie sich reduzierte Bodenbearbeitung auswirkt. Ökologie und Landbau, 124/4, S. 19-23.
- EMMERLING, C. (2002): Einfluss reduzierter Grundbodenbearbeitung im ökologischen Landbau auf bodenökologische Eigenschaften. In: Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz / Stiftung Ökologie und Landbau (Hrsg.): Bodenbearbeitung und Bodengesundheit. Schriftenreihe der Landesanstalt für Pflanzenanbau und Pflanzenschutz, Heft 13, S. 25-46.
- ENGEL, H. (1997): Die Ursache der Hochwasser am Rhein – natürlich oder selbstgemacht? In: Immendorf, R. (Hrsg.): Hochwasser, Natur im Überfluss?, S. 9-30.
- ENGMAN, E. T. (1986): Roughness coefficients for routing surface runoff. Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE 112, S. 39-53.

- ERMICH, D. & B. HOFMANN (1984): Körnungsarten- und feuchteabhängige Grenzwerte der Druckbelastung des Ackerbodens zur Verminderung von Schadverdichtungen bei der Pflanzenbettbereitung zu Kartoffeln. *Wiss. Z. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Math.- Naturwiss. R.* XXXIV (1), S. 19-28.
- ERNSTBERGER, H. & V. SOKOLLEK (1984): Über Wirkungen von Dränen auf den Gebietswasserhaushalt. In: *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges., Bd. 40*, S. 63-68.
- ESTLER, M. & C. SOMMER (1989): Stand der Technik, Entwicklungstendenzen und Forschungsbedarf bei der Mulchsaattechnik für Zuckerrüben und Mais. *KTBL-Arbeitspapier 130*, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.), Darmstadt, S. 17-31.
- ESTLER, M. (1987): Verfahrenstechnische Lösung zur Verminderung von Bodenerosion - Teil I. *Landtechnik*, 42 Heft 3 S. 118-119.
- ESTLER, M. (1987): Verfahrenstechnische Lösung zur Verminderung von Bodenerosion, Teil II. *Landtechnik*, 42 Heft 4 S. 166-170.
- FAO (2003): Conservation Agriculture. online Workgroup on CA, <http://www.fao.org/ag/ags/AGSE/Main.htm> (zitiert am 20.03.2003).
- FENNER, S. (1997): Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Ackerstandort. *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 160, S.157-164.
- FLEIGE, H., R. HORN & M. WEIßBACH (1999): Bodenerosion in Fahrspuren und mögliche Erosionsschutzmaßnahmen. *Wasser & Boden*, 51 / 12, S. 33-36.
- FLURY, M. & H. FLÜHLER (1994): Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resources Research* 30, No. 7. S. 1945-1954.
- FORRER, I. (1997): Solute Transport in an Unsaturated Field Soil: Visualization and Quantification of Flow Patterns Using Image Analysis. Dissertation, ETH Zurich, No. 12476, 128 S.
- FRANKEN, H. & M. LOH (1987): Der Einfluss ackerbaulicher Maßnahmen auf die Dynamik der Aggregatstabilität. *Z.f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 28, S. 35-41.
- FREDE, H.-G. (1991): Gefügebildende Wirkungen natürlicher Kräfte auf schluffreichen Böden. In: *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 2, Bodengefüge*, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, S. 55-68.
- FREDE, H.-G., R. BEISECKER & S. GÄTH (1994): Long-term impacts of tillage on the soil ecosystem. *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157, S.197-203.
- FRIEBE, B. (1990): Die Besiedlung von Ackerböden durch die Meso- und Makrofauna in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung. *Verh. GfO* 19 (2), S. 246-252.
- FRIEBE, B. (1994): Einfluss langfristig differenzierter Bodenbearbeitung auf die Entwicklung der Meso-, Makro- und Megafauna. In: *TEBRÜGGE, F. & M. DREIER (Hrsg.): Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden. Wissenschaftlicher Fachverlag Gießen*, S. 191-203.
- FRIELINGHAUS, M. & B. WINNIGE (2000): Maßstäbe bodenschonender landwirtschaftlicher Bodennutzung, Erarbeitung eines Bewertungs- und Entscheidungssystems zur Indikation der Wassererosion. *UBA-Texte. 43-00, ISSN 0722-186X*
- FRIELINGHAUS, M. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenerosion. *KTBL (Hrsg.): Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlussfolgerungen für gute fachliche Praxis. KTBL Arbeitspapier 266*. S. 31-55.
- FRICTSCH, U. (2002): Entwicklung von Landnutzungsszenarien für die ökologische Modellierung. *Brandenburgische Umweltberichte, Heft 12. Dissertation, Universität Potsdam*.
- FRÖWEIN, P. (1996): Leitlinien zur Unterstützung des Hochwasserschutzes in Bodenordnungsverfahren. In: *Wasser & Boden*, 48. Jahrg. Heft 2/1996. Hamburg - Berlin. S. 33-47.
- FUKUDA, H. (1964): Subdraining in heavy soils. Theoretical considerations. *Soil Sci.* 97, S. 281-285.
- FULLEN, M. A. (1985): Compaction, hydrological processes and soil erosion on loamy sands in East Shropshire, England. *Soil Tillage Res.* 6 S. 17-29.
- FULLEN, M. A. (1991): A comparison of runoff and erosion rates on bare and grassed loamy sand soils. *Soil Use and Management*, Vol. 7, No.3, S. 136-139.

- GARBE, V., B. RODEMANN & G. BARTELS (2000): Erfolgreich gegen Fusarien. *Mais*, 28. Jg. (4), S. 160-163.
- GEIGER, W. & H. DREISEITL (1995): Neue Wege für das Regenwasser – Handbuch zu Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser. EmscherGenossenschaft, Essen und Internationale Bauausstellung Emscherpark GmbH (Hrsg.), München, 293 S.
- GENEREUX, D. P., H. F. HEMOND & P. J. MULHOLLAND (1993): Spatial and temporal variability in streamflow generation on the West Fork of Walker Branch watershed. *Journal of Hydrology*, Heft 142, Amsterdam, S. 137-166.
- GERKE, H. H. & M. T. VAN GENUCHTEN (1993): A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resources Research*, Bd. 29, Heft 2, S. 305-319.
- GERMANN, P. & K. BEVEN (1985): Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores. *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 7, S. 990-996.
- GERMANN, P. (1981): Untersuchungen über den Bodenwasserhaushalt im hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach. *Mitteilungen 51*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH, 135 S.
- GERMANN, P. (1986): Rapid drainage response to precipitation. *Hydrological Processes*, Vol. 1, S. 3-13.
- GERMANN, P. (1994): Neuere Erkenntnisse über die Infiltration und die Bodenwasserbewegung. In: DVWK (Hrsg.) *Niederschlag - Abfluss - Modelle für kleine Einzugsgebiete und ihre Anwendung*. 18. Fortbildungslehrgang Hydrologie vom 19.-23. Sept. 1994, Karlsruhe, S. 16-1 – 16.
- GESELLSCHAFT FÜR KONSERVIERENDE BODENBEARBEITUNG E.V. (Hrsg.), (2001): Förderprogramme Landwirtschaft – konservierende Bodenbearbeitung. www.gkb-ev.de/Foerderprogramme.htm
- GIESELER, O. (2001): Vorbeugender Hochwasserschutz - dargestellt am Retentionskataster für das Bundesland Hessen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene*. Forschungsbereich 20016114, S. 86-102.
- GLASSTETTER & PARASSUN (1992): The influence of earthworm activity on erodibility and soil losses in central European agricultural soils. In: H. Hurni and Kebede Tato (Hrsg.): *Erosion, conservation and small-scale farming*. Bern, Geographica Bernensia: S. 285-298.
- GLOVER, J. D., J. P. REGANOLD & P. K. ANDREWS (2000): Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agric Ecosyst Environ*, 80, S. 29-45.
- GRAFF, O. & F. MAKESCHIN (1979): Der Einfluss der Fauna auf die Stoffverlagerung sowie die Homogenität und die Durchlässigkeit von Böden. *Z. für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 142, S. 476-491.
- GREEN, W. H. & G. A. AMPT (1911): Studies on soil physics. I: The flow of air and water through soils. *J. Agr. Sci.* 4, S. 1-24.
- GREIVING, S. (2001): Raumordnung, Regionalplanung und kooperative Regionalentwicklung und ihre Aufgaben beim Risikomanagement der Naturgefahr Hochwasser. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene*. Forschungsbereich 20016114, S. 39-51.
- GRUBER, H., K. HANDEL & B. BROSCHEWITZ (2000): Influence of farming system on weeds in thresh crops of a six-year crop rotation. *J Plant Diseases Protect Spec Iss*, 7, S. 33-40.
- GRUBER, W. (1994): Der Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Gefügestabilität von Ackerböden. In: TEBRÜGGE, F. & M. DREIER (Hrsg.): *Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden*. Wissenschaftlicher Fachverlag Gießen, S. 191-203.
- GRUBER, W. (1999): Definition und Einordnung von Verfahren der Sähetechnik. *KTBL-Schrift* 383, S.7-8.
- HACH, G. & W. HÖLTI (1989): Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Wasserrückhalte-, Wasserreinhalte- und Speicherfähigkeit in der Landschaft. *Z. f. Kulturtechnik und Landesentwicklung* 30, S. 8-21.
- HÄDTLEIN, M., M. KALTSCHMITT, I. LEWANDOWSKI & H. N. WURL (Hrsg.), (2000): Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft. *Landwirtschaft im Spannungsfeld zwischen Ökologie, Ökonomie und Sozialwissenschaften*. Initiativen zum Umweltschutz, Band 15, Berlin, 421 S.
- HÄKANSSON, I. & R. C. REEDER (1994): Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent,

- persistence and crop response. *Soil and Tillage Research* 29, S. 277-304.
- HAKANSSON, I. ET AL. (1987): Effects of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil Tillage Res.* ,10, S. 259-268.
- HALL, J. K., R. O. MUMMA & D. W. WATTS (1991): Leaching and runoff of herbicides in a tilled and untilled field. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 37, S. 303-314.
- HAMBLIN (1985): *Advances in Agronomy* 38, S. 95-158.
- HAMPL, U. (1995): Bodenschutz ist Hochwasserschutz. In: *Ökologie & Landbau*, 23. Jahrg., Heft 94 (2/1995). S. 38-39.
- HAMPL, U. (1999): Projekt ökologische Bodenbewirtschaftung. *Ökologie und Landbau*, 27, 22-23.
- HAMPL, U., M. HOFFMANN, B. KAISER-HEYDENREICH, W. KRESS & J. MARKL (1995): Ökologische Bodenbearbeitung und Beikrautregulierung. *Gesellschaft für Boden, Technik, Qualität und Stiftung Ökologie und Landbau, Sonderausgabe*, 128 S.
- HANK, K. & P. WAGNER (2001): Autonome Fahrzeugführung mit hochgenauen Navigationssystemen: Ökonomische Effekte einer verringerten Überlappung bei der Bodenbearbeitung. Technische Universität München, <http://www.weihenstephan.de/hi/veroeff/poster/ht99p16.htm>, 2 S.
- HARMS R. (1986): Der Einfluss der Rohrdränung auf das Hochwasserverhalten kleiner Einzugsgebiete. 2. Wiss. Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft des DVWK, Bad Sonneberg.
- HARMS R. (1986): The effects of artificial subsurface drainage on flood discharge. 2. Int. Conference, Southampton, Springer Verlag, S. 189-198.
- HARRACH, T & T. VORDERBRÜGGE (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 2, Bodengefüge*, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, S. 69-82.
- HARTGE K. H. & R. HORN (1991): Einführung in die Bodenphysik. 2. überarb. und erw. Aufl., Enke, Stuttgart.
- HARTGE K. H. & R. HORN (2002): Gedanken zum derzeitigen Verdichtungszustand von Ackerböden und zur Nachhaltigkeit ihrer Nutzung. *Wasser und Boden*, 54/10, S. 34-38.
- HARTGE K. H. (1994): Anwendbarkeit des Konzeptes „Normalverdichtung : Überverdichtung“ als Ersatz für andere Verdichtungskonzepte in Ackerböden. In: *Wissensch. Mitt. der Bundesforschungsanstalt für Landw. Braunschweig-Völkenrode (FAL)* (Hrsg.): Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden (...). Sonderheft 147, S. 113-127.
- HARTGE K. H. (2001): Der Boden als Körper – Bestimmung seiner Volumenänderung im Bodenprofil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164, S. 247-252.
- HAYNES, R.J. & R. TREGURTHA (1999): Effects of increasing periods under intensive arable vegetable production on biological, chemical and physical indices of soil quality. *Biol. Fertil. Soils*, 28, S. 259-266.
- HEISLER, C., H. ROGASIK, J. BRUNOTTE & M. JOSCHKO (1998): Konservierende Bodenbearbeitung und biologische Aktivität. *Landbauforschung Völkenrode*, Heft 4, S. 199-122.
- HENKE, W. (1990): Lumbriciden und deren Aktivität bei differenzierter Bodenbearbeitung. Symposium: Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden, 17.-18. Mai 1998, Gießen, S. 99-108.
- HERRMANN, A. & R. ÜBERSCHÄR (1993): Quick exfiltration response of porous aquifers to actual basin input and consequences for transport modelling – the case of Eisenbach study catchment area. *Modelling Geo-Biosphere Processes* 2, Cremlingen, S. 25-40.
- HERRMANN, A. & W. STICHLER (1980): Groundwater-runoff relationships. *Catena*, 7, S. 251-263.
- HEWLETT, J. D. & A. R. HIBBERT (1961): Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. *J. Geophys. Res.*, 68 / 4, S. 1081-1087.
- HEWLETT, J. D. & A. R. HIBBERT (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: W. E. SOPPER & H. W. LULL (Hrsg.): *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon, Oxford, S. 275-290.
- HODARA, J. & H. DOMZAL (1991): A preliminary study on the durability of the effects of compaction on a

- brown soil derived from loess. *Soil Tillage Res.* 19, S. 255-262.
- HOFMAN, G. & F. APPELMANS (1975): Seasonal changes of the aggregate instability. In: *Pflanz. und Bodenk.*, Bd. 138, S. 209-216.
- HOFMANN, B. & H. RÄBIGER (1987): Einfluss unterschiedlicher Traktorenfahrwerke auf die Bodenstruktur. *Feldwirtschaft* 28 (1), S. 18-20.
- HOOPER, R. P. & C. A. SHOEMAKER (1986): A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research*, Bd. 22, Heft 10, S. 1444-1454.
- HORAT ET AL. (1997): Wie grosse Hochwasser kann die Schüss bringen? Über die Entstehung extremer Hochwasser im verkarsteten Einzugsgebiet der Schüss. *Proceedings of the 12. Internat. Congress of Speleology, Besancon*, S. 9-12.
- Horn, R. & J. ROSTEK (2000): Subsoil compaction processes – state of knowledge. *Advances in Geocology*, 32, S. 44-54.
- HORN, R. & K.-H. HARTGE (2001): Das Befahren von Ackerflächen als Eingriff in den Bodenwasserhaushalt. *Wasser und Boden*, 53/9, S. 13-19.
- HORN, R. & K.-H. HARTGE (2001): Gedanken zum Problem der Verdichtung in Ackerböden. *Bodenschutz Heft 3*, S. 76-78.
- HORN, R. & M. LEBERT (1989): Die Bedeutung des Bodenaufbaues und der Fahrgeschwindigkeit von Traktoren auf die Druckfortpflanzung in Ackerböden. *CDI/MEG Landtechnik* 7, S. 63-71.
- HORN, R. (1981): Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit. *Landschaftsentwicklung und Umweltforschung* Nr. 10.
- HORN, R. (1986): Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. *Z. für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 149, S. 9-18.
- HORN, R. (1999): Unterbodenverdichtung – gibt es gesicherte Hinweise auf nachhaltige Ertragseinbußen? *Wasser & Boden*, 51/12, S. 15-18.
- HORN, R., J. STORK & A. R. DEXTER (1987): Untersuchungen über den Einfluss des Bodengefüges für den Eindringwiderstand in Böden. *Z. Pflanzenernährung Bodenkunde*, 150, S.342-347.
- HORN, R., T. WAY, & J. ROSTEK (2001a): Effect of repeated wheeling on stress/strain properties and ecological consequences in structured arable soils. *Soil and Tillage Research*.
- HORN, R., T. WAY, & J. ROSTEK (2001b): Optimierung von Überfahrungen und Bodenbearbeitung zur Vermeidung von Verdichtung und Erosion. *Zuckerrübe* 50, S. 160-162.
- HOUSE, G. J. & R. W. PARMALEE (1985): Comparison of soil arthropods and earthworms from conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil & Tillage Research* 5, S. 351-360.
- HÖVELMANN, L. & H. FRANKEN (1993): Einfluss von Fruchtfolge und Bodenbearbeitung auf die Stabilität oberflächennaher Bodenaggregate rekultivierter Böden aus Löß. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundl. Gesellsch.*, 72, S.127-130.
- HUDSON, N. W. & D. C. JACKSON (1959): Results achieved in the measurement of erosion and runoff in Southern Rhodesia. *Proceedings of the Third Inter-African Soils Conference. Dalaba*. S. 575-583.
- HUSAIN, J. (2002): Wasserinfiltration in tonigen und strukturierten Böden auf unterschiedlichen Skalen und bei Nutzungsänderung. *Cottbus BTU, XIV, Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung*, 18, 120 S.
- ISTOK, J. D. & G. F. KLING (1982): Effect of surface drainage on runoff and sediment yield from an agricultural watershed in Western Oregon, U.S.A.. In: *Journal of Hydrology*, Bd. 65 (1983). Amsterdam. S. 279-291.
- JAYNES, D. B., S. D. LOGSDON & R. HORTON (1995): Field method for measuring mobile/immobile water content and solute transfer rate coefficient. *Soil Sciences Society of America Journal*, Bd. 59, Heft 2. S. 352-356.
- JOSCHKO, M. & G. HÖFLICH (1996): Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf das Bodenleben in Sandböden. In: *Bornimer Agrartechnischer Berichte*, Heft 9, S. 41-56.
- JOSCHKO, M., H. DIESTEL & O. LARINK (1991): Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurement. *Biol. Fertil. Soils*

- 8, S. 191-196.
- JURY, W., W. R. GARDNER & W. H. GARDNER (1991): Soil Physics. Fifth Edition, 328 S.
- KAEMMERER, A. (2000): Raum-Zeit-Variabilität von Aggregatstabilität und Bodenrauigkeit. Diss. an der Universität München, FAM-Bericht 40, 207 S.
- KAINZ, M. (1989): Runoff, erosion and sugar beet yields in conventional and mulched cultivation. Soil Technology Series 1, S. 103-114.
- KAINZ, M., S. KIMMELMANN & H.-J. REENTS (2002): Pflug – ja, nein oder weniger? Ökologie und Landbau, 124/4, S. 16-23.
- KÄMPF, R. (1982): Grenzen der Intensivierung im Ackerbau. Bayerisches Landw. Jahrbuch, 59, S. 939-945.
- KAO, I. (1980): Environmental assessment of water control structures in the Grand Ricer basin. IAHS 130, S. 209-214.
- KASTEEL, R. (1997): Solute Transport in an Unsaturated Field Soil: Describing Heterogeneous Flow Fields Using Spatial Distributions of Hydraulic Properties. Dissertation, ETH Zurich, No. 12477, 107 S.
- KATZENMIER, D. U. FRITSCH & A. BRONSTERT (2001): Quantifizierung des Einflusses von Landnutzung und dezentraler Versickerung auf die Hochwasserentstehung. In: Heiden, S.; R. Erb & F. Sieker (Hrsg.): Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Initiativen zum Umweltschutz, 31, S. 327-357.
- KAZMAN, S., I. SHAINBERG & M. GAL (1983): Effect of low levels of exchangeable Na and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils. Soil. Sci. 35. S. 184-192
- KERNER, F. & B. MURSCHEL (1991): Die räumliche und zeitliche Variabilität von bodenphysikalischen Erosionsparametern. Mittl. Dtsch. Bodenk. Ges., 66/ II, S. 959-962.
- KLADIVKO, E. J. (2001): Tillage systems and soil ecology. Soil & Tillage Res, 61, 61-76.
- KLEEBOG, H.-B. & K.-H. ROTHER (1996): Hochwasserflächenmanagement in Flusseinzugsgebieten. Wasser und Boden, 48 / 2, S. 24-32.
- KLEEBOG, H.B. (1995): Extreme Hochwasser – Ursachen und Einflüsse. Z. f. Kulturtechnik und Landesentwicklung 37, S. 103-107.
- KLEYER, M. & U. BABEL (1984): Gefügebildung durch Bodentiere in konventionell und biologisch bewirtschafteten Ackerböden. Z Pflanzenernährung Bodenkunde, 147, S. 98-109.
- KNAUER, N. (1993): Ökologie und Landwirtschaft: Situation – Konflikte - Lösungen. Stuttgart, Ulmer, 280 S.
- KNÜSTING, E. (1992): Regenwürmer auf Ackerflächen mit abgestufter Bewirtschaftungsintensität. Dissertation, 154 S. Gießen.
- KOEHLER, G. (1992): Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrhein-Gebiet. Wasser & Boden, 44. Jahrg., Heft 1, Hamburg und Berlin. S. 11-15.
- KOEHLER, G., B. MARENBACH & J. SCHLÖBLER (1999): Abflussdämpfung durch Retention. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 5: Extreme Niederschläge und Wasserwirtschaft - Niederschlag und Abfluss - Internationales Symposium, S. 211-224.
- KÖLLER, K. (1986): Bodenverdichtungen beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Maßnahmen zu ihrer Minderung – Erfahrungen aus der Praxis. KTBL-Schrift 308, S.153-169.
- KONYHA, K. D., R. W. SKAGGS & J. W. GILLIAM (1992): Effects of drainage and water-management practices on hydrology. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, No. 5, S. 807-819.
- KOOLEN, A. J. & H. KUIPERS (1983): Agricultural soil mechanics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 241 S.
- KORNDÖRFER, C. (2001): Festgesetztes Überschwemmungsgebiet und Siedlungstätigkeit in der Stadt Dresden. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. Forschungsbereich 20016114, S. 117-122.
- KOUWENHOVEN, J. K., U. D. PERDOK, J. BOER & G. J. M. ORNEN (2002): Soil management by shallow mouldboard ploughing in The Netherlands. Soil & Tillage Res, 65, S. 125-139.

- KREMER, J., B. WOLF & D. MATTHIES (2002): Verformungsverhalten künstlicher Makroporen unter variierenden Druck- und Bodenfeuchtebedingungen. *J. Plant Nutr. Soil. Sci.*, 165 / 5, S. 627-633.
- KRETSCHMER, H. & K. BOHNE (1993): Beurteilung der Befahr- und Bearbeitbarkeit norddeutscher Moränenböden. *Mittl. Deutsche Bodenkundl. Gesellschaft*, 71, S. 65-68.
- KRETSCHMER, H., K. BOHNE & P. KAHLE (1994): Zur Wirkung technogener Verdichtung auf mechanische und hydraulische Bodeneigenschaften. In: *Wissensch. Mitt. der Bundesforschungsanstalt für Landw. Braunschweig-Völkenrode (FAL) (Hrsg.): Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden (...). Sonderheft 147*, S. 7-40.
- KREYE, H., V. GARBE, G. BARTELS & J. BRUNOTTE (1999): Pflanzenschutz im Weizen bei konservierender Bodenbearbeitung. *Getreide Magazin* Nr. 4. S. 180-183.
- KRIEBISCH, H. (2001): Elementarschadensversicherungsdeckung auf der Grundlage des Zonierungssystems für Überschwemmung, Rückstau und Starkregen (ZÜRS). In: *Umweltbundesamt (Hrsg.): Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. Forschungsbereich 20016114*, S. 123-128.
- KTBL (Hrsg.), (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlussfolgerungen für gute fachliche Praxis. *KTBL Arbeitspapier 266*. 131 S.
- KTBL (Hrsg.), (1999): Technik in der Pflanzenproduktion – Stellungnahme zum Entwurf des DVWK-Merkblattes „Ermittlung von Richtwerten zum Schutz des Unterbodens und Empfehlung für eine nachhaltige Landwirtschaft aus bodenkundlicher Sicht“.
- KÜHNER, T., W. BAUMGARTL, W. GRÄSLE, T. WAY & R. HORN (1994): Three-dimensional stress an strain distribution in a loamy sand due to wheeling with different slip. In: *OSTRO, Proc. of 13th International Conference, Aalborg, July 24-29*, S. 591-596.
- KUNTZE, H. (1981). Melioration vernässter Böden. In: *Agrarspektrum. Schriftenreihe des Dachverbandes Wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung e.V., Bd. 1. München*. S. 159-168.
- KUNTZE, H., G. ROESCHMANN & G. SCHWERTFEGER (1994): *Bodenkunde*. 5., neubearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 424 S.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (HRSG.) (2000): Handlungsempfehlung zur Erstellung von Hochwasser-Aktionsplänen. 12 S.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER (HRSG.) (1994): Empfehlungen zur standortangepassten Bodenbearbeitung. 14 S.
- LARINK O. (1991): Bodentiere als Bewohner und Gestalter des Bodenraumes. In: *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 2, Bodengefüge*, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, S. 83-95.
- LAWES ET AL. (1882): *On the Amount and Composition of the Rain and Drainage Water collected at Rothamsted*. W. Clowes, London.
- LEBERT, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden, Dissertation, Kiel, 130 S.
- LEE, K. E. (1985): *Earthworms – Their ecology and relationships with soils and land use*. Academic Press, Sydney. 130 S.
- LENNARTZ, B. (2002): Flächenhafte Stoffausträge aus ökologisch und konventionell bewirtschafteten Parzellen. *Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Sonderheft 2*, S. 118-122.
- LFL (1993): Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkungen auf das Abflussverhalten ländlicher Gebiete. *Schriftenreihe des Landesamtes für Flurneuordnung und Landesentwicklung Baden-Württemberg 3*, 145 S.
- LIEBIG, M. A. & J. W. DORAN (1999): Impact of organic production practices on soil quality indicators. *J Environm Quality*, 28, S. 1601- 1609.
- LINDEN, D. R. & R. M. DIXON (1975): Water table position as affected by soil air pressure. *Water Resour. Res.*, 11 (1), S. 139-143.
- LINKE, C. (1998): Direktsaat - eine Bestandsaufnahme unter besonderer Berücksichtigung technischer, agronomischer und ökonomischer Aspekte. Dissertation, Fakultät IV Agrarwissenschaften 11 - Fachbereich Agrartechnik, Universität Hohenheim.
- LIPIEC, J., I. HAKANSSON, S. TARKIEWICZ & J. KOSSOWSKI (1991): Soil properties and growth of spring

- barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Tillage Res.* 19, S. 307-317.
- LONDONG, D. (1992): Wirkungsprognosen für verschiedene Maßnahmen zur Hochwasserdämpfung. *Wasser und Boden*, 8, S. 516-530.
- LOWERY, B. & R. T. SCHULER (1994): Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. *Soil Tillage Research*, 29, S. 205-210.
- LUFT, G. & G. MORGENSCHWEIS (1984): Zur Problematik großterrassierter Flurbereinigung im Weinbaugebiet des Kaiserstuhls. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 25, S. 138-148.
- LUFT, G., G. MORGENSCHWEIS & R. KELLER (1981): Auswirkungen von Großterrassierungen auf hydrologische Prozesse im Ostkaiserstuhl. *Wasser und Boden*, 9, S. 436-442.
- LUTHIN, J. N. (1966): *Drainage Engineering*. Wiley & Sons, New York, 250 S.
- LUXMOORE, R. J. (1982): Infiltration and runoff predictions for a grassland watershed. *Journal of Hydrology*, Bd. 65 (1983). Amsterdam. S. 271-278.
- MA, J. Y., K. SANDBRINK, H. LI & L. D. MEYER (1991): Potential for soil crusting on farm lands in Göttingen as NH₄-use. *Proceedings of the International Symposium on Soil Crusting: Chemical and Physical Processes*. May 30 – June 1, 1991, Athens (Georgia, USA), *Catena Supplement*.
- MÄDER, P., A. FLIEBBACH, D. DUBOIS, L. GUNST, P. FRIED & U. NIGGLI (2002): Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science* 296, S. 1694-1697.
- MARTINEC, J. (1975): Subsurface flow from snowmelt traced by tritium. *Water Resour. Res.* 11, S. 496-497.
- MAULÉ, C. P. & J. STEIN (1990): Hydrologic flow path definition and partitioning of spring meltwater. *Water Resources Research*, Bd. 26, Heft 12. S. 2959-2970.
- MAUSER, W. (1985): Prognose von Hochwässern mit Landsat-Daten. *Verlag Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten*, 238 S.
- MAYRHOFER, P. & J. SCHAWERDA (1991): *Die Bauern, die Natur und das Geld. Modell Ökopunkte Landwirtschaft, Verein zur Förderung der Landentwicklung und intakter Lebensräume* (Hrsg.), Basel.
- MCDONNELL, J. J. (1990): A Rationale for Old Water Discharge Through Macropores in a Steep, Humid Catchment. In: *Water Resources Research*, Bd. 26, Heft 11. S. 2821-2832.
- MCDONNELL, J. J., M. K. STEWART & I. F. OWENS (1991): Effect of Catchment-Scale Subsurface Mixing on Stream Isotopic Response. *Water Resources Research*, Bd. 27, Heft 12. S. 3065-3073. Mosley, M. P. (1979): Streamflow generation in a forested watershed. *New Zealand, Water Resour. Res.*, 15 (4), S. 795-806.
- MCINTRE, D. S. (1958): Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Sci.* 85, S. 261-266.
- MCKYES, E. (1985): Soil cutting and tillage. In: *Development in Agricultural Engineering*, Elsevier, Amsterdam.
- MEDVEDEV, A. N. & W. G. CYBULKO (1996): Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils. *Soil & Tillage Research* 36 (3-4), S. 153-164.
- MEDVEDEV, V. V. & W. G. CYBULKO (1995): Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils. *Soil Tillage Res.* 36 S. 153-164.
- MENDEL, H. G. (2000): *Elemente des Wasserkreislaufs – Eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung*. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 244 S.
- MEURER, R. (1985): Flurbereinigung und Umwelt - Konflikte und Strategien. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, Jahrg. 26. Berlin - Hamburg. S. 66-80.
- MEUSER, A., H. ERNSTBERGER & V. SOKOLLEK (1987): Über die Wirkung eines Vegetationswandels auf das Abflußverhalten – Ergebnisse eines Einzugsgebietsmodells. *Wasser & Boden*, Heft 12. Hamburg - Berlin. S. 628-633.
- MICHAEL, A. (2001): mündliche Mitteilungen.
- MICHAEL, A., J. SCHMIDT & W. A. SCHMIDT (1996): *Erosion 2D – Parameterkatalog Sachsen, Anwendung*. In: *Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft und Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie* (Hrsg.): *Erosion 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser*. Band II, Dresden/Freiberg, 157 S.

- MIKOVARI, A., C. PETER & C. LEIBUNDGUT (1995): Investigation of preferential flow using tracer techniques. In: LEIBUNDGUT, C. (Hrsg.): Tracer technologies for hydrological systems. Proceedings of an international symposium, Boulder Colorado, USA, July 1995, IAHS Publications No. 229, Wallingford, Oxfordshire. S. 87-97.
- MOHANTY, B. P., R. HORTON, M. D. ANKENY (1996): Infiltration and macroporosity under a row crop agricultural field in a glacial till soil. *Soil Science*. Bd. 161, Heft 4. S. 205-213.
- MOLLENHAUER, K. & B. ORTMEIER (1994): Untersuchungen zum Einfluss der konservierenden Bodenbearbeitung auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion. Abschlussbericht des FuE-Vorhabens „Einführung von Verfahren der Konservierenden Bodenbearbeitung in der Praxis“, S. 183-218.
- MORGAN, R. P. C. (1999): *Bodenerosion und Bodenerhaltung*. Enke-Verlag, Stuttgart, 236 S.
- MORGAN, R. P. C., L. MARTIN & C. A. NOBLE (1986). Soil erosion in the United Kingdom: a case study from mid-Bedfordshire. *Silsoe College Occasional Paper No. 14*.
- MOSIMANN, TH. ET AL. (1991): Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Ein Leitfaden für die Bodenerhaltung. Liebefeld-Bern, 187 S.
- MOSLEY, M. P. (1982): Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand. *J. Hydrol.*, 55, S. 65-92.
- MOSTAGHIMA, S., T. A. DILLAHA & V. O. SHANHOLTZ (1987): Runoff, sediment and phosphorus losses from agricultural lands as affected by tillage and residue levels. Optimum erosion control at least cost. Proceedings of the national symposium on conservation systems, ASAE Michigan, S. 236-243.
- MUALEM, Y., S. ASSOULINE & H. ROHDENBURG (1990a): Rainfall induced soil seal. (A). A critical review of observations and models. *Catena*. 17, S. 185-203.
- MUALEM, Y., S. ASSOULINE & H. ROHDENBURG (1990b): Rainfall induced soil seal. (B). Application of a new model to saturated soils. *Catena*. 17, S. 205-218.
- MUALEM, Y., S. ASSOULINE & H. ROHDENBURG (1990c): Rainfall induced soil seal. (C). A dynamic model with kinetic energy instead of cumulative rainfall energy as independent variable. *Catena*. 17, S. 289-303.
- MÜLLER, W. (1985): Standortkundliche Voraussetzungen für die Gefügemelioration durch Tieflockerung im humiden Klima. *DVWK- Schriften* 70, S. 1-35.
- NEUKAM, M. (1989): Messungen des Druckes im Boden unter einem AS-Reifen. VDI/MEG Kolloquium Landtechnik, Reifen landwirtschaftlicher Fahrzeuge, Tagung München, 27/28 April 1989, VDI-AGR, Düsseldorf.
- NEWSON, M. D. & J. G. HARRISON (1987): Channel studies in the Plynlimon experimental catchments. Report 47, Institut Hydrol. Wallingford, England, 61 S.
- NICKEL, A. (1998): Hochwasser in Talräumen, Visualisierung und Entscheidungshilfen. Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover. 323 S.
- NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM (HRSG.), (1992): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Obere Leine. Wasserwirtschaft – Niedersächsisches Umweltministerium. 192 S.
- NIEHOFF, D. & A. BRONSTERT (2001): Influences of land use and land cover conditions on flood generation: a simulation study. In: Marsalek, J., E. Watt, E. Zeman & H. Sieker (Hrsg.): Advances in urban stormwater and agricultural runoff source controls. *Nato Science Series, IV, Vol. 6*, S. 267-278.
- NIEHOFF, D. & A. BRONSTERT (2001): Influences of land-use and landsurface conditions on flood generation: A simulation study. In: J. Marsalek et al. (Hrsg.): Advances in Urban Stormwater and Agricultural Source Controls. *NATO Science Series IV, Earth and Environmental Sciences*, S. 278-283.
- NIEHOFF, D. & A. BRONSTERT (2002): Landnutzung und Hochwasserentstehung: Modellierung anhand dreier mesoskaliger Einzugsgebiete. *Wasser und Boden*, 54/10, S. 20-28.
- NIEHOFF, D. (2002): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala, Brandenburgische Umwelterichte, Heft 11, Dissertation, Universität Potsdam.
- NITZSCHE, O., W. SCHMIDT & W. RICHTER (2000): Minderung des P-Abtrags von Ackerflächen durch konservierende Bodenbearbeitung. *Mittlg. Bodenkdl. Gesellsch.* 92, S. 178-181.

- NN (1998): Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden und Lösungsansätze zum Bodengefügeschutz. Positionspapier der Bodenspezialisten der Bundesländer, VDLUFA-Mitteilungen, H. 1, S. 39-48.
- OLDEROG-ENGE, K. (1999): Konservierende Bodenbearbeitung und Mulchsaat – Erfahrungsbericht auf der Basis 20jähriger Versuchs- und Entwicklungsarbeit. KTBL-Schrift 383, S. 96-98.
- ONODERA, S. & M. KOBAYASHI (1995): Evaluation of seasonal variation in bypass flow and matrix flow in forest soil layer using bromide ion. In: Leibundgut, C. (Hrsg.): Tracer technologies for hydrological systems. Proceedings of an international symposium, Boulder Colorado, USA, July 1995, IAHS Publications No. 229, Wallingford, Oxfordshire. S. 99-107.
- OPP, C. (1991): Umweltprobleme in Agrarlandschaften – Ergebnisse geoökologischer Untersuchungen in den neuen Bundesländern. Geographische Rundschau, 43, H. 10, S. 597-605.
- OSKOU, K. E. & W. B. VOORHEES (1991): Economic consequences of soil compaction. Trans., ASAE, Vol. 34, No. 6, S. 2317-2323.
- OSTROWSKI, M. W. (2000): Anthropogenic impacts on the formation of flash floods and measures for their compensation. In: Marsalek, J. et al. (Hrsg.): Advances in Urban Stormwater and Agricultural Source Controls. NATO Science Series IV, Earth and Environmental Sciences, S. 125-133.
- ÖVERLAND, H. (1990): Einfluss der Landnutzung auf Hochwasserabfluß und Schwebstofftransport. Mitteilungen Institut für Wasserwesen, Heft 35, Universität der Bundeswehr München, 163 S.
- PARMALEE, R. W., M. H. BEARE, W. CHENG, P. F. HENDRIX, S. J. RIDER, D. A. CROSSLEY & D. C. COLEMAN (1990): Earthworms and enchytraeids in conventional and no-tillage agroecosystems. A biocide approach to assess their role in organic matter breakdown. Biol. Fertil. Soils 10, S. 1-10.
- PATT, H. (Hrsg.) (2001): Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. Springer-Verlag, 593 S.
- PETELKAU, H. & K. SEIDEL (1986): Bearbeitbarkeit und Befahrbarkeit von Ackerböden in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte. Tagungs-Ber. 246 der AdL der DDR, Berlin, S. 46-54.
- PETELKAU, H. & M. DANOWSKI (1990): Effect of repeated vehicle traffic in traffic lanes on Soil Physical Properties, Nutrient Uptake and Yield of Oats. Soil and Tillage Research 15, S. 217-225.
- PETELKAU, H. (1984): Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sowie Maßnahmen zu ihrer Minderung. Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin, 227, S. 25-34.
- PETELKAU, H. (1986): Grenzparameter für die Bodenbelastung beim Einsatz von Traktoren und Landmaschinen aus der Sicht der Bodenfruchtbarkeit. Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin, 227, S. 25-34.
- PETELKAU, H. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtungen. KTBL (Hrsg.), (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlussfolgerungen für gute fachliche Praxis. KTBL Arbeitspapier 266. S. 56-79
- PETELKAU, H., K. SEIDEL & M. FRIELINGHAUS (2000): Schadverdichtung der landwirtschaftlichen Mineralböden im Land Brandenburg. Forschungsbericht, 135 S.
- PETELKAU, H., K. SEIDEL, CL.-R. GÄTKE & M. DANOWSKI (1988): Prinziplösung für die Steuerung der Grundbodenbearbeitung. FZB-Report 1988, Wiss. Jahresbericht des FZB Müncheberg, S. 86-93.
- PETRYK, S. & G. BOSMAJIAN (1975): Analysis of flow through vegetation. Journal of the Hydraulics Division ASCE 101, S.871-884.
- PFEIL, D. (1998): Fleißig gepflügt und dann "Land unter". Landwirtschaft ohne Pflug, 3, S. 9-10.
- PHILLIPS, R. E. & S. H. PHILLIPS (1984): No-Tillage Agriculture. Van Nostrand Reinhold, New York, 120 S.
- PLEINER, I., S. FISCHER & W. SCHMIDT (1998): Beitrag der ländlichen Neuordnung zum Erosionsschutz. Freistaat Sachsen, Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.), Dresden, 28 S.
- PRENK, J. (1963): Der Einfluß landeskultureller und flußbautechnischer Maßnahmen auf den Ablauf einer Hochwasserwelle. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Sonderheft 1963. S. 10-16.
- PREUSCHEN, G. (1994): Landnutzung und Abfluss. Ökologie und Landbau, 90, 22. Jg, S. 19-24.
- PREUBER, J. (1985): Wasserrückhaltung und Wasserspeicherung in der Flurbereinigung. Berichte aus der Flurbereinigung, Heft 55, München, S. 113-118.

- RADMACHER, J., W. WOLF, S. REX, D. BELL & H. FRANKEN (1995): Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Entwicklung der Regenwurmpopulation rekultivierter Böden aus Löß im Rheinischen Braunkohlerevier. *Mittl. der Dt. Bodenk. Gesells.*, 76, S.1365-1368.
- RAHE, T. M., C. HAGEDORN, E. L. MCCOY & G. F. KLING (1978): Transport of antibiotic-resistant *Escherichia coli* through a western Oregon hillslope soil under conditions of saturated flow. *J. Environ. Qual.*, 7, S.487-494.
- RANFTL, H. & A. BOCK (1987): Das Hochwasserrückhaltebecken Lengersheim – wasserwirtschaftliche und ökologische Bedeutung. *Wasserwirtschaft*, 77. Jahrgang, Heft 4, S.166-171.
- RAWLS, W. J. & H. H. RICHARDSON (1983): Runoff curve numbers for conservation tillage. *J. Soil Water Conserv.*, Heft 38, S. 494-496.
- REMBIERZ, W. (1995): Die Bedeutung von Flurbereinigungsmaßnahmen für das Abflussverhalten von Starkniederschlägen in ländlichen Gebieten. In: *Wasser & Boden*, 47. Jahrg. Heft 9/1995. Hamburg - Berlin. S. 29-46.
- REMBIERZ, W. (2001): Vorbeugender Hochwasserschutz – Handlungsmöglichkeiten der Gemeinden. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. Forschungsbereich 20016114*, S. 1-10.
- RICHTER, G. (HRSG.), (1998): *Bodenerosion Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. Darmstadt: Wiss. Buchges., ISBN 3-53412574-6. 264 S.
- RICHTIG, G. (1995): Untersuchungen zur Abflusentstehung bei Hochwasserereignissen in kleinen Einzugsgebieten. *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft*, TU Graz, 16, 156 S.
- RIEDL, U. (2001): Was können Landschaftsplanung, Naturschutz und Landschaftspflege zum vorbeugenden Hochwasserschutz beitragen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. Forschungsbereich 20016114*, S. 52-66.
- RIEDL, U. (2002): Was können Landschaftsplanung, Naturschutz und Landschaftspflege zum vorbeugenden Hochwasserschutz beitragen? Workshop: *Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene*, 13/14.12.2000 in Dresden, S. 55-69.
- RIESER, A (1979): Gegenwärtiger Stand der Meliorationsverfahren bei Grund- und Stauwasserböden. In: *Wasser & Boden*, 31. Jahrg., Heft 1. Hamburg - Berlin. S. 7-10.
- RILEY, H. (1994): The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. *Sio. Tillage Res.*, 29, S. 211-214.
- ROBINSON, D. A. & C. P. PHILLIPS (2001): Crust development in relation to vegetation and agricultural practice on erosion susceptible, dispersive clay soils from central and southern Italy. *Soil Till. Res.*, Heft 60, S. 1-9.
- ROBINSON, M. (1989): Small catchment studies of man's impact on flood flows; agricultural drainage and plantation forestry. *Friends in Hydrology, IAHS 187*, S. 299-308.
- ROBINSON, M., E. L. RYDER & R. C. WARD (1985): Influence on streamflow of field drainage in a small agricultural catchment. In: *Agricultural Water Management*, Bd. 10. Amsterdam. S. 145-158.
- ROESSEL, B. W. P. (1950): Hydrologic problems concerning the runoff in headwater regions. *Eos Trans. AGU*, 31 (3), S.431-442.
- ROHRER, J. (1985): Quantitative Bestimmung der Bodenerosion unter Berücksichtigung des Zusammenhanges Erosion-Nährstoff-Abfluss im oberen Langete-Einzugsgebiet. *Physiogeographica*, Bd. 6, Baseler Beiträge zur Physiogeographie, Basel, 242 S.
- ROTH, C. H. & M. JOSCHKO (1991): A note on the reduction of runoff from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. *Z. Pflanzenernährung Bodenkunde*, 154, S. 101-105.
- ROTH, C. H. & T. EGGERT (1991): Zur Beziehung zwischen Bodeneigenschaften, Verschlammungsanfälligkeit und Infiltration. *Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch.*, 66, II, S. 1007-1010.
- ROTH, C. H. & T. EGGERT (1994): Mechanisms of aggregate breakdown involved in surface sealing generation and sediment concentration on loess soils. *Soil & Tillage Research* 32, S. 253-268.
- ROTH, C. H. (1992): Die Bedeutung der Oberflächenverschlammung für die Auslösung von Abfluss und Abtrag. *Habilitationschrift aus dem Institut für Ökologie – Fachgebiet Bodenkunde der TU Berlin*, Heft 6, Bodenökologie und Bodengeneese, Berlin, 179 S.

- ROTH, C. H., S. GÄTH, R. KÖNIG & H.-G. FREDE (1988): Einfluss zeitlicher Veränderungen der Wasserleitfähigkeit von Verschlammungen auf den Oberflächenabfluss einer Löß-Parabraunerde. In: Mitteilungen der Dtsch. Bodenk. Gesells., Heft 57, S. 101-106.
- ROTH, K., W. JURY, H. FLÜHLER & W. ATTINGER (1991): Transport of Chloride through an unsaturated Field Soil. *Water Resour. Res.* 27, S. 2533-2541.
- RÜHL, C. (2001): Rechtliche Vorgaben und Instrumente der kommunalen Hochwasservorsorge. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. Forschungsbereich 20016114, S. 11-20.
- RUSANOV, V. A. (1991): Effects of wheel and track traffic on the soil and on crop growth and yield. *Soil Tillage Res.* 19, S. 131-143.
- RÜTTIMANN, M. (2001): Boden-, Herbizid- und Nährstoffverluste durch Abschwemmung bei konservierender Bodenbearbeitung und Mulchsaat von Silomais. *Baseler Beiträge zur Physiogeographie*, Band 30, 241 S.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (HRSG.) (1996): Pfluglose Bestellverfahren im Aufwind. Sonderdruck aus *Neue Landwirtschaft* 6/96, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 6 S.
- SANDERS, S. (2000): Erfassung von Bodenerosion und Bewirtschaftung im Rahmen der Bodenerosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen. Konzeption, Datenerhebung und Auswertung. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Hannover, 118 S.
- SCHIEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (1992): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 13. durchgesehene Auflage, Enke Verlag, Stuttgart, 491 S.
- SCHIFFLER, G. R. (1992): Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Karlsruhe, 40, Karlsruhe, 208 S.
- SCHMIDT, D. & F. TEBRÜGGE (1989): Stand der Technik, Entwicklungstendenzen und Forschungsbedarf bei der Mulchsaattechnik zu Getreide. KTBL-Arbeitspapier 130, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.), Darmstadt, S. 32-47.
- SCHMIDT, D. (1999): Trespen in der Fruchtfolge bekämpfen. *Landwirtschaft ohne Pflug*, 2/1999, S. 10-12.
- SCHMIDT, J. (1991): A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena Supplement* 19, S. 101-109.
- SCHMIDT, J. (1991a): The impact of rainfall on sediment transport by sheetflow. *Catena Supplement*, 19, S. 9-17.
- SCHMIDT, J. (1991b): A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena Supplement*, 19, S. 101-109.
- SCHMIDT, J. (1991c): Anwendung eines theoretischen Modells zur Langfristsimulation von Erosions- und Akkumulationsprozessen an Hängen. *Freiburger Geographische Hefte*, Heft 33, S. 145-165.
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen. *Berliner Geographische Abhandlungen*, Heft 61, Berlin, 148 S.
- SCHMIDT, J., M. VON WERNER & A. MICHAEL (1996): Erosion 2D – Modellgrundlagen und Bedienungsanleitung. In: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft und Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.): *Erosion 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser*. Band I, Dresden/Freiberg, 83 S.
- SCHMIDT, J., M. VON WERNER, A. MICHAEL & W. SCHMIDT (1999): Planung und Bemessung von Erosionsschutzmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. *Wasser & Boden*, 51 / 12, S. 19-24.
- SCHMIDT, W. & H. STAHL (1999): Winterraps mit Erfolg ohne Pflug bestellen. Sonderdruck *Bauernzeitung*. *Landwirtschaftliches Wochenblatt*. 4 S.
- SCHMIDT, W. & H. STAHL (1999): Winterraps mit Erfolg ohne Pflug bestellen. *Bauern Zeitung*, *Landwirtschaftliches Wochenblatt*, Sonderdruck, überreicht durch die Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, 4 S.
- SCHMIDT, W. (2000): mündliche Mitteilung.
- SCHMIDT, W., A. MICHAEL & J. SCHMIDT (1997): Ergebnisse von Bodenabtragsmessungen auf konservierend bestellten Ackerflächen als Beratungsgrundlage für wassererosionsmindernde

- Anbauverfahren in Sachsen. VDLUFA-Schriftenreihe 46, Kongressband 1997, S. 675-678.
- SCHMIDT, W., B. ZIMMERLING, O. NITSCHKE & S. T. KRÜCK (2001): Conservation Tillage – a new strategy in flood control. In: Marsalek, J., E. Watt, E. Zeman & H. Sieker (Hrsg.): Advances in urban stormwater and agricultural runoff source controls. Nato Science Series, IV, Vol. 6, S. 287-294.
- SCHMIDT, W., B. ZIMMERLING, O. NITZSCHE & S. KRÜCK (2002): Conservation tillage. a new strategy in flood control. In: J. Marsalek, E. Watt, E. Zeman, H. Sieker (Hrsg.): Advances in urban stormwater and agricultural runoff source controls. Dordrecht, Kluwer, Nato Science Series 6, S. 287-293.
- SCHMIDT, W., H. STAHL & J. EIKENBUSCH (1996): Bodenerosion durch Wasser – Ein Maßnahmenkatalog. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Dresden, 20 S.
- SCHMIDT, W., J. EIKENBUSCH, K. SIEBERHEIN & SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (1998): Mit der richtigen Strategie bleiben die Kosten niedrig – Unkrautbekämpfung bei Pflugverzicht. Sonderdruck aus top agrar Spezial 8/98, Landwirtschaftsverlag, Münster, 4 S.
- Schnug, E. & S. Haneklaus (2002): Landwirtschaftliche Produktionstechnik und Infiltration von Böden - Beitrag des ökologischen Landbaus zum vorbeugenden Hochwasserschutz. Landbauforschung Völknerode, 4 (52), S. 197-203.
- SCHÖN, H. & G. OLFE (1986): Entwicklung und Bestand des Schlepper- und Maschineneinsatzes im Pflanzenbau. KTBL-Schrift 308 Bodenverdichtung beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag, Münster Hiltrup (Westf.).
- SCHRÖDER, R. (2000): Modellierung von Verschlammung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Bonner Geographische Abhandlungen, 101, 175 S.
- SCHUCH, M. & F. JORDAN (1984): Dreistufige Melioration und Nährstoffaustrag (fonctionnement hydrique et compartiment des sols). Association française pour l'étude du sol., Symposiumsbericht, S. 217-228.
- SCHUCH, M. (1979): Wasser- und Bodenbewirtschaftung - umweltent- bzw. -belastend. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 20, Paul Parey Verlag, Berlin / Hamburg, S. 344-361.
- SCHUH, W. M. ET AL. (1993): Spatial variation of root-zone and shallow vadose-zone drainage an a loamy glacial till in a sub-humid climate. Journal of Hydrology, Bd. 148. Amsterdam. S. 1-26.
- SCHULTE-KARRING, H. (1985): Einsatz und Auswirkung des Ahrweiler Meliorationsverfahren in verdichteten Böden unter besonderer Berücksichtigung des Gemüse-, Obst- und Weinbaus. DVWK- Schriften 70, S. 139-270.
- SCHULZE, R., C. AMANN, F. KLOTZ & U. HAAG (2000): Systemvergleich Bodenbearbeitung. Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, <http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/la/lap/agraroek/bodensch/sysbod.htm>, 63 S.
- SCHUMACHER, W. (1864): Die Physik des Bodens. Berlin.
- SCHWARTZENDRUBER, D. (1997): Exact mathematical derivation of a two-term infiltration equation. Water Resources Research, Vol. 33, No. 3, S. 491-496.
- SCHWERDTLE, F. (1969): Untersuchungen zur Population von Regenwürmern bei herkömmlicher Bodenbearbeitung und bei Direktsaat. Z. für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz 76, S. 635-641.
- SCHWERTMANN, U. (1982): Bodenerosion und Flurbereinigung. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, Jahrg. 23. Berlin - Hamburg. S. 261-268.
- SCOTTER, D. R. (1978): Preferential solute movement through larger soil voids. 1. Some computations using simple theory. Australian Journal of Soil Research, Bd. 16, Heft 3, S. 257-267.
- SEKERA, F. (1951): Gesunder und kranker Boden. Parey, Berlin.
- SEMMEL, H. & R. HORN (1994): Spannungen und Spannungsverteilungen in Ackerböden aufgrund von Befahrungen – Überlegungen zur Druckfortpflanzung und der mechanischen Belastbarkeit von Böden. In: Wissensch. Mitt. der Bundesforschungsanstalt für Landw. Braunschweig-Völknerode (FAL) (Hrsg.): Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden (...). Sonderheft 147, S. 41-59.
- SEYFARTH, W. ET AL. (Hrsg.) (1999): Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden. Zalf-Berichte, Nr. 39, Müncheberg, 136 S.
- SHAINBERG, I. (1991): Chemical and mineralogical components of crusting. Proceedings of the International Symposium on Soil Crusting: Chemical and Physical Processes. May 30 – June 1, 1991, Athens

(Georgia, USA), Catena Supplement.

- SIDIRAS, N., G. KAHNT & E. KÜBLER (1988): The effect of different soil tillage system, crop rotation and short term cover crops on soil losses and runoff. *Journal of Aronomy and Crop Science*, 160, S. 22-28.
- SIEGEL, B. (2001): Der informelle Plan - eine Strategie der Raumplanung zur Umsetzung von Maßnahmen zum vorbeugenden Hochwasserschutz - dargestellt am Flusseinzugsgebiet der Wesenitz/Sachsen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. Forschungsbereich 20016114, S. 21-38.
- SIEGERT, K. (1978): Oberflächenabfluss von landwirtschaftlichen Nutzflächen infolge von Starkregen. Leitweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, Mitt. 58.
- SIEKER, F. & R. W. HARMS (1983): Über den Einfluß von Flächenmeliorationen auf den Hochwasserabfluß. In: Mitteilungen Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Heft 44: Vorträge Wasserbau-Seminar, Wintersemester 1982/83 „Landwirtschaftlicher Wasserbau“. Aachen. S. 119-147.
- SIEKER, F. & U. ZIMMERMAN (2001): Source control measures for stormwater runoff in urban areas. In: Marsalek, J., E. Watt, E. Zeman & H. Sieker (Hrsg.): Advances in urban stormwater and agricultural runoff source controls. Nato Science Series, IV, Vol. 6, S. 279-286.
- SIEKER, F. (1995a): Das Mulden-Rigolen-System – ein Konzept zur Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten. *Zeitschrift für Wasserwirtschaft*, Heft 3, S. 22-30.
- SIEKER, F. (1995b): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten als Mittel zur Hochwasserdämpfung. *Hannover Uni Magazin*, Heft 2/95. Hannover. S. 7-10.
- SIEKER, F. (2000): Investigation of the effects of on-site stormwater management measures in urban and agricultural areas on floods. In: Marsalek, J. (Hrsg.): Floods issues in Contemporary Water Management, Nato Science Series, 2. Environmental Security, Vol. 71, 303-310.
- SIEKER, S. (2001): Hochwasservorsorge durch dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten - Empfehlungen an die Kommunen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. Forschungsbereich 20016114, S. 67-75.
- SIMOJOKI, A., A. JAAKKOLA & L. ALAKUKKU (1990) : Effect of compaction on soil air in a pot experiment and in the field. *Soil Tillage Res.* 15, S. 2177-225.
- SIMON, M. (1996): Anthropogene Einflüsse auf das Hochwasserverhalten im Einzugsgebiet der Elbe. *Wasser & Boden*, 48/2, S. 19-23.
- SKLASH M. G. & R. N. FARVOLDEN (1979): The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.*, 43, S.45-65.
- SKLASH, M. G., M. K. STEWART & A. J. PEARCE (1986): Storm runoff generation in humid headwater catchments. 2. A case study of hillslope and low-order stream response. *Water Ressources Research*, Bd. 22, Heft 8, S. 1273-1282.
- SMEDEMA, L. K. (1985): Drainage Coefficients for Heavy Land. In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 111, No.2, S. 101-112.
- SOANE, B. D. & C. VAN OUWERKERK (1994): *Soil compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam.
- SOANE, B. D. (1980): Soil degradation attributable to compaction under wheels and its control. *Land use Seminar on Soil Degradation*, Wageningen, 13,-17.10.1980.
- SOMMER, C. & J. BRUNOTTE (1996): Fachliche Einführung zur Konservierenden Bodenbearbeitung. In: *Bornimer Agrartechnischer Berichte*, Heft 9, S. 13-23.
- SOMMER, C. & K.-H. HARTGE (1991): Verdichtung und Befahrbarkeit – Probleme und Auswege. In: *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit*. Band 2, Bodengefüge, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, S. 104-117.
- SOMMER, C. (1989): Die konservierende Bodenbearbeitung – ein Beitrag zur Verminderung von Bodenerosion und Bodenverdichtungen. Hans-Seidel-Stiftung (Hrsg.): *Landwirtschaft, Boden- und Gewässerschutz, Berichte und Studien der Hans-Seidel-Stiftung* 45, S. 45-56.
- SOMMER, C. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung: ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. Braunschweig, FAL, VIII, Landbauforschung Völkenrode, SH 191, 128 S.
- SOMMER, C. (1999): Konservierende Bodenbearbeitung – ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. *Bodenschutz*, 1, S. 15-19.

- SOMMER, C., H. J. DÜRR & M. ZACH (1994): Bodenverdichtung und Pflanzenertrag – ein Konzept für bodenschonendes Befahren. In: Wissensch. Mitt. der Bundesforschungsanstalt für Landw. Braunschweig-Völkenrode (FAL) (Hrsg.): Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden (...). Sonderheft 147, S. 179-197.
- SOMMER, C., M. ZACH & M. DAMBROTH (1981): Bodenerosion erfordert alternative Formen der Bodenbearbeitung. Berichte über Landwirtschaft, 197 Sonderheft, S. 71-77.
- SPAROVEK G., Q. DE JONG VAN LIER, S. MARCINKONIS, J. ROGASIK & E. SCHNUG (2002): A simple model to predict river floods - a contribution to quantify the significance of soil infiltration rates. Landbauforschung Völkenrode 52(3), 187 – 194.
- STEINERT, K. (1999): Die richtige Sämaschine finden. Landwirtschaft ohne Pflug, Sonderausgabe Agritechnica, S. 10-14.
- STEINKAMPF, H. & C. SOMMER (1989): Druck- und Verdichtungsmessungen im Feld unter großvolumigen Reifen. VDI/MEG Kolloquium Landtechnik, Reifen landwirtschaftlicher Fahrzeuge, Tagung München, 27/28 April 1989, VDI-AGR, Düsseldorf.
- STEINKAMPF, H., J. BARTELS, G. OLFE & M. ZACH (1994): Belastungssimulation im Feldversuch und Ermittlung des Bodendruckes – Methode und Ergebnisse. In: Wissensch. Mitt. der Bundesforschungsanstalt für Landw. Braunschweig-Völkenrode (FAL) (Hrsg.): Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden (...). Sonderheft 147, S. 7-40.
- STREIT, M., R. WILDEMANN & J. JESINGHAUS (1989): Landwirtschaft und Umwelt. Wege aus der Krise. Baden-Baden.
- SUCCOW, M. & L. JESCHKE (1990): Moore in der Landschaft. 2. Aufl., Verlag Harri Deutsch, Thun, 268 S.
- TAYLOR, H. M. & G. S. BRAR (1991): Effect of soil compaction on root development. Soil Tillage Res. 19, S. 111-119.
- TEBRÜGGE, F. & A. BÖHRNSEN (2000): Direktsaat-Beurteilung durch Landwirte und Experten in der EU und Nebraska. Landtechnik, 55, 1, S. 17-19.
- TEBRÜGGE, F. & J. ABELSOVA (1998): Bioporen fördern die Versickerung. Landtechnik, 54. Jahrgang, Heft 1, S. 13-15.
- TEBRÜGGE, F. & J. ABELSOVA (1999): Bioporen fördern Versickerung: Auswirkung der Bodenbearbeitung auf biogene Durchporung und ungesättigte Infiltrationsleistung des Bodens. Landtechnik, 54 (1), S. 13-15.
- TEBRÜGGE, F. & R. A. DÜRING (1999): Reducing tillage intensity – a review of results from long-term study in Germany. Soil & Tillage Research 1432, S. 1-14.
- TEBRÜGGE, F. (1994): Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen unter den Aspekten von Bodenschutz und Ökonomie. In: Tebrügge, F. & M. Dreier (Hrsg.): Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden. Wissenschaftlicher Fachverlag Gießen, S. 191-203.
- TEBRÜGGE, F. (2000): Visionen für die Direktsaat und ihr Beitrag zum boden-, Wasser- und Klimaschutz. Landwirtschaftliche Beratungszentrale, CH-8315 Lindau, LBI-Kurs, 28.6.2000, Zollikofen-Bern, 99-E-308, 21 S.
- TEBRÜGGE, F., A. WAGNER & H.-P. SCHWARZ (1998): Ökonomische, bodenökologische und pflanzenbauliche Aspekte der Vorerntesaat von Winterraps. In: KTBL (Hrsg.): Aktuelle Arbeiten aus Landtechnik und landwirtschaftlichem Bauwesen, KTBL/FAL-Arbeitstagung. S. 30-34.
- TEMPLE, D. M. (1982) : Flow retardance of submerged grass channel linings. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 25, S.1300-13003.
- TETZLAFF, G., M. BÖRNGEN, M. MUDELSEE & A. RAABE (2002): Das Jahrtausendhochwasser von 1342 am Main aus meteorologisch-hydrologischer Sicht. Wasser und Boden, 54/10, S. 41-49.
- UHLENBROOK, S. & A. STEINBRICH (2002): Einflussgrößen auf die Hochwasserbildung im regionalen Maßstab. Wasser und Boden, 54/10, S. 8-15.
- URI, N. D. (1999): Conservation tillage in U.S. agriculture: environmental, economic and policy issues. 127 S.
- VAN DER PLOEG, R. R. & C. REMMERS (1994): F + E-Vorhaben „Fachgespräch Bodenerosion“.

- Abschlussbericht, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berichts-Nr. 94-148, Hannover, 101 S.
- VAN DER PLOEG, R. R. & F. SIEKER (2000): Bodenwasserrückhalt zum Hochwasserschutz durch Extensivierung der Dränung landwirtschaftlich genutzter Flächen. *Wasserwirtschaft* 90/1, Wiesbaden, Sonderdruck, 6 S.
- VAN DER PLOEG, R. R., A. CZAJKA-KACZKA, M. GIESKA & M. AKKERMANN (2001): Development in agriculture and the loss of natural stormwater runoff control in central europe. In: Marsalek, J., E. Watt, E. Zeman & H. Sieker (Hrsg.): *Advances in urban stormwater and agricultural runoff source controls*. Nato Science Series, IV, Vol. 6, S. 255-266.
- VAN DER PLOEG, R. R., D. HERMSMEYER & J. BACHMANN (2000): Postwar changes in land use in former West Germany and the increased number of inland floods. In: Marsalek, J. (Hrsg.): *Floods issues in Contemporary Water Management*, Nato Science Series, 2. Environmental Security, Vol. 71, S. 115-124.
- VAN DER PLOEG, R. R., M. GIESKA & P. SCHWEIGERT (2001): Landschaftshydrologische und Hochwasser relevante Aspekte der ackerbaulichen Bodenbewirtschaftung in der deutschen Nachkriegszeit. *Berichte über Landwirtschaft* 79 / 3, S. 447-465.
- VERMEULEN, G. D., W. B. M. ARTS, J. J. KLOOSTER (1988): Perspective of reducing soil compaction by using a low ground pressure farming system: selection of wheel equipment. *Proc. 11th Conf. of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO)*, Edinburgh, Vol. 1, S. 329-334.
- VIESER, H. J. (1985): Hochwasserverschärfung durch den Ausbau des Oberrheins. *Wasserbau-Mitteilungen* 24, Technische Hochschule Darmstadt.
- VOGT, R. (2001): Sensibilisierung der Bevölkerung für den Hochwasserschutz. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene*. Forschungsbereich 20016114, S. 103-118.
- VON WERNER, M. & J. SCHMIDT (1996): Erosion 3D – Modellgrundlagen und Bedienungsanleitung. In: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft und Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.): *Erosion 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser*. Band III, Dresden/Freiberg, 135 S.
- VON WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Diss. FU Berlin.
- VOORHEES, W. B. (2000): Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. In: R. Horn, J. J. H. van den Akker & J. Arvidsson (Hrsg.): *Subsoil Compaction*. Adv. in Geoecology 32, Catena Verlag, S. 331-338.
- VORDERBRÜGGE, T. (1989): Einfluss des Bodengefüges auf Durchwurzelung und Ertrag bei Getreide – Untersuchungen an rekultivierten Böden und einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch. Dissertation Gießen.
- VOß, M., M. ULBER & H.-H. HOPPE (1997): Schneckenprobleme bei Direktsaat. *Direktsaat* 4/1997, S. 14-15.
- VOBHENRICH, H.-H. (1995): Vergleich zwischen Pflug-Kreisellege-Drillsaat und Frässlensaat. *Forschungsbericht Agrartechnik des AK Forschung und Lehre, Max-Eyth-Gesellsch. Agrartechnik im VDI*, Band 280, Universität Kiel.
- VOBHENRICH, H.-H. (1999): Stroh im Saatbett. *KTBL-Schrift* 383, S. 25-31.
- VOBHENRICH, H.-H. (2000): Prototyp für die ortsspezifische Bodenbearbeitung. www.pregro.de/Veroeff/PresskonfGtw2000/Prototyp.htm, 3 S.
- WENDT, R. C. & E. BURWELL (1985): Runoff and soil losses for conventional reduced and no-till corn. *Journal of Soil and Water Conservation*, 33 / 5, S. 450-454.
- WERNER, D. & B. WERNER (2001): Verdichtung und Regeneration des Gefüges eines schluffigen Tonbodens (Tschernosem): Bodenphysikalische, computertomographische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164, S. 79-90.
- WERNER, D. (1994): Wandel des Bodengefüges in einer Löß-Schwarzerde unter differenzierter Druckbelastung und Bearbeitung. In: *Wissensch. Mitt. der Bundesforschungsanstalt für Landw. Braunschweig-Völkenrode (FAL)* (Hrsg.): *Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden (...)*. Sonderheft 147, S. 77-112.
- WERNER, D., P. PARIS & A. RÜDIGER (1993): Zum Einfluss des Radschlupfes auf das Bodengefüge. *Acker-*

- Pflanzenbau Bodenkd. 37, S. 71-81.
- WHITE, R. E. (1985): The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. *Advances in Soil Sciences* Vol. 3. Springer, New York, S. 95-120.
- WIERMANN, C. (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lössbürtiger Ackerstandorte. *Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenern. u. Bodenkunde, CAU Kiel*, H. 45.
- WIERMANN, C., D. WERNER, R. HORN, J. ROSTEK & B. WERNER (2000): Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil Till. Res.* 53, S. 117-128.
- WILCKE, D. (2002): Niederschlag-Abfluss-Simulation zur Bestimmung der Wirkung konservierender Bodenbearbeitung auf den Hochwasserabfluss. *Materialien zum 20. Osnabrücker Umweltgespräch der DBU "Vorbeugender Hochwasserschutz, 24.-25. Oktober 2002*, S. 177-188.
- WILDE, T. (1998): Dauer der Nachwirkung von Bodenverdichtung durch intensives Befahren. In: *KTBL (Hrsg.): Aktuelle Arbeiten aus Landtechnik und landwirtschaftlichem Bauwesen, KTBL/FAL-Arbeitstagung*. S. 26-29.
- WISKOW, E. & R.R. VAN DER PLOEG (2003): Calculation of drain spacings for optimal rainstorm runoff control. *J. Hydrol.* 272, S. 163-174.
- WOHLRAB, B., V. SOKOLLEK, W. SÜBMANN (1983): Einfluß land- und forstwirtschaftlicher Bodennutzung sowie von Sozialbrache auf die Wasserqualität kleiner Bachläufe im ländlichen Mittelgebirgsraum. *DVWK Schriften: Einfluss der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt. Heft 57*. Hamburg, Berlin. S. 55-125
- YUXIA, LI, J. N. TULLBERG & D. M. FREEBAIRN (2001): Traffic and residue cover effects on infiltration. *Aust. J. So. Res.* 39, S. 239-247.
- ZAPF, R. (1997): Mechanische Bodenbelastung durch die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion in Bayern. Flächenbezogene Quantifizierung des bewirtschaftungsbedingten Bodenverdichtungspotentials auf Ackerland. *Bayrische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP) (Hrsg.), Freising-München*, 33 S.
- ZEITZ, J. & S. VELTY (2002): Soil properties of drained and rewetted fen soils. *J. Plant Nutr. Soil. Sci.* 165 / 5, S. 618-626.
- ZERGER, U. (1997): Hochwasserschutz und Bodennutzung. In: *Ökologie & Landbau*, 24. Jahrg., Heft (1/1997). S. 20-22.
- ZIMMERLING, B., O. NITZSCHE, W. SCHMIDT, S. KRÜCK & M. ZIMMERMANN (2001): Wasserinfiltration auf konventionell und konservierend bearbeiteten Ackerböden bei Simulation von Intensivniederschlägen. *Mitteilungen Dtsch. Bodenkdl. Gesellsch.*, Heft 96, S.791-792.
- ZUZEL, J. F., J. L. PIKUL, JR. & P. E. RASMUSSEN (1990): Tillage and Fertilizer Effects on Water Infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, S. 205-208.

Lebenslauf von Matthias Akkermann (geb. Schröder)

I Persönliche Daten

Geburtstag 14.8.1970

Geburtsort Hannover

II Ausbildungsdaten / Lebensablauf

Schulausbildung	1977 - 1981	Grundschule
	1981 - 1983	Orientierungsstufe
	1983 - 1987	Realschule
	1987 - 1990	Gymnasium
Zivildienst	1990 - 1991	
Studium I	ab 1991	Studium der Geographie Diplom
	10.2.1997	Abschluss als Diplom Geograph
Beruf	1997 - 2004	Gesellschafter Geschäftsführer der Firma Geo-i-d GmbH
Promotion	1997 - 2000	Stipendium im Graduiertenkolleg „Stoffströme in Wasser und Boden“ Institut für Bodenkunde Abt. Bodenphysik der Universität Hannover
	ab 2000	Promotion am Geographischen Institut Abt. Physische Geographie und Landschaftsökologie der Universität Hannover
Studium II	SS 2001 – SS 2002	Studium LA Gymnasien Erdkunde / Biologie
	27.11.2002	Abschluss: Erste Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien
Studienreferendar	ab 1.5.2003	Studienreferendar für das Lehramt an Gymnasien mit den Fächern Erdkunde und Biologie
Zusatzausbildung	am 20.3.2004	Abschluss der zusätzlichen Qualifikation für den Bereich „Darstellendes Spiel“ gemäß § 33 PVO Lehr II (3. Unterrichtsfach)
Promotion	am 8.6.2004	Erlangung des Grades Dr. rer. nat.