

**Institut für Geografie
Fakultät für Kulturwissenschaften
der
Universität Paderborn**

**Strategien zur Minderung diffuser Einträge von herbiziden
Wirkstoffen und Nährstoffen in Oberflächengewässer**

**Dissertationsschrift
Zur Erlangung des Doktorgrades
Dr. phil.**

vorgelegt von:

Frank Erlach

Gutachter:

**Prof. Dr. Hans-Karl Barth
Prof. Dr. Norbert Lütke Entrup**

Tag der Disputation: 1. April 2005

INHALTSVERZEICHNIS**SEITE**

Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	XI
Verzeichnis der Abkürzungen, Einheiten und Symbole	XVI
Kurzfassung	XVIII
Abstract	XIX
1 EINLEITUNG	1
2 ZIELSETZUNG	4
2.1 Untersuchungsansätze und Versuchsfragen	4
3 LITERATURÜBERSICHT ZUM DISSERTATIONSTHEMA	7
3.1 'Diffuse Eintragspfade' für Pflanzenschutzmittel und Nährstoffe in Oberflächengewässer: Definition und Bedeutung	8
3.1.1 Herbizid- und Nährstoffeinträge von ackerbaulich genutzten Flächen	11
3.1.1.1 Bedeutung des Oberflächenabflusses und Bodenabtrages	13
3.1.1.2 Bedeutung des Zwischenabflusses	17
3.1.1.3 Bedeutung des Dränageabflusses	19
3.2 Verfahren der Bodenbearbeitung als Minderungsstrategie gegen Boden- und Stoffausträge erosionsgefährdeter Ackerflächen	21
3.2.1 Konservierende Bodenbearbeitung und das Direktsaatverfahren	22
4 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND EROSIONSRELEVANTE FAKTOREN	27
4.1 Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes	27
4.2 Gebietsrelevante Faktoren der Wassererosion	29
4.2.1 Reliefentwicklung und Hangneigungsverhältnisse	29
4.2.2 Ausgangssubstrate der Bodenbildung	31
4.2.3 Bodenkundliche Ausstattung	34
4.2.4 Klima, typische Wetterlagen und erosive Niederschläge	36
5 METHODEN UND MATERIAL	39
5.1 Die Feldversuchsfläche	39
5.1.1 Standortcharakteristika und Bodenprofilbeschreibung	40

5.2 Durchführung der Feldversuche 1997 - 2002	44
5.2.1 Pflanzenbauliche Maßnahmen und Produktionstechnik der Erntejahre 1998-2002	45
5.2.1.1 Ackerkulturen und Fruchtfolge	45
5.2.1.2 Bodenbewirtschaftung und Bodenbearbeitungsvarianten	46
5.2.2 Angewandte Herbizide und ihre Eigenschaften	47
5.2.2.1 Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin	48
5.2.2.2 Metazachlor	49
5.2.2.3 Chlortoluron und Isoproturon	49
5.2.2.4 Applikation der Herbizide im Feldversuch	50
5.2.3 Angewandte Düngemittel	50
5.2.4 Aufbau der Versuchsplots und -technik	51
5.2.4.1 Registrierung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf Großparzellen	52
5.2.4.2 Zwischenabflussmessung mittels Dränvlieskonstruktion	55
5.2.4.3 Erfassung von Dränageabflüssen	57
5.2.4.4 Erfassung von Niederschlägen	59
5.2.5 Durchführung regelmäßiger Messreihen und Bodenprobennahmen im Feld	60
5.2.5.1 Ermittlung aktueller Bodenbedeckungsgrade	60
5.2.5.2 Bodenprobennahme zur Standortcharakterisierung und zum Abbau- verhalten der angewandten Herbizide	62
5.3 Durchführung von Laboranalysen	62
5.3.1 Bodenuntersuchungen zur Standortcharakterisierung	63
5.3.1.1 Bodenchemische Kennwerte	63
5.3.1.2 Bodenphysikalische Kennwerte	64
5.3.2 Aufbereitung der Abflussproben	65
5.3.2.1 Phasentrennung und Konservierung	65
5.3.3 Analyse der Herbizide	66
5.3.3.1 Extraktion und Erfassung der eingesetzten Herbizide	67
5.3.4 Nährstoffanalysen	69
5.3.4.1 Stickstoff- und Phosphorbestimmung im Wasser und Boden	69
5.3.5 Datenauswertung und Statistik	71
6 ERGEBNISSE DER VERSUCHSJAHRE 1997 - 2002	72
6.1 Bodenabtrag und Stoffausträge mit dem Oberflächenabfluss	72
6.1.1 Abflussereignisse der Messphasen im Mais von 1998 - 2002	72
6.1.1.1 Austräge der applizierten Herbizide im Wasser und Boden	77
6.1.1.2 Austräge von Stickstoff und Phosphor im Wasser und Boden	85
6.1.2 Abflussereignisse der Messphasen im Winterraps von 1997 – 2001.....	90
6.1.2.1 Austräge des applizierten Herbizides im Wasser und Boden	93
6.1.2.2 Austräge von Stickstoff und Phosphor im Wasser und Boden	96

6.1.3	Abflussereignisse der Messphasen im Winterweizen von 1997 – 2002.....	98
6.1.3.1	Austräge der applizierten Herbizide im Wasser und Boden	101
6.1.3.2	Austräge von Stickstoff und Phosphor im Wasser und Boden	105
6.2	Boden- und Stoffausträge mit dem Zwischenabfluss	109
6.2.1	Abflussereignisse der Messphase im Winterweizen 1999/2000.....	109
6.2.1.1	Austräge der applizierten Herbizide mit dem Zwischenabfluss.....	111
6.2.1.2	Austräge von Stickstoff und Phosphor mit dem Zwischenabfluss	113
6.3	Boden- und Stoffausträge über Dränageabflüsse	115
6.3.1	Abflussereignisse der Messphasen im Winterraps 1998	115
6.3.1.1	Austräge des applizierten Herbizides mit dem Dränageabfluss	118
6.3.1.2	Austräge von Stickstoff und Phosphor mit dem Dränageabfluss	120
6.3.2	Abflussereignisse der Messphase im Winterweizen 1999/2000	122
6.3.2.1	Austräge der applizierten Herbizide mit dem Dränagewasser	124
6.3.2.2	Austräge von Stickstoff und Phosphor mit dem Dränagewasser	126
6.4	Ergebnisse zum Bodenbedeckungsgrad in den Bearbeitungsvarianten der untersuchten Anbaukulturen im Hinblick auf den Oberflächenabfluss und Bodenabtrag	129
6.4.1	Versuchsjahre im Mais 1999 - 2001	129
6.4.2	Versuchsjahre im Winterraps 1999 - 2001	133
6.4.3	Versuchsjahre im Winterweizen 1998 - 2002	134
6.5	Ergebnisse zum Abbau der applizierten Herbizide	141
6.5.1	Rückstandskonzentrationen im humosen Oberboden	141
6.5.1.1	Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin	142
6.5.1.2	Metazachlor	144
6.5.1.3	Chlortoluron und Isoproturon	145
7	DISKUSSION	148
7.1	Quantifizierung von Boden- und Stoffausträgen über die Eintragspfade Oberflächen-, Zwischen- und Dränageabfluss nach Niederschlagsereignissen ...	148
7.2	Die Bodenbedeckung als entscheidender Faktor für die erosionshemmende Wirksamkeit einer reduzierten Bodenbearbeitung	163
7.3	Standortspezifisches Verhalten der angewandten Wirkstoffe im Boden	165
7.4	Abschließende Betrachtung und Ausblick	169
8	ZUSAMMENFASSUNG	172
9	LITERATUR	175
ANHANG		1- 40

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tab. 1	Diffuse und punktförmige Quellen für PSM- und Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer aus dem Bereich der landwirtschaftlichen Produktion	9
Tab. 2	Niederschlagshöhe (mm/24 h) in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit (Station Rüthen, 1951-1980) im Bereich des östlichen Haarstranges	37
Tab. 3	Verteilung der Niederschläge (langjähriges Monats- u. Jahresmittel in mm v. 1975 - 2000) der Messstelle Menzel, ca. 2 km (westlich) vom Untersuchungsstandort und auf der Feldversuchsfläche (1997 - 2002)	41
Tab. 4	Chemische und physikalische Bodenkennwerte des Leitprofils	43
Tab. 5	Ausgewählte Herbizide und ihre spezifischen Eigenschaften	48
Tab. 6	Aufwand- und Wirkstoffmengen der für die untersuchten Ackerkulturen applizierten Herbizide	50
Tab. 7	Chemische Analysen zur Bestimmung von Bodenkennwerten	64
Tab. 8	Korngrößenanalyse zur Bestimmung der Bodentextur	64
Tab. 9	Mittlere Wiederfindungsraten einzelner im Feldversuch applizierter Wirkstoffe im Wasser (WFR _{i,w}) und Boden (WFR _{i,s}) nach den Untersuchungsjahren 1997 – 2000	69
Tab. 10	Messphasen im Mais mit Niederschlagsdaten und Anzahl der Abflussereignisse	72
Tab. 11	Niederschlagsereignisse mit Oberflächenabfluss der Versuchsjahre 1998 – 1999 und 2001 im Mais	73
Tab. 12	Oberflächenabflussereignisse auf den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2001 im Mais	74
Tab. 13 a	Herbizidkonzentrationen (µg/l) im Runoff-Wasser während der Abflussereignisse 1998, 999 und 2001 im Mais in den Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat). (Applikationstermine: 21.05.98, 20.05.99, 19.05.01; Präparat: STENTAN: 6 l/ha)	78

		Seite
Tab. 13 b	Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Herbizidgehalte ($\mu\text{g/kg}$) im Runoff-Sediment der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1998, 1999 und 2001 im Mais. (Applikationstermine: 21.05.98, 20.05.99, 19.05.01; Präparat: STENTAN = 6 l/ha)	79
Tab. 14	Herbizidausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelergebnissen für das Versuchsjahr 1998 (Applikation: STENTAN: 6 l/ha)	81
Tab. 15	Herbizidausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelergebnissen für das Versuchsjahr 1999 (Applikation: STENTAN: 6 l/ha)	82
Tab. 16	Herbizidausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelergebnissen für das Versuchsjahr 2001 (Applikation: STENTAN: 6 l/ha)	83
Tab. 17 a	Nährstoffkonzentrationen (mg/l) im Runoff-Wasser der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1998, 1999 und 2001 im Mais	85
Tab. 17 b	Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Nährstoffgehalte (g/kg) im Runoff-Sediment der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1998, 1999 und 2001 im Mais	87
Tab. 18	Nährstoffausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelergebnissen für das Versuchsjahr 1998	88
Tab. 19	Nährstoffausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelergebnissen für das Versuchsjahr 1999	88
Tab. 20	Nährstoffausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelergebnissen für das Versuchsjahr 2001	89
Tab. 21	Messphasen im Winterraps mit Niederschlagsdaten und Anzahl der Abflussereignisse	91

Tab. 22	Niederschlagsereignisse mit Oberflächenabfluss der Versuchsjahre 1998 und 2000 im Winterraps	92
Tab. 23	Oberflächenabflussereignisse in den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) 1998 und 2000 im Winterraps	93
Tab. 24 a	Herbizidkonzentration ($\mu\text{g/l}$) im Runoff-Wasser der Versuchsplots auf der Pflugvariante Während der Abflussereignisse 2000 im Winterraps in (Applikationstermin: 29.08.; Präparat: BUTISAN TOP = 2 l/ha)	94
Tab. 24 b	Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Herbizidgehalte ($\mu\text{g/kg}$) im Runoff-Sediment der Versuchsplots auf der Pflugvariante während der Abflussereignisse 2000 im Winterraps (Applikationstermin: 29.08.; Präparat: BUTISAN TOP = 2 l/ha)	94
Tab. 25	Herbizidausträge von der Bearbeitungsvariante Pflug im Winterraps, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 2000 (Applikation: BUTISAN TOP: 2 l/ha)	95
Tab. 26 a	Nährstoffkonzentrationen (mg/l) im Runoff-Wasser der Versuchsplots auf der Pflugvariante während der Abflussereignisse 2000 im Winterraps	96
Tab. 26 b	Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Nährstoffgehalte (mg/kg) im Runoff-Sediment der Versuchsplots auf der Pflugvariante während der Abflussereignisse 2000 im Winterraps	97
Tab. 27	Nährstoffausträge von der Bearbeitungsvariante Pflug im Winterraps, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 2000	98
Tab. 28	Messphasen im Winterweizen mit Niederschlagsdaten und Anzahl der Abflussereignisse	99
Tab. 29	Niederschlagsereignisse mit Oberflächenabfluss der Versuchsjahre 1998/1999 und 1999/2000 im Winterweizen	100
Tab. 30	Oberflächenabflussereignisse in den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) 1999/2000 im Winterweizen	101
Tab. 31	Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$) im Runoff-Wasser der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1999/2000 im Winterweizen Applikationstermin: 13.10.99; Präparate: DICURAN = 1,5 l/ha, IPU = 3 l/ha	102

		Seite
Tab. 32	Herbizidausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Winterweizen, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 1999/2000 (Applikation: DICURAN: 1,5 l/ha, IPU: 3 l/ha)	104
Tab. 33	Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Nährstoffkonzentrationen (mg/l) im Runoff-Wasser der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1999/2000 im Winterweizen	106
Tab. 34	Nährstoffausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Winterweizen, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 1999/2000	107
Tab. 35	Messphasen im Winterraps und Winterweizen mit Niederschlagsdaten und Anzahl der Zwischenabflussereignisse	109
Tab. 36	Herbizidkonzentrationen (µg/l) im Zwischenabfluss vom 22.02. bis 31.03.2000 in den Bearbeitungsvarianten (n = 2) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase 1999/2000 im Winterweizen. Applikationstermin: 13.10.99; Präparate: DICURAN = 1,5 l/ha, IPU = 3 l/ha	111
Tab. 37	Konzentrationen an NO ₃ -N, NH ₄ -N und PO ₄ -P im Zwischenabfluss vom 22.02. – 31.03.2000 in den Bearbeitungsvarianten (n = 2) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase 1999/00 im Winterweizen	113
Tab. 38	Mittlere Konzentrationen (µg/l) an Metazachlor im Dränagewasser zwischen dem 15.09. und 13.10.1998 in den Varianten (n = 2) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase im Winterraps. Applikationstermin: 07.09.98 (BUTISAN TOP = 2 l/ha)	119
Tab. 39	Konzentrationen (mg/l) an NO ₃ -N, NH ₄ -N und PO ₄ -P im Dränagewasser zwischen dem 15.09. und 13.10.1998 während der Messphase im Winterraps in den Varianten (n = 1) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	121
Tab. 40	Herbizidkonzentrationen (µg/l) an Chlortoluron und Isoproturon im Dränagewasser Zwischen dem 09.03. und 14.03.2000 während der Messphase im Winterweizen in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat. Applikationstermin: 1.10.99; Präparate: DICURAN = 1,5 l/ha, IPU = 3 l/ha	125

		Seite
Tab. 41	Konzentrationen (mg/l) an NO ₃ -N, NH ₄ -N und PO ₄ -P im Dränagewasser zwischen dem 09.03. und 14.03.2000 während der Messphase im Winterweizen in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	126
Tab.42	Bodenbedeckung sowie absoluter und relativer Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in den Versuchsplots der Varianten konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat im Vergleich zur Pflugvariante während der Messphasen mit Mais in den Versuchsjahren 1999 und 2001	132
Tab. 43	Bodenbedeckung sowie absoluter und relativer Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in den Versuchsplots der Varianten konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat im Vergleich zur Pflugvariante während der Messphase mit Winterweizen im Versuchsjahr 1999/2000	136
Tab. 44	Tage nach Aussaat von Mais, Winterraps und Winterweizen mit hoher Erosionsgefahr (Bodenbedeckung ≤ 30 %) auf der Versuchsfläche	138

Tabellen im Anhang

Tab. 1	Pflanzenbauliche Maßnahmen auf der Parzelle mit Winterraps 1997 - 2002	3
Tab. 2	Pflanzenbauliche Maßnahmen auf der Parzelle mit Winterweizen 1997 - 2002	4
Tab. 3	Pflanzenbauliche Maßnahmen auf der Parzelle mit Mais 1998 - 2002	5
Tab. 4	Durchschnittserträge der Erntejahre 1998 - 2000 für die untersuchten Kulturen auf der Versuchsfläche	6
Tab. 5	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1997	7
Tab. 6	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1998	7
Tab. 7	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1999	8
Tab. 8	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2000	8
Tab. 9	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2001	9

Tab. 10	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2002	9
Tab. 11	Niederschlagsdaten zu den Oberflächenabflussereignissen der Versuchsjahre 1998, 1999 und 2001 im Mais sowie des Versuchsjahres 2000 im Winterraps	10
Tab. 12	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1998 im Mais	11 - 12
Tab. 13	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Sediment von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1998 im Mais	13 – 14
Tab. 14	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999 im Mais	15
Tab. 15	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Sediment von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999 im Mais	16
Tab. 16	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2001 im Mais	17
Tab. 17	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Sediment von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2001 im Mais	18
Tab. 18	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser der Pflugvariante (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2000 im Winterraps	19 - 22
Tab. 19	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Sediment der Pflugvariante (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2000 im Winterraps	23 - 26
Tab. 20	Niederschlagsdaten zu den Oberflächenabflussereignissen des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen	27
Tab. 21	Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen	28 - 30
Tab. 22	Stoffkonzentrationen und -austräge mit dem Zwischenabfluss in 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen	31 - 32

		Seite
Tab. 23	Stoffkonzentrationen und -austräge mit dem Drainageabfluss in 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2000 im Winterraps	33
Tab. 24	Stoffkonzentrationen und -austräge mit dem Drainageabfluss in 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999(2000 im Winterweizen	34
Tab. 25	Rückstandsgehalte von Herbiziden im humosen Oberboden (0 – 5 cm) zwischen 1 und 56 Tagen nach Applikation der Versuchsjahre 1998/99 im Mais	35
Tab. 26	Rückstandsgehalte von Herbiziden im humosen Oberboden (0 – 5 cm) zwischen 1 und 56 Tagen nach Applikation der Versuchsjahre 2000/02 im Mais	36
Tab. 27	Rückstandsgehalte des Herbizides Metazachlor im Oberboden (0 – 5 cm) zwischen 1 und 56 Tagen nach Applikation der Versuchsjahre 1998 – 2001 im Winterraps	37
Tab. 28	Rückstandsgehalte von Herbiziden im Oberboden (0 – 5 cm) zwischen 1 und 56 Tagen nach Applikation in verschiedenen Versuchsjahren im Winterweizen	38

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1	Übersichtskarte (verkl.) und Kartenausschnitt (vergr.) von Nordrhein-Westfalen mit Untersuchungsgebiet Haarstrang 27
Abb. 2	Kartenausschnitt von NRW mit der Einstufung erosionsgefährdeter Böden im markierten Bereich des Haarstranges 29
Abb. 3	Höhenreliefkarte des Haarstranges zwischen Lippe, Möhne und Ruhr 30
Abb. 4	Geologische Übersichtskarte der Münsterländer Oberkreidemulde mit Lage des Haarstranges 32
Abb. 5	Geologisches Profil durch den östlichen Teil des Haarstranges 32
Abb. 6	Karte der Bodenregionen Nordrhein-Westfalens mit Lage des Haarstranges 35
Abb. 7	Kartenausschnitte von NRW mit der Kreisgrenze von Soest und der Lage der Versuchsfläche 39
Abb. 8	Ausschnitt der digitalen Karte der Erosionsgefährdung von NRW mit Skizze der Feldversuchsfläche 41
Abb. 9	Ausschnitt der Bodenkarte von NRW, (M = 1 : 50000, vergrößert), Blatt L 4516 Büren mit der Versuchsfläche 42
Abb. 10	Foto des Leitprofiles für die Feldversuchsfläche 43
Abb. 11	Karte (M = 1:5000) mit Schema der Versuchsfläche 46
Abb. 12	Luftbild der Feldversuchsfläche (Jun. 1999) 46
Abb. 13	Schema für die Anbaufläche einer Ackerkultur auf der Versuchsfläche mit Bodenbearbeitungsvarianten, Versuchsplots und Dränvlieskonstruktionen 52
Abb. 14	Schema zur Funktionsweise der Messtechnik. Quelle: SEYFAHRT et al. (1993) 54
Abb. 15	Schematische Darstellung der Erfassung von Zwischenabfluss mittels Dränagevlies 56
Abb. 16	Lage der Dränagenstränge auf der Anbaufläche mit Winterrips 58
Abb. 17 a + 17 b	Gezählte und nicht gezählte Pflanzenteile bei der Zählmethode nach FRIELINGHAUS et al. (1998) 61

		Seite
Abb. 18	Kumulierter Niederschlag und Oberflächenabfluss am 22.06.1998 in den Versuchsplots der Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais	75
Abb. 19	Kumulierter Niederschlag und Oberflächenabfluss am 22.06.1998 in den Versuchsplots der Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais	76
Abb. 20	Bodenabträge aus den Varianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) in den Versuchsjahren mit Oberflächenabfluss im Mais und Darstellung der Toleranzgrenze des Bodenabtrages für den Versuchsstandort, berechnet nach der ABAG	80
Abb. 21	Minderung des Herbizidaustrages bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2001 im Mais gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug	84
Abb. 22	Minderung des Nährstoffaustrages bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2001 im Mais gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug	90
Abb. 23	Bodenabtrag in dem Versuchsjahr mit Oberflächenabfluss im Winterraps und Darstellung der Toleranzgrenze des Bodenabtrages für den Versuchsstandort, berechnet nach der ABAG	95
Abb. 24	Minderung des Herbizidaustrages bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug	105
Abb. 25	Minderung des Nährstoffaustrages bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug	108
Abb. 26	Kumulierter Niederschlag und Zwischenabfluss vom 22.02. bis 31.03.2000 während der Messphase mit Winterweizen 1999/2000 auf den Bearbeitungsvarianten (n = 2) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	110
Abb. 27	Herbizidausträge an Chlortoluron und Isoproturon im Zwischenabfluss während der Messphase 1999/00 im Winterweizen vom 22.02. bis 31.03.2000 von den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	112
Abb. 28	Nährstoffausträge an gelöstem Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) und Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) im Zwischenabfluss während der Messphase 1999/00 im Winterweizen vom 22.02. bis 31.03.2000 in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	114

		Seite
Abb. 29	Tagesniederschläge und Dränagenabfluss in den Bearbeitungsvarianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase im Winterraps 1998	116
Abb. 30	Kumulierter Niederschlag und Dränagenabfluss in den Bearbeitungsvarianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase im Winterraps 1998	117
Abb. 31	Wirkstoffaustrag an Metazachlor im Dränageabfluss zwischen dem 15.09. und 13.10.1998 während der Messphase im Winterraps in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	120
Abb. 32	Nährstoffausträge an gelöstem Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) und Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) im Dränagewasser während der Messphase 1998 im Winterraps zwischen dem 15.09. und 13.10.1998 in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	122
Abb. 33	Tagesniederschläge und Dränageabfluss vom 07.03. bis 16.03.2000 während der Messphase mit Winterweizen 1999/2000 in den Bearbeitungsvarianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	123
Abb. 34	Kumulierter Niederschlag und Dränageabfluss vom 07.03. bis 16.03.2000 während der Messphase mit Winterweizen 1999/2000 in den Bearbeitungsvarianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	124
Abb. 35	Nährstoffausträge an gelöstem Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) und Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) im Dränagewasser während der Messphase 1999/2000 im Winterweizen zwischen dem 09.03. und 14.03.2000 in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat	127
Abb. 36	Entwicklung der Bodenbedeckung in den Versuchplots der Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während des Versuchsjahres 1999 im Mais (Aussaat: 10.05., Herbizidapplikation: 21.05.)	130
Abb. 37	Entwicklung der Bodenbedeckung in den Versuchplots der Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während des Versuchsjahres 2001 im Mais, mit Angabe von Oberflächenabflussereignissen (Aussaat: 11.05., Herbizidapplikation: 20.05.)	131
Abb. 38	Entwicklung der Bodenbedeckung in den Versuchplots der Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während des Versuchsjahres 2000 im Winterraps, mit Angabe von Oberflächenabflussereignissen (Aussaat: 24.08., Herbizidapplikation: 29.08.)	133

		Seite
Abb. 39	Entwicklung der Bodenbedeckung in den Versuchplots der Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen, mit Angabe von Oberflächenabflussereignissen (Aussaat: 13.09., Herbizidapplikation: 13.10.)	135
Abb. 40	Vorkommen von Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin in 0 – 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch und Direktsaat) während der Messphase mit Mais im Versuchsjahr 1998	140
Abb. 41	Vorkommen von Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin in 0 – 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphase mit Mais im Versuchsjahr 1999	142
Abb. 42	Vorkommen von Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin in 0 – 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphase mit Mais im Versuchsjahr 2001	143
Abb. 43	Vorkommen von Metazachlor in 0 - 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphasen mit Winterraps in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2000	145
Abb. 44	Vorkommen von Chlortoluron und Isoproturon in 0 - 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphasen mit Winterweizen im Versuchsjahr 1999/2000	146

Abbildungen im Anhang

Abb. 1	Flutrinnenspülung nach Starkregen am Haarstrang bei Menzel. Foto: 05.09.1987	1
Abb. 2	Verspülungen und Verschlammungen im „Schalkstal“ bei Menzel. Foto: 05.09.1987	1
Abb. 3	Verschütteter Entwässerungsgraben bei Menzel nach Erosionsereignis Foto: (05.09.1987)	1
Abb. 4	Typischer „Off Site“-Schaden mit überfluteten und verschütteten Verkehrsweg am Haarstrang. Foto: (05.09.1987)	1
Abb. 5	Blick auf die Versuchsfläche mit Bearbeitungsvarianten und Versuchplots im Winterraps Foto: (25.09.1997, Blickrichtung: Norden)	1

		Seite
Abb. 6	Klimastation auf der Versuchsfläche	1
Abb. 7	Versuchsplot auf der Parzelle mit Winterweizen mit Ablaufvorrichtung	2
Abb. 8	Rohrsystem für die Ableitung von Oberflächenabfluss zum Messsystem	2
Abb. 9	Abfluss-Zulauf mit Verteilerkasten zum Messsystem in der Schutzhütte	2
Abb. 10	Installiertes Messsystem mit Kippwaage, Bypass zum Auffangtank und Datalogger	2
Abb. 11	1 l-Kippwaage mit Reedkontakt	2
Abb. 12	Blick in den Verteiler-Behälter mit Dreh- und Schwenkantrieb sowie Probenflaschen	2
Abb. 13	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1997	7
Abb. 14	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1998	7
Abb. 15	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1999	8
Abb. 16	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2000	8
Abb. 17	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2001	9
Abb. 18	Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2002	9
Abb. 19	Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2000 im Mais	35
Abb. 20	Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2000 im Mais	35
Abb. 21	Bodenbedeckung des Versuchsjahres 1999 im Winterraps	35
Abb. 22	Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2001 im Winterraps	35
Abb. 23	Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2000/2001 im Winterweizen	36
Abb. 24	Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2001/2002 im Winterweizen	36

Verzeichnis der Abkürzungen, Einheiten und Symbole

ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
A-C-Profil	Rohboden-Profil nach AG-Bodenkunde (1994)
AHL	Ammon-Nitrat-Harnstoff-Lösung
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
C-Faktor	Bodenbedeckungsfaktor
CKL 15	Dränvliesvariante (ENKADRAIN ®) der Fa. AKZO NOBEL
C _{org}	Organischer Kohlenstoff
DAP	Diammonphosphat
DIN	Deutsche Industrienorm
DT ₅₀ -Wert	Disappearance-Time 50 %, Halbwertszeit eines Wirkstoffes
DT ₉₀ -Wert	Disappearance-Time 90 %, Zeitraum des Wirkstoffabbaues bis 10 % der applizierten Ausgangsmenge
EC	(= EC-Code), Eucarpia-Skala, Einteilung der Getreideentwicklung
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
I _{max}	Maximale Niederschlagsintensität
KG-Rohr	Abwasserrohr aus PVC
K _{oc} -Wert	Sorptionskoeffizient (L kg ⁻¹) bezogen auf die organische Substanz des Bodens
LUA	Landesumweltamt
M	Maßstab
MEZ	Mitteleuropäische Zeitrechnung
N	Stickstoff
N _{ges}	Gesamt-Stickstoff (gebunden)
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff (gelöst)
N	Norden
N _{min}	Stickstoff (mineralisiert) im Boden
NN	(Normalnull), Geländehöhe auf Meeresniveau reduziert
NNE	Nord-Nordost
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff (gelöst)
P	Phosphor
PE	Polyethylen-Material
P _{ges}	Gesamt-Phosphor (gebunden)
pH-Wert	Potentia hydrogenii, Maßzahl zur Bestimmung der Bodenacidität
PO ₄ -P	Orthophosphat-Phosphor (gelöst)
PP	Polypropylen-Material

PSM	Pflanzenschutzmittel
PVC	Polyvinylchlorid-Material
R-Wert	Regenerationsindex (R-Faktor) der ABAG zur Bestimmung der potentiellen Erosionsgefährdung eines Gebietes
SPE	Solid Phase Extraction (Festphasenextraktion)
Tu	Schluffiger Ton, Bodentextur nach AG BODENKUNDE (1994)
UGT	Umwelt-Geräte-Technik
USLE	Universal Soil Loss Equation nach WISHMEIER und SMITH (1978)
VK	Variationskoeffizient
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union vom 22.12.2000

Einheiten

a	anno (Jahr)
cm	Zentimeter
g	Gramm
h	Stunde
ha	Hektar
kg	Kilogramm
km	Kilometer
l	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mg	Milligramm
µg	Mikrogramm
min	Minuten
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mol	Molekulargewicht
µm	Mikrometer
ng	Nanogramm
s	Sekunde

Symbole

± S	Standardabweichung
$\bar{x}$	Arithmetischer Mittelwert

Strategien zur Minderung diffuser Einträge von herbiziden Wirkstoffen und Nährstoffen in Oberflächengewässer

Frank Erlach

Kurzfassung

Das Ziel der Arbeit war es, auf einem erosionsgefährdeten Ackerstandort in Deutschland (Haarstrang, Nordrhein-Westfalen) diffuse Boden- und Stoffausträge (Herbizide, Nährstoffe) über die Pfade Oberflächen-, Zwischen- und Dränagenabfluss bei 3 verschiedenen Bestellverfahren (konventionell mit Pflugeinsatz, konservierend als Mulchsaat, Direktsaat) während eines 5 jährigen Feldversuches (1997 - 2002) mit Mais, Winterraps und Winterweizen zu quantifizieren. Mit Hilfe von Erosionsmessparzellen ($n = 2$) und einer speziellen Messtechnik sollte für jedes Bestellverfahren quantifiziert werden, wie viel Wasser und Boden abfließt, welche Menge an applizierten Wirkstoffen und Nährstoffen (N, P) ausgetragen wurde und wie hoch die dabei aufgetretenen Stoffkonzentrationen sind. In der Pflugvariante betrug der relative Oberflächenabfluss bis zu 8 % des gefallen Niederschlages eines Regenereignisses gegenüber 2 % in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung (Mulchsaat). Der höchste mittlere Bodenabtrag mit bis zu 3 t/ha/a⁻¹ im Winterraps und bis zu 1,3 t/ha/a⁻¹ im Mais sowie 0,01 t/ha/a⁻¹ im Winterweizen trat jeweils in der Pflugvariante auf. Im Zwischen- und Dränagenabfluss sind keine Sedimentfrachten nachgewiesen worden. Die maximalen mittleren Austräge der applizierten Wirkstoffe und Nährstoffe (Chlortoluron und Isoproturon 0,01 g/ha/a⁻¹, Metazachlor 1,15 g/ha/a⁻¹, Metolachlor 1 g/ha/a⁻¹, Pendimethalin 0,6 g/ha/a⁻¹, Terbutylazin 1,5 g/ha/a⁻¹, N 0,4 kg/ha/a⁻¹, P 0,1 kg/ha/a⁻¹) wurden in der Pflugvariante nachgewiesen. Bei Mulchsaat und Direktsaat konnte während der 5 Versuchsjahre eine Austragsminderung des Bodens sowie der angewandten Herbizide und Nährstoffe in allen Kulturen zwischen 70 und 100 % erreicht werden. Die im Oberflächenabfluss maximalen Konzentrationen für Chlortoluron und Isoproturon in gelöster Phase betrugen 1 – 8 µg/l, für Metazachlor, Metolachlor und Terbutylazin 87 – 98 µg/l, für Pendimethalin 1,4 µg/l, für Stickstoff 37 mg/l und für Phosphor 1 mg/l. Im Zwischen- und Dränagenabfluss aufgetretene Konzentrationen an Chlortoluron und Isoproturon, Metazachlor sowie Stickstoff und Phosphor sind in allen Bestellverfahren annähernd so hoch gemessen worden wie im Oberflächenabfluss. Eine Berechnung der Stofffrachten über diese Pfade war durch ein undefiniertes Einzugsgebiet methodisch nicht möglich.

Stichworte: Feldversuch, Bodenbearbeitung, Oberflächenabfluss, Herbizid- und Nährstoffaustrag

Strategies to reduce diffuse sources of herbicides and nutrients into surface water

Frank Erlach

Abstract

The objective of this study was to quantify soil loss and losses of herbicides and nutrients (N, P) from diffuse sources like surface runoff, interflow and tileflow from a slopy (7 %) agricultural area in Germany (Haarstrang, Northrhine-Westfalia) during a 5 years longing field study (1997 – 2002) with crop cultures such as corn, rape and wheat, managed under 3 different tillage systems (conventional-tillage, conservation tillage, no-tillage). For each type of tillage where field erosion plots with drainage systems ($n = 2$) were installed, an automated device for surface runoff and soil loss measurements was developed to answer the main questions of the study. How much water and soil does run off the field erosion plots? Which quantities of applied herbicides and nutrients (N, P) will be washed out, and in which concentrations? During the complete field study the highest mean surface runoff was up to 8 % of precipitation for one rainfall event under conventional tillage, and up to 2 % under conservation tillage. No registered surface runoff occurred under the no-tillage-system. Under conventional tillage with rape culture the mean soil loss was up to 3 t/ha/a⁻¹, with corn up to 1,3 t/ha/a⁻¹ and with wheat up to 0,01 t/ha/a⁻¹. There were no evidential freights of soil sediment within interflow and tileflow. Highest mean losses of applied herbicides and nutrients (Chlortoluron and Isoproturon 0,01 g/ha/a⁻¹, Metazachlor 1,15 g/ha/a⁻¹, Metolachlor 1 g/ha/a⁻¹, Pendimethalin 0,6 g/ha/a⁻¹, Terbutylazin 1,5 g/ha/a⁻¹, N 0,4 kg/ha/a⁻¹, P 0,1 kg/ha/a⁻¹) are being determined under conventional tillage. Conservation tillage and no-tillage markedly reduced sediment, herbicide and nutrient losses between 70 – 100 % in all crop cultures after 5 years of field study. Maximum concentrations in surface runoff for chlortoluron and isoproturon in dissolved matter occurred between 1 - 8 µg/l, for metazachlor, metolachlor and terbutylazin 87 – 98 µg/l, for pendimethalin 1,4 µg/l, for nitrogen 37 mg/l and for phosphorus until 1 mg/l. Appeared concentrations for chlortoluron and isoproturon, metazachlor, N and P within interflow and tileflow were approximately as high as evident concentrations in surface runoff. On account of undefinable watersheds of the drainage system, it was unable to calculate quantities of herbicides and nutrients.

Author keywords: *field study, tillage system, surface runoff, herbicide and nutrient loss*

1 Einleitung

Im Hinblick auf ökonomische Anforderungen an die Landwirtschaft des 21. Jahrhunderts ist es aus Sicht eines Landwirtes erstrebenswert, möglichst überdurchschnittlich hohe Erträge seiner Ackerkulturen zu erzielen.

Das Wachstum und die Entwicklung der Kulturen wird durch klimatische (z. B. Sonnenlicht, Temperatur, Niederschlag, Luft), pedologische (z. B. Bodenwasser, Nährstoffe) und biologische (z. B. Bodenfauna u. -flora) Faktoren begrenzt. Sie bestimmen in ihrem Zusammenwirken sowie ihrer Intensität den Ertrag (OEHMICHEN 2000).

Zur Sicherung hoher Erträge in der Landwirtschaft kommt dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Dünger als Produktionsmittel eine hohe Bedeutung zu. Nach der Applikation verbleiben die Wirk- und Nährstoffe (z. B. Stickstoff, Phosphor) zum Teil in der Umwelt. Sie unterliegen biologisch-chemischen Prozessen, die zum Abbau oder zu einer Verlagerung führen (UBA 2000). Hierzu zählen Ad- und Desorptionsvorgänge sowie Lösungs- und Fällungsreaktionen, der biologisch-chemische Ab- und Umbau, die Aufnahme durch Bodenflora und -fauna und der Austrag durch Wasser und Wind (KLIMSA 1996). Beim Verlagerungsprozess kann ein möglicher Gewässereintrag die Wasserqualität beeinträchtigen.

Grenzwerte von Pflanzenschutzmitteln in der deutschen Trinkwasserverordnung von 1986 (HAIDER 1994) beziehen sich unmittelbar auf die Trinkwasserqualität. Die Konzentration eines einzelnen Wirkstoffes darf 0,1 µg/l und die Summe mehrerer bzw. aller Wirkstoffe 0,5 µg/l nicht überschreiten. Für einige chlororganische Verbindungen im Bereich der Insektizide liegen die Grenzwerte unter 0,1 µg/l. Bedeutsam sind auch die Grenzwerte von Stickstoff und Phosphor. Hier liegt der Wert für Nitrat bei 50 mg/l und für Phosphat bei 0,1 mg/l (BMU 2002). Für Oberflächengewässer gab es bislang keine klaren Regelungen in Bezug auf die Qualitätsanforderungen, da sie nicht unmittelbar zur Trinkwasserversorgung herangezogen wurden (IRMER et al. 1993). Als Ausnahme sind die Zielvorgaben der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) zu nennen. Diese Vorgaben unterscheiden sich jedoch nur sehr geringfügig von den o. a. Werten (IKSR 1993).

Für die Ökosysteme in und an Gewässern, können hohe Konzentrationen bestimmter Pflanzenschutzmittel und Nährstoffe eine empfindliche Störung hervorrufen. Es treten toxische Wirkungen auf Fische, Pflanzen und anderen Organismen auf. Das Algenwachstum wird durch Nitrate und Phosphate stark gefördert, was zu einer Eutrophierung der Gewässer führt. Zur Erhaltung von Wasser und Boden müssen Stoffeinträge in die Gewässer vermieden bzw. verringert werden.

Der Eintrag von Pflanzenschutzmitteln (PSM) in Oberflächengewässer erfolgt auf verschiedenen Pfaden durch sogenannte diffuse Quellen, die häufig landwirtschaftlich bedingt sind. Nach AKKAN et al. (2003) werden in Deutschland jährlich ca. 35.000 t PSM auf landwirtschaftlich genutzten Flächen angewendet. Davon entfallen ca. 16.000 t auf Herbizide, was ca. 62 % der Ausbringungsmenge ausmacht. Mit 0,17 % Anteilen gelangen etwa 28 t Herbizide in die Oberflächengewässer. Schätzungen gehen von ca. 9 t Eintrag durch Abschwemmung von landwirtschaftlich genutzten Flächen und ca. 10 t durch Hofabläufe aus. Abtrift (3,5 t) und Dränagen (1,5 t) sind von geringerer Bedeutung. Weiterhin gelangen ca. 820.000 t Stickstoff (N) und 37.000 t Phosphor (P) in die Gewässer (UBA 2000). Die diffusen Eintragspfade weisen Anteile von 72 % beim N und ca. 66 % beim P auf. Dabei hat der Eintrag von N über das Grundwasser mit 48 % den größten Anteil, während der Weg über Dränagen (15 %) sowie durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag (ca. 4 %) weniger bedeutsam ist. Beim P sind Oberflächenabfluss und Bodenabtrag sowie der Eintrag über Dränagen mit zusammen 40 % die wichtigsten landwirtschaftsbedingten Eintragspfade. Solche Schätzgrößen sind mit großen Schwankungsbreiten verbunden, geben aber dennoch wichtige Hinweise auf mögliche Eintragspfade und damit Hinweise auf Minderungsstrategien.

Um die Entwicklung von Strategien zur Minderung von Stoffeinträgen in die Oberflächengewässer voranzutreiben, ist es notwendig die Eintragspfade oder -quellen (s. Kap. 3.1) der genannten Stoffe zu lokalisieren und zu quantifizieren. Mit Hilfe dieser Kenntnisse können gezielte Maßnahmen zum Schutz der Gewässer ergriffen werden. Vor allem bei den nur schwer zu erfassenden diffusen Quellen von ackerbaulich genutzten Flächen gibt es bisher nur wenige Feldversuchsreihen unter natürlichen Bedingungen mit Ergebnissen zur tatsächlichen Bedeutung dieser Belastungspfade. Diffuse Stoffeinträge häufig eingesetzter Pflanzenschutzmittel und Nährstoffe in die Oberflächengewässer erfolgen stets nach einem vorangegangenen Austrag dieser Stoffe, ausgelöst durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag (vgl. Kap. 3.1.1) erosionsgefährdeter Ackerstandorte.

Um dieser Situation entgegenzuwirken können wirksame Schutzmaßnahmen flächendeckend zur Minderung von Bodenabtrag und Stoffausträgen angewandt werden. Hier ist insbesondere die Form der Bodenbearbeitung (SOMMER et al. 1989; LÜTKE ENTRUP 1996; FRIELINGHAUS et al. 1997; SOMMER 1999; ECAF u. GKB 1999; BUCHNER 2000; BMVEL 2001) zu nennen. Der Oberflächenabfluss wird durch eine verbesserte Bodenstruktur und eine ausreichende Bodenbedeckung (Kulturpflanzen und -reste) vermindert. Pfluglose Bestelltechniken wie die konservierende Bodenbearbeitung oder das Direktsaatverfahren können zur Minimierung des Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffeintrages in die Oberflächengewässer beitragen (vgl. Kap. 3.2).

Bei Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung bewirkt der Verzicht auf die wendende Bodenlockerung durch den Pflug eine Schonung der Bodenstruktur und einen Schutz der Böden vor Degradation. Aufgrund der verringerten Eingriffsintensität in den Boden stabilisieren sich die Bodenaggregate. Die Bodenbedeckung erhöht sich durch den Verbleib von Pflanzenresten auf der Bodenoberfläche. Zusätzlich wird die Infiltration des Bodens aufgrund eines vermehrten Makroporenanteils durch eine ungestörte Regenwurmaktivität erhöht. So wird die Bodenoberfläche vor Wassererosion geschützt. Oberflächenabfluss, Boden- und Stoffaustrag werden verringert bei gleichzeitigem Erhalt der Bodenfruchtbarkeit (ECAF u. GKB 1999; BMVEL 2001). Neben den erosionsmindernden Effekten der pfluglosen Bestelltechnik sind auch ökonomische Effekte gegeben. Vor allem ist in diesem Zusammenhang die Zeit- und Kostenersparnis durch geringeren Arbeitsaufwand und Treibstoffverbrauch für die landwirtschaftlichen Betriebe zu nennen.

Ein nachteiliger Nebeneffekt der konservierenden Bodenbearbeitung ergibt sich möglicherweise aus einem erhöhten Zwischenabfluss (s. Kap. 3.1.1.2) durch verstärkt auftretenden Makroporenfluss. Das Problem der Verlagerung von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen auf diesem Weg ist vorhanden. Die Zusammenhänge zwischen Bodenbearbeitung und den Austragspfaden Zwischenabfluss sowie Makroporenfluss sind bisher noch nicht hinreichend untersucht worden. Eine erhöhte Infiltrationsrate des Bodens könnte ebenfalls zu höheren Dränageabflüssen führen. Einen mitentscheidenden Einfluss auf diese Prozesse hat dabei die Gestaltung der Fruchtfolge (LÜTKE ENTRUP 2000).

Der Forschungsschwerpunkt liegt in der vergleichenden Bewertung der konventionellen Bestelltechnik mit Pflugeinsatz und dem konservierenden Verfahren der Mulchsaat sowie dem Direktsaatverfahren im Hinblick auf eine Minderung der Stoffausträge von Ackerflächen, sowohl mit dem Oberflächen- als auch mit dem Zwischenabfluss.

2 Zielsetzung

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Quantifizierung von Boden- und Stoffabträgen auf einer erosionsgefährdeten Ackerfläche in Nordrhein-Westfalen bei unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung. Dazu wurde eine Feldversuchsfläche an einem Hangstandort angelegt, auf der mit Hilfe von definierten Versuchsplots und einer installierten Messtechnik Oberflächen- und Zwischenabflüsse unter natürlichen Niederschlagsbedingungen erfasst und bewertet wurden. Die Forschungsarbeit wurde unter Berücksichtigung von für Nordrhein-Westfalen typischen Ackerfruchtfolgen in einer fünfjährigen (1997 - 2002) Versuchsreihe durchgeführt (vgl. Kap. 5.2).

2.1 Untersuchungsansätze und Versuchsfragen

Zum empirischen Untersuchungsansatz des Feldversuchs gehört eine Bilanzierung der Stoffausträge über die diffusen Pfade des Oberflächen-, Zwischen- und Drainageabflusses, ausgelöst durch natürliche Niederschlagsereignisse auf ackerbaulich genutzten Flächen. Es wird der Frage nachgegangen, welchen Beitrag Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung sowie der Direktsaat zur Verringerung des Austrages von Pflanzenschutzmitteln (PSM) und Nährstoffen gegenüber einer konventionellen Bestelltechnik mit dem Pflug leisten können. Bei den eingesetzten Pflanzenschutzmitteln handelt es sich ausschließlich um Herbizide mit ihren entsprechenden Wirkstoffen (vgl. Kap. 5.2.2).

Die zentralen Versuchsfragen sind:

1. Wie viel Wasser fließt nach erosiven Niederschlägen von den definierten Versuchsplots einer Anbaukultur bei konventioneller Bestelltechnik (Pflugeinsatz) im Vergleich zur konservierenden Bodenbearbeitung und Direktsaat oberflächlich ab ?
2. Wie hoch ist der Bodenabtrag in einer Ackerkultur bei verschiedenen Bestelltechniken ?
3. Welche Herbizid- und Nährstoffmengen werden von den Versuchsplots abgeschwemmt bzw. mit dem abgetragenen Boden verlagert ?
4. Welche Herbizid- und Nährstoffkonzentrationen treten dabei auf ?
5. Wie hoch sind die Herbizid- und Nährstoffmengen, die mit dem Zwischenabfluss und dem Drainageabfluss verlagert werden und welche Konzentrationen treten auf ?

6. Bei welchem Bodenbedeckungsgrad in den einzelnen Kulturen und für welche Bestelltechniken kann auf dem Versuchsstandort von einer ausreichenden Minderung erosiver Boden- und Stoffabträge ausgegangen werden ?
7. Wie differenziert sind die Rückstandsgehalte der eingesetzten Herbizide im abtragsgefährdeten Oberboden der jeweiligen Bearbeitungsvarianten ?

Zu den Versuchsfragen 1 - 7 ergeben sich vorweg genommene Antworten (F 1 - F 7), die mit Hilfe der methodischen Vorgehensweise im Forschungsprojekt geklärt werden sollen.

- F 1 Nach der Erfassung von Niederschlag und Oberflächenabfluss während eines Erosionsereignisses ist es möglich, die Abflussmengen bei verschiedener Bestelltechnik zu berechnen und eine Bewertung hinsichtlich des Abflussgeschehens vorzunehmen.
- F 2 Mit Hilfe der Registrierung von im Abfluss enthaltenen Sedimentmengen wird eine Berechnung des Bodenabtrages vorgenommen.
- F 3 Die berechnete Gesamtmenge der im Oberflächenabfluss enthaltenen Herbizide und Nährstoffe verdeutlicht den Stoffaustrag eines einzelnen Abflussereignisses bei jeweiliger Bestelltechnik. Es lassen sich Aussagen über das Erosionsgeschehen und die Bodenschutzwirkung in den Bearbeitungsvarianten treffen.
- F 4 Entscheidend für die Berechnung und Bewertung von ausgetragenen Stoffen bei unterschiedlicher Bestelltechnik sind die Konzentrationen der eingesetzten Herbizide und Nährstoffe, da die toxische Wirkung von Herbiziden bzw. die eutrophierende Wirkung von Nährstoffen auf Gewässer mit der Konzentration in Zusammenhang steht. Trotz insgesamt geringer Stoffausträge bei schwachem Abflussereignis können hohe Stoffkonzentrationen im Abfluss auftreten. Darüber hinaus kann eine mögliche Korrelation zwischen Stoffkonzentration und Bearbeitungssystem zu neuen Erkenntnissen über mögliche Nebeneffekte von Minderungsmaßnahmen führen.

- F 5 Es soll untersucht werden, ob und welche Mengen an Herbiziden und Nährstoffen über die Pfade des Zwischen- und Drainageabflusses nach Niederschlagsereignissen bei jeweils angewandter Bestelltechnik ausgetragen werden. In pfluglosen Bestelltechniken hat die Bedeutung eines diffusen Stoffaustrages mit dem Zwischenabfluss, besonders in Zusammenhang mit Makroporenflüssen, zugenommen (s. Kap. 3.1.1.2). In welchem Umfang dies auf den Versuchsstandort zutrifft, sollen die Feldversuche nach einer Quantifizierung der über diesen Pfad ausgetragenen Stoffe zeigen.
- F 6 Da die Bodenbedeckung ein mitentscheidender Faktor (vgl. Kap. 3.2) für die Erosionsanfälligkeit eines Bodens ist, kommt der nicht wendenden Bodenbearbeitung als Minderungsstrategie zur Verringerung von Stoffausträgen eine hohe Bedeutung zu. In den Versuchsplots der verschiedenen Bearbeitungsvarianten lassen ermittelte Bodenbedeckungsgrade vor und nach Abflussereignissen einen Vergleich über das Abtragsgeschehen zu.
- F 7 Es wird der Frage nachgegangen, ob ein Zusammenhang zwischen Abbauvorgang und Verlagerungsverhalten einzelner Wirkstoffe und der jeweiligen Bestelltechnik besteht. Sind zeitliche Differenzen im Wirkstoffabbau und der Wirkstoffverlagerung auf dem Versuchsstandort in den jeweiligen Versuchsjahren festzustellen? Ergeben sich dadurch Vor- bzw. Nachteile für eine bestimmte Bestelltechnik?

Der Anspruch der fünfjährigen Versuchsreihe im Feld liegt darin, die vorangegangenen Fragen weitestgehend zu beantworten. Aus den Versuchsergebnissen sollen Empfehlungen zum praktischen Einsatz konservierender Bodenbearbeitungsverfahren für Standorte mit erhöhter Oberflächengewässerbelastung durch Herbizid- und Nährstoffeinträge aus diffusen Quellen abgeleitet werden. Leisten solche Bestelltechniken einen Beitrag zur nachhaltigen Bodennutzung im Sinne des 1998 verabschiedeten Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG), um künftigen Generationen die Ertragsfähigkeit fruchtbarer Ackerböden zu erhalten (SOMMER u. BRUNOTTE 2000) ? Welchen Beitrag leisten sie für die Erhaltung bzw. Verbesserung der Gewässerqualität (vgl. LWK-WL 2002) ?

3 Literaturübersicht zum Dissertationsthema

Die Gewinnung von Trinkwasser in Deutschland erfolgt zu 70 % aus der Entnahme von Grundwasser. Die restlichen 30 % werden aus Oberflächengewässern entnommen. Das entnommene "Rohwasser" wird in mehreren Stufen zu Trinkwasser aufbereitet und in das Leitungsnetz verteilt (HERZEL 1995). Die Belastung des Trinkwassers mit Pflanzenschutzmitteln ist gering. Nachgewiesene Wirkstoffkonzentrationen liegen bis auf wenige Ausnahmen unterhalb der Richtlinien der Trinkwasserverordnung von 1986 (HERZEL 1995, 1997; ISENBECK-SCHRÖTER et al. 1998; DOMROESE et al. 2001). Dies lässt aber keine Schlüsse über die tatsächliche Belastung des zu Trinkwasserzwecken entnommenen Grundwassers zu. Das aus Förderbrunnen gewonnene "Rohwasser" stammt in der Regel aus unteren Grundwasser-Stockwerken, welche eine geringe bis keine Belastung aufweisen (HERZEL 1995; NEUMANN u. LEUCHS 1999). Messstellen von Förderbrunnen oberer, also oberflächennaher Grundwasserschichten, zeigten eine höhere Pflanzenschutzmittelbelastung (HERZEL 1995; ISENBECK-SCHRÖTER et al. 1998; LUA-NRW 1999; NEUMANN u. LEUCHS 1999). Dies deutet einerseits auf die Pufferwirkung des geologischen Untergrundes hin, der eine Belastung in tiefere Schichten stark abmildert, andererseits deutet dies auf einen möglichen Kontakt der oberen Grundwasser-Stockwerke mit kontaminierten Oberflächengewässern. In Grund- und Quellwässern von Karstgebieten ist die Gefahr der Kontamination mit PSM und Nährstoffen höher einzustufen (BÖRGER u. POLL 1998). Im Einzugsbereich dieser Gewässer ist daher ein besonderer Schutz vor einem möglichen Stoffeintrag notwendig.

HERZEL (1995) hält die Diskussion über die Trinkwasserbelastung mit Pestiziden für nicht realistisch. Da sich der Grenzwert für Wirkstoffe in der Trinkwasserverordnung toxikologisch nicht begründen lässt, hat dieser Wert einen Vorsorgecharakter und reiche demnach völlig aus. Viel kritischer sind die Grenzwerte für Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor, insbesondere der des Nitrats zu betrachten. Tatsächlich hat die Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland seit den 50 er Jahren des vorigen Jahrhunderts kontinuierlich zugenommen (LAWA 1995). Nach einer Trendanalyse des Nitratgehaltes von Grundwassermessstellen in Nordrhein-Westfalen zwischen 1984-1998 kamen NEUMANN u. LEUCHS (1999) zu dem Ergebnis, dass ca. 20 % der Messstellen den Grenzwert von 50 mg/l überschritten und nur 30 % als gering belastet (< 10 mg/l) eingestuft wurden. Erst seit 1996 ist eine Tendenz der Stagnation zu erkennen.

Aus diesen Erkenntnissen hat die Belastung der Oberflächengewässer mit Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen gegenüber der des Grundwassers einen anderen Stellenwert. Die Oberflächengewässer Deutschlands unterliegen nicht den Richtlinien der Trinkwasserverordnung (ISENBECK-SCHRÖTER 1998; LUA-NRW 1999). Sie sind aber Lebensraum vieler aquatischer Lebensgemeinschaften und werden direkt (z. B. Talsperren) oder indirekt (z. B. Uferfiltrat) zur Trinkwasser-

gewinnung herangezogen. Außerdem stehen sie durch Sickerwässer im Boden mit den oberflächennahen Grundwasserschichten in Verbindung.

Oberflächengewässer sind einer zeitweisen Belastung von Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffeinträgen ausgesetzt. Die phasenweise Belastung kann je nach Konzentration eine toxische Wirkung auf die aquatische Lebensgemeinschaft haben (AKKAN et al. 2003) bzw. führt zur Eutrophierung der Gewässer.

Ein effektiver Gewässerschutz zur Vermeidung solcher Stoffeinträge ist vor allem durch präventive Maßnahmen zu erreichen. Hierzu bedarf es wichtiger Kenntnisse über die Eintragsherkunft der Stoffe. Da dem Eintrag von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen in Oberflächengewässer immer ein Austrag vorausgeht, ist eine Ursachenforschung im Sinne der Stoffherkunft in vielen Forschungsarbeiten betrieben worden. Eine hohe Bedeutung wird dabei den Eintragungspfaden über landwirtschaftlich genutzte Flächen beigemessen (HAIDER 1994; FRIELINGHAUS et al. 1997; FIP 1998; ISENBECK-SCHRÖTER et al. 1998; LUA-NRW 1999; LÜTKE ENTRUP 2000; UBA 2000; BMVEL 2001).

Die meisten Stoffausträge entstehen durch Abflussereignisse, die auf ungeschützten Flächen verstärkt auftreten. Das trifft vor allem auf die ackerbaulich genutzten Flächen zu, da sie im Gegensatz zu den Grünlandflächen nur periodisch eine geschlossene Pflanzendecke aufweisen. Hier kommt es nach Niederschlägen zu Abflussereignissen und Bodenabtrag mit Austrägen von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen.

3.1 'Diffuse Eintragungspfade' für Pflanzenschutzmittel und Nährstoffe in Oberflächengewässer: Definition und Bedeutung

Bei Betrachtung der Eintragungspfade von Stoffen in Oberflächengewässer wird allgemein zwischen diffusen und punktuellen Quellen unterschieden (WERNER et al. 1994; BACH 1996). Diese werden von einigen Autoren unterschiedlich definiert. Sie werden nach verschiedenen Methoden erfasst und führen zu abweichenden Ergebnissen. Vor allem bei der Diskussion über die Bedeutung diffuser Einträge von Pflanzenschutzmitteln (PSM) und Nährstoffen in Oberflächengewässer sollte die jeweilige Abgrenzung des Begriffes zu den punktuellen Einträgen erfolgen. Zur Begriffsabgrenzung gibt BACH (1996) vier Autoren an, von denen WERNER et al. (1994) den Begriff der diffusen Quellen am weitesten fassen.

In Tabelle 1 sind die für die landwirtschaftliche Produktion relevanten Quellen des Stoffeintrages in Oberflächengewässer aufgelistet.

Tab. 1: Diffuse und punktförmige Quellen für PSM- und Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer aus dem Bereich der landwirtschaftlichen Produktion

Diffuse Quellen	Punktförmige Quellen
Direkteinträge bei der PSM-Applikation	Kommunale Abwässer
Abtrift während der Applikation	Unfälle beim Transport von PSM zur Anwendungsfläche
Atmosphärische Deposition nach Verflüchtigung	Abschwemmung von landwirtschaftlichen Siedlungsflächen (Hofabläufe)
Oberflächenabfluss und Bodenabtrag	
Dränageabflüsse	
Zwischenabfluss	
Grundwasserabfluss	

Quelle: LUA-NRW (1999); HAIDER (1994)

WERNER et al. (1994) und AKKAN et al. (2003) zählen Hofabläufe mit hauseigenen Kläranlagen nicht zu den punktförmigen Quellen, sondern zu den diffusen. Die meisten Hofabläufe gelangen aber indirekt über das kommunale Abwassernetz in die Oberflächengewässer, so dass sie zu den punktförmigen Quellen gehören müssten. Hierin unterscheiden sie sich wesentlich von den anderen Autoren, was im Falle einer Quantifizierung der Eintragspfade berücksichtigt werden muss.

Dies hat umso mehr Bedeutung bei der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Dort zählen Hofabläufe ebenfalls zu den punktförmigen Quellen, ungeachtet dessen, ob sie über eine Kläranlage gefasst oder direkt dem Gewässer zugeführt werden. Nach den neueren Modell-Berechnungen von BACH u. FREDE (2003) über Ansätze zur Feststellung signifikanter PSM-Belastungen in Gewässer nach WRRL, ergeben sich gravierende Verschiebungen hinsichtlich der PSM-Frachten über diffuse bzw. punktuelle Eintragspfade. Demnach liegt der Anteil der diffusen Einträge für die 4 großen Gewässereinzugsgebiete Rhein, Main, Nidda und Ruhr zwischen 7 und 28 %, während der für Punktquellen zwischen 72 und 93 % liegt. Diesem Ansatz zur Folge, haben die Arbeiten von FISCHER (1996, 1998) sowie HOOF (1994), SEEL et al. (1996) und BACH (1997) eine neue aktuelle Bedeutung erlangt.

FISCHER et al. (1996, 1998) quantifizierten Eintragspfade für PSM in Einzugsgebieten kleiner Fließgewässer über Kläranlagen. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass zum Teil mehr als 90 % der erfassten Wirkstoffmengen über die kommunalen Kläranlagen eingetragen wurden. Zu ähnlichen Messergebnissen kommen HOOF (1994), SEEL et al. (1996) und BACH (1997). Dabei wurden am Auslauf der Kläranlagen Spitzenkonzentrationen bestimmter Wirkstoffe von über 300 µg/l gemessen. Zum besseren Verständnis zählen in dieser Arbeit die Hofabläufe nicht zu den diffusen Quel-

len, sondern zu den Punktquellen (s. Tab. 1). BACH u. FREDE (2003) sehen einen direkten Zusammenhang zwischen der Häufigkeit derartiger Stoffeinträge und der Dichte der Spritzgeräte eines Gewässereinzugsgebietes.

In Bezug auf die Bedeutung des diffusen Eintrages von PSM- und Nährstoffen in die Oberflächengewässer Deutschlands werden Stoffmengen nach verschiedenen Untersuchungsansätzen ermittelt. Häufig werden empirisch-analytische Verfahren angewandt, die auf einer Messung oder Schätzung von Gewässerfrachten in bestimmten Einzugsgebieten basieren und nach weiterer Berechnung auf das gesamte Einzugsgebiet bezogen werden (BACH 1996). In jüngster Zeit dienen Modellierungen dazu, die Wasser- und Stofffrachten aus diffusen Quellen in Gewässereinzugsgebieten mit Hilfe von Datenverarbeitungsprogrammen wie WEPP, EROSION 3 D, PELMO oder DRIPS zu quantifizieren (HUBER 1998; UBA 2000; MICHAEL 2001; BACH u. FREDE 2003).

Die Ergebnisse der PSM-Frachten hängen von mehreren Einflussfaktoren ab, welche in den jeweiligen Einzugsgebieten sehr unterschiedlich oder nicht bekannt sind. Dazu gehören der Witterungsverlauf eines Untersuchungsjahres, die Dauer der Messperiode, Standortverhältnisse und Aufwandmengen der PSM. Eine besondere Rolle dabei spielen die landwirtschaftlichen Flächennutzungen für die flächenbezogenen diffusen Einträge. BACH u. FREDE (2003) berechneten die geringsten PSM-Einträge über Ackerflächen mit Mähdruschfrüchten. Bei Reihenkulturen ergibt sich die 3 fache Menge und für Obst- und Weinbau die bis zu 10 fache Menge an PSM-Einträgen gegenüber den Flächen mit überwiegend Mähdruschfrüchten. Die Frachtberechnung erfolgt meist nach gebräuchlichen Methoden, wie die der Interpolations- oder Extrapolationsmethode. Bei der Interpolationsmethode werden Stofffrachten nach Hochrechnung von Stichproben ermittelt, während bei der Extrapolationsmethode eine Frachtschätzung aus der Beziehung zwischen einzelnen Stoffkonzentrationen und dem Gesamtabfluss geschätzt bzw. berechnet wird (BACH 1996). Die meisten Fehler ergeben sich hierbei durch eine zu niedrige Probennahmefrequenz und der enormen Variabilität der Stoffkonzentrationen. Die Folge ist eine häufige Unter- oder Überschätzung der Frachten, die durch statistische Korrekturen abgeschwächt werden kann, aber nur selten zu einer exakten Bilanz führt. So schreiben Autoren beim Eintrag von PSM und Nährstoffen in Oberflächengewässer meistens von einer geschätzten oder annäherungsweisen Kalkulation.

Diffuse Eintragspfade aus Quellen (s. Tab. 1) wie die Abtrift von Stoffen durch Windeinwirkung nach PSM-Applikation und Düngergabe, die atmosphärische Deposition, der Oberflächenabfluss und Bodenabtrag, Drainageausläufe, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss sind sehr schwer zu lokalisieren und zu quantifizieren, da ihre auslösenden Prozesse noch größtenteils unbekannt und von hoher Variabilität gekennzeichnet sind. Mengenangaben von PSM und Nährstoffen über eine bestimmte Quelle beziehen sich auf Wassereinzugsgebiete von Oberflächengewässern. Sie

werden daher flächenspezifisch in Gramm bzw. Kilogramm pro Hektar und Jahr (g/ha/a bzw. kg/ha/a) berechnet. Daraus kann ein prozentuales Verhältnis der Eintragsquelle in Bezug zur Gesamtmenge angegeben werden. In den folgenden Ausführungen werden die Eintragspfade Oberflächenabfluss und Bodenabtrag, Zwischenabfluss sowie Drainageausläufe näher erläutert.

3.1.1 Herbizid- und Nährstoffeinträge von ackerbaulich genutzten Flächen

Pflanzenschutzmittel werden in Deutschland nicht nur in der Landwirtschaft eingesetzt. Die Landwirtschaft hat allerdings mit ca. 80 % aller applizierten PSM den größten Anteil daran. Dabei tragen die Herbizide mit ca. 62 % Mengenanteil die Hauptlast der verwendeten Aktivsubstanzen (LUA 1999). Mit breitem Wirkungsspektrum kommen Herbizide heute zum Einsatz. Einige von ihnen werden durch gezielte und bewährte Einsatzmöglichkeiten verstärkt angewandt. Sie lassen sich daher häufiger in Oberflächengewässer wieder finden. Hierzu gehören vor allem die Wirkstoffe der Getreide-, Mais- und Rapsherbizide.

Zu den in jüngster Vergangenheit und zum Teil bis heute häufig applizierten Wirkstoffen gehören Chlortoluron und Isoproturon in Getreideherbiziden, Metazachlor in Rapsherbiziden sowie Terbutylazin, Metolachlor und Pendimethalin in Maisherbiziden. Nach GEISELHART (1994); KLIMSA (1996) und UBA (2000) unterscheiden sie sich ganz wesentlich in ihrer Abbaurate (DT-Werte) und im Sorptionsverhalten (K_{oc} -Werte).

Mit Hilfe der DT-Richtwerte lässt sich die biologisch-chemische Abbaugeschwindigkeit eines Pflanzenschutz-Wirkstoffes charakterisieren. Anhand von Abbaukurven durch mathematische Funktionen (Funktionen 1. Ordnung oder Wurfelfunktionen) erfolgt die quantitative Beschreibung des Abbaues. Aufgrund der mathematischen Beschreibung des Abbauverhaltens eines Wirkstoffes kann die Abbaugeschwindigkeit durch die DT-Werte bestimmt werden. Der DT_{50} -Wert (= disappearance time 50 %) gibt die Zeit in Tagen bis zur Halbierung der ausgebrachten Wirkstoffmenge an. Der DT_{90} -Wert (= disappearance time 90 %) kennzeichnet die Zeitdauer bis zum Abbau auf 10 % der Ausgangsmenge eines Stoffes (GEISELHART 1994).

Der K_{oc} -Wert ist eine Maßzahl für das Ausmaß der Adsorption eines Wirkstoffes im Boden. Die Adsorption wird vor allem durch chemische und physikalische Eigenschaften des Bodens und der Pflanzenschutz-Wirkstoffe bestimmt. Zur Adsorptionsprognose gilt der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) im Boden als wichtigster Parameter. Mit Hilfe dieses Wertes lassen sich Eigenschaften einzelner Wirkstoffe in wässriger und fester Phase bewerten (GEISELHART 1994). Je höher der K_{oc} -Wert, desto stärker ist ein Wirkstoff an Bodenkolloide sorptiv gebunden. Die Sorption

erfolgt durch Anlagerung von Ionen und Molekülen an Bodenpartikel aufgrund von verschiedenen Bindungsmechanismen.

Die Verlagerung stark sorbierter Stoffe verläuft überwiegend partikulär, also mit dem abgetragenen Sediment bei Erosionsereignissen. So sind PSM-Austräge vor allem mit zunehmender Regenerosivität, Bodenerodibilität, Hangneigung und -länge, bei geringer Bodenbedeckung und bei einer Bodenbearbeitung in Gefällerrichtung zu erwarten (HAIDER 1994; LUA-NRW 1999).

Schwach sorbierte Stoffe, die gut wasserlöslich sind, werden außer mit dem Oberflächenfluss auch durch Zwischen-, Drainage- und Grundwasserabfluss verlagert. Für diese Stoffe ist vor allem der Zeitpunkt des Abflussbeginns von entscheidender Bedeutung für die PSM-Konzentrationen im Oberflächenabfluss. Zum Beispiel besteht eine große Gefährdung, wenn Abflussereignisse bald nach der Applikation der Stoffe eintreten (HAIDER 1994, SCHÜLEIN et al. 1996).

Besonders problematisch sind die Wirkstoffe mittlerer Wasserlöslichkeit, da sie langsamer als die sehr gut wasserlöslichen Substanzen in den Boden eingewaschen werden und gleichzeitig persistenter sind als die schwach sorbierten Stoffe. Sie verbleiben daher länger in der obersten Bodenschicht und können somit leicht mit dem Oberflächenabfluss transportiert werden. Nimmt die Wasserlöslichkeit zu, steigt der Wirkstoffanteil, der über die Pfade Drainage-, Zwischen- und Grundwasserabfluss verlagert werden kann.

Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer sind sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs. Dabei stellt die als natürliche Grundlast bezeichnete natürliche Nährstofffreisetzung eine relativ geringe Gewässerbelastung dar (FELDWISCH u. FREDE 1995). Anthropogene Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer und andere Biotope stammen aus Industrieabwässern, Abgasen und aus der Düngemittelanwendung.

Aus ökologischer wie aus gesundheitlicher Sicht sind beim Gewässerschutz vor allem Stickstoff- und Phosphorverbindungen (N- und P-Verbindungen) als gewässerbelastende Nährstoffgruppen von besonderer Bedeutung (FELDWISCH u. FREDE 1995). Gelangen Phosphor- und Stickstoffverbindungen in oberirdische Gewässer, so ändert sich das "chemische Klima" dieser Biotope. Dadurch wird das Wachstum der Wasserpflanzen und Algen in unerwünschtem Maße angeregt, das Gewässer eutrophiert und bewirkt eine Störung des ökologischen Gleichgewichtes.

Die Landwirtschaft trägt als größter Düngemittel-Anwender die Hauptlast der diffusen Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer. Aufgrund zunehmender N- und P-Bilanzüberschüsse landwirtschaftlicher Betriebe kann es zur Auswaschung und Abschwemmung von N- und P-Verbindungen

auf ackerbaulich genutzten Flächen kommen (FIP 1998; LÜTKE ENTRUP 2000; OEHMICHEN 2000; BMVEL 2001).

Nach der Studie einer Arbeitsgruppe des Umweltbundesamtes zur Quantifizierung der N- und P-Einträge in die Oberflächengewässer aus punktuellen und diffusen Quellen im Bereich der alten Bundesrepublik überwiegt der Stickstoffeintrag über diffuse Quellen mit 57 %, während der Phosphoreintrag - je nach Berechnungsgrundlage – zwischen 36 und 46 % liegt (WERNER et al. 1991).

Eine weitere Studie von WERNER et al. (1994) behandelt den Stickstoff- und Phosphoreintrag in die Fließgewässer Deutschlands unter besonderer Berücksichtigung des Eintragsgeschehens im Gebiet der ehemaligen DDR. Sie quantifizierten verschiedene diffuse sowie punktförmige Quellen und schlussfolgerten, dass für N die diffusen Quellen mit ca. 56 % und für P die punktförmigen Quellen mit ca. 67 % die Hauptlast der Gewässerbelastung tragen. Bei genauerer Betrachtung der Eintragspfade diffuser Quellen wurden deutliche Unterschiede zwischen N- und P-Einträgen errechnet. Während als Haupteintragspfad für Stickstoff die Nitratauswaschung in das Grundwasser und der Austritt über Quellen und Drainagen in Fließgewässer mit 63 % angegeben wird, ist es bei Phosphor der Oberflächenabfluss und der Bodenabtrag mit ca. 43 %.

Nach FELDWISCH und FREDE (1995) liegt der Anteil der Landwirtschaft an diffusen Nährstoffeinträgen in die Gewässer bei 90 %. Die Quantität der N-Auswaschung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen hängt nach MAIDL (1989) von den Faktoren Niederschlagsmenge, Art und Mächtigkeit der Böden, Art und Dauer des Pflanzenbestandes, Erosion sowie aktuelle Düngung (Menge, Zeitpunkt, Form) ab. Im Gegensatz zu N ist die Auswaschungsgefahr von P in das Grundwasser gering. Allerdings darf die P-Verlagerung über das Sickerwasser in die Drainagen, insbesondere bei hoher P-Versorgung des Bodens, nicht vernachlässigt werden (RÖMER 1997).

3.1.1.1 Bedeutung des Oberflächenabflusses und Bodenabtrages

Seitdem der Mensch in Mitteleuropa durch Waldrodung, Besiedlung und landwirtschaftliche Nutzung aktiv in den Naturraum eingriff, bewirkte er durch den Wegfall der schützenden Vegetationsdecke eine Mobilisierung bodenerosiver Prozesse. Ausgelöst durch Niederschläge kam es auf den neu geschaffenen Kulturlächen zu einem erhöhten Oberflächenabfluss, was zu einer beschleunigten Denudation der Hänge führte und heute in Deutschland als Bodenerosion oder Bodenabtrag in der Fachliteratur beschrieben wird (HAHN 1992).

Die Problematik des Bodenabtrages auf landwirtschaftlich genutzten Flächen hat infolge von Flächenumstrukturierungen und der Anpassung der Bodenbewirtschaftung an wechselnde Marktgegebenheiten zunehmend an Bedeutung gewonnen. Neben den Verlusten an Bodenmaterial, die zu erheblichen Einbußen im Hinblick auf die Ertragsfähigkeit von Böden führen, stehen vor allem die Austräge von Nährstoffen (Stickstoff und Phosphor) und Pflanzenschutzmitteln im Vordergrund. Diese Stoffe können infolge ihrer Verlagerung in Oberflächengewässer die Wasserqualität beeinträchtigen (vgl. Kap. 3.1).

Unter Bodenerosion oder Bodenabtrag wird allgemein die Verlagerung von Bodenmaterial an der Bodenoberfläche durch Wasser und Wind verstanden. Aufgrund dieses Vorganges entstehen Flächen, die durch überwiegenden Abtrag (Denudation) und solche die durch vorwiegenden Auftrag (Akkumulation) gekennzeichnet sind.

In Deutschland und in Nordrhein-Westfalen hat die Wassererosion im Hinblick auf den Austrag von PSM und Nährstoffen von ackerbaulich genutzten Flächen den größten Anteil. In Anlehnung an die "Allgemeine Bodenabtragsgleichung" von SCHWERTMANN et al. (1990), bestimmen die Faktoren Niederschlag, Bodenanfälligkeit, Hangneigung und -länge sowie Bodenbedeckung den Verlauf und die Intensität der Wassererosion. Beim Faktor Niederschlag ist nicht unbedingt die Niederschlagsmenge, sondern vor allem die Niederschlagsintensität (Niederschlag pro Zeiteinheit) für den Erosionsprozess verantwortlich.

Schäden, die durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag ("Runoff") auf den Ackerflächen selbst entstehen, werden als flächeninterne Schäden ("Onsite"-Schäden) bezeichnet. Sie treten als sichtbare Schäden (Rillen, Rinnen, Gräben, Verschlammungen) auf, wie in den Abbildungen 4 und 5 im Anhang zu sehen oder als nicht sichtbare Schäden, welche die Funktionen des Bodens als Wasser- und Nährstoffspeicher für die Pflanzenkulturen stören. Es tritt eine Reduzierung der Bodenfruchtbarkeit ein (HOEGEN et al. 1995; RICHTER 1998; BMVEL 2001). Als "Offsite"-Schäden werden die flächenexternen Schäden abseits der vom Oberflächenabfluss betroffenen Flächen bezeichnet. Hierzu zählt vor allem die Verschlammung von Straßen, Wegen und Gräben (Anhang, Abb. 4) sowie die Verlagerung von Pflanzenschutzmitteln (PSM) und Nährstoffen, welche die Oberflächengewässer belasten (BMVEL 2001) und als diffuse Eintragspfade beschrieben wurden. Eine detaillierte Beschreibung der durch Wassererosion hervorgerufenen "On- und Offsite"-Schäden ist in der o. a. Literatur nachzulesen.

Auf geneigten Ackerflächen kommt es zu Oberflächenabfluss, wenn die Niederschlagsmenge oder -intensität das Infiltrationsvermögen des Bodens übersteigt. Dies geschieht schnell bei sommerlichen Starkregen infolge eines Gewitters. Solche Regenereignisse werden als "Horton-Typ" be-

zeichnet und kommen ausschließlich bei wenigen Starkregen in den Sommermonaten vor (HAIDER 1994). Als problematischer Zeitraum ist die Zeit zwischen den Monaten Mai und September zu nennen. Zu Verschlämmungen kommt es, wenn die Bodenoberfläche mangels Bedeckung durch Pflanzen oder Pflanzenreste der Aufprallwirkung großer Regentropfen nicht mehr standhält, da die Bodenaggregate infolge des Aufpralles zerstört wurden (RICHTER 1998). Ist die Bodenoberfläche schon verschlämmt, dann kann es nach nur < 1 mm Niederschlag zu Oberflächenabfluss und Bodenabtrag kommen. Weitaus häufiger sind Niederschläge vom "Dunne-Typ" (DUNNE 1978) zu verzeichnen, die bei geringerer Intensität auf einen wassergesättigten Boden treffen, der keine weitere Infiltration zulässt. Insbesondere im Winterhalbjahr, zwischen Oktober und April, ist mit wassergesättigten Oberböden und damit verbundenem Oberflächenabfluss zu rechnen.

Böden mit geringen Ton-, aber hohen Schluff- und Feinsandgehalten haben ein erhöhtes Verschlämmungsrisiko (EVERDING et al. 1994; FOHRER 1995). Neuere Studien zeigen aber, dass der eigentliche Tongehalt bei jeweiligem Feuchtegrad im Oberboden eine wesentliche Rolle für die Strukturstabilität solcher Böden spielt (LEVY et al. 2001). Je nach Tongehalt und Feuchtegrad sind sie daher genauso verschlammungsanfällig wie z. B. Schluffböden.

Bodenabträge zwischen 0 - 170 t/ha/a in Deutschland können die Folge von Oberflächenabfluss sein, wobei diese Mengen im Extremfall auf ein singuläres Ereignis zurück zu führen sind. MÜLLER u. LÜTKE ENTRUP (2001) erfassten Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf Großparzellen in NRW unter natürlichen Niederschlagsbedingungen und konnten bei Einzelereignissen 1/3 des gefallenen Niederschlages als Oberflächenabfluss registrieren. Bodenabträge sind bis zu 26 t/ha berechnet worden.

Mit dem Oberflächenabfluss und Bodenabtrag einher gehen PSM- und Nährstoffausträge. Einige Autoren (AUERSWALD und HAIDER 1992, LANG u. HURLE 1997; HAIDER 1994) gehen davon aus, dass Herbizidwirkstoffe vor allem mit dem Oberflächenabfluss in die Gewässer gelangen. Zu diesem Ergebnis kommen auch SCHUELEIN et al. (1996). Viele Autoren beziffern den Anteil der applizierten Wirkstoffmenge im Oberflächenabfluss von 0,2 bis ca. 2 % (NG u. GLEGG 1997; FRICK et al. 2000; Klein et al. 2001), wobei Spitzenwerte von über 5 % der applizierten Menge (ROSNER u. KLIK 2001; KLIK et al. 2001) in Abhängigkeit des Zeitintervalls zwischen Applikationstermin und Niederschlagsereignis errechnet wurden. Andere Autoren berechneten noch weit höhere Mengen wie z. B. KORSAETH et al. (1997) und REDDY et al. (2001).

Je nach Abflussereignis konnten maximale Konzentrationen einzelner Wirkstoffe von 1 µg/l bis weit über 50 µg/l auftreten. Zu ähnlich hohen Wirkstoffkonzentrationen bei Feldversuchen unter natürlichen Bedingungen in NRW kommt HAIDER (1997). Auch KLEIN et al. (2001) registrierten

Konzentrationen einzelner Wirkstoffe bei Feldberegnungsversuchen in NRW von knapp unter 400 µg/l. Noch höhere Konzentrationen erhielten KÖRDEL u. KLÖPPEL (1997) bei 40 minütigen Feldberegnungsversuchen in Schlepperfahrspuren. Sie maßen über 1000 µg/l Isoproturon u. Dichlorprop-p im Oberflächenabfluss zu Beginn der Beregnung. Im Verlauf der Beregnung gingen die Wirkstoffkonzentrationen bis auf 100 µg/l zurück. Einige der wissenschaftlichen Untersuchungen, die eine Bilanzierung der diffusen Eintragspfade vornahmen, beziehen sich auf Wirkstoffkonzentrationen in wässriger Phase. Sorptiv an Bodenkolloide gebundene Wirkstoffe sind meist nicht mit erfasst worden, so dass hierfür keine nennenswerten Daten zur Verfügung stehen. In den meisten Untersuchungen werden aber die sedimentgebundenen Austräge im Oberflächenabfluss mit erfasst.

In den Runoff-Versuchen von LANG u. HURLE (1997) unter natürlichen Niederschlagsbedingungen lagen die sedimentgebundenen PSM-Austräge, mit einer Ausnahme (Pendimethalin), gegenüber denen im Runoff-Wasser deutlich niedriger. Demgegenüber waren die Konzentrationen einzelner Wirkstoffe im Abflusssediment, je nach Entfernung von der Applikationsfläche, mit bis zu 2740 µg/kg erheblich höher als die Werte im Runoff-Wasser, welche mit maximal 28,7 µg/l gemessen wurden. Die Wirkstoffanteile im Runoff-Sediment in Bezug zur gesamten PSM-Fracht schwankten je nach Sorptionseigenschaften zwischen 0 % (Isoproturon) und 100 % (Pendimethalin). Bei Regensimulationsversuchen von HAIDER u. AUERSWALD (1997) lagen die sedimentgebundenen PSM-Konzentrationen zwischen 10 und 20 mg/kg und sanken gegen Ende der Regenphase auf 1 - 2 mg/kg ab. Die PSM-Austräge mit dem Sediment wurden nicht angegeben.

HUBER (1998) geht in seiner Arbeit zur Modellierung der diffusen Einträge von PSM in Oberflächengewässern davon aus, dass fast 80 % der Herbizidwirkstoffe K_{oc} -Werte von < 2000 aufweisen und somit der sedimentgebundene Austrag über den Pfad des Oberflächenabflusses nur in Ausnahmefällen von größerer Bedeutung ist. Er bezieht sich auch auf BURGOA & WAUCHOPE (1995), die den Bodenabtrag bei Starkregenereignissen im Vergleich zum Volumen des gemessenen Oberflächenabflusses als gering erachten. Ausnahmen bilden Niederschlagsereignisse mit sehr hohen Intensitäten (> 60 mm/h).

Ob ein nennenswerter diffuser PSM-Eintrag in Gewässer durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag tatsächlich stattfindet, hängt sehr stark ab von den erosionsfördernden Faktoren, den Sorptionseigenschaften der Herbizide (s. Kap. 3.1.1), der applizierten Herbizidmenge und dem Zeitpunkt zwischen Niederschlags- und Abflussereignis (LUA-NRW 1999). Diese Einflussfaktoren sind sehr stark flächenbezogen und somit schwer für ein gesamtes Einzugsgebiet zu quantifizieren.

Das gilt auch für den diffusen Eintrag von Stickstoff (N) und Phosphor (P) in Oberflächengewässer. Der größte Teil der N-Verbindungen im Oberflächenabfluss wird gelöst im Abflusswasser ausgetragen und gelangt als Nitrat-N ($\text{NO}_3\text{-N}$) in die Gewässer, während nur ein geringer Teil als sedimentgebundener Stickstoff eingetragen wird. Ausgetragene P-Verbindungen hingegen gelangen stark kolloidal mit dem abgetragenen Boden in die Gewässer (RÖMER 1997). Eine Ausnahme bilden die Untersuchungen von REDDY et al. (2001), die einen prozentual höheren P-Austrag in gelöster Form registrieren, und in denen der sedimentgebundene N-Austrag höher war als der gelöste Austrag.

BACH (1996) gibt Spannbreiten der diffusen N- und P-Einträge in die Einzugsgebiete großer deutscher Fließgewässer an. Sie reichen von 3 - 40 kg N (anorg.)/ha/a und 0 - 1 kg P (gesamt)/ha/a. Zu ähnlichen Werten, bis auf eine Ausnahme, kommen POMMER et al. (2002) für Gewässereinzugsgebiete in Bayern. JORDAN u. MÜLLER (1997) errechneten an Erosionsmessparzellen während eines Boden-Dauerbeobachtungsprogrammes in bayerischen Gewässereinzugsgebieten die jährlichen Nährstoffausträge von ackerbaulich genutzten Flächen. Die mittleren N-Austräge lagen zwischen 0 und 13 kg/ha/a, die mittleren P-Austräge bei 0 - 2 kg/ha/a. Hohe P-Austräge waren immer mit sehr hohen Bodenabträgen verbunden. Dies verstärkt die Bedeutung der diffusen P-Einträge in Oberflächengewässer durch Wassererosion.

3.1.1.2 Bedeutung des Zwischenabflusses

Zur Bedeutung des Zwischenabflusses ("Interflow") als diffuser Eintragspfad der o. a. Stoffe gibt es nur wenige quantitative Ergebnisse in Deutschland. Der als Zwischenabfluss bezeichnete Teil des verbleibenden Niederschlages wird auf geneigten Ackerflächen in der ungesättigten Bodenzone lateral hangabwärts bewegt (HAIDER 1994). WERNER et al. (1994) bezeichnen ihn auch als hypodermischen Abfluss, welcher das Ergebnis der Differenz zwischen Infiltration und Abfluss im Boden zum Grundwasser ist. Diese unterirdische Abflusskomponente hängt stark von der Bodenmatrix ab. Sie setzt ein, wenn die Wasserleitfähigkeit im Boden abnimmt (BOTSCHEK et al. 1996). Die Ursachen liegen in einer Änderung der Textur von Bodenhorizonten, wobei das Sickerwasser beim Perkolieren durch die oberen Bodenhorizonte auf einen wasserundurchlässigen Horizont trifft und dadurch in einen Hang abwärts gerichteten lateralen Abfluss übergeht. Nach Berechnungen von ERPENBECK (1987) und FABIS et al. (1994) können auf diesem Wege größere Mengen an PSM und Nährstoffen in die Vorfluter gelangen. Genauere Angaben von Stoffmengen über diesen Eintragspfad fehlen aber.

In Zusammenhang mit dem Zwischenabfluss als unterirdische Abflusskomponente ist die schnelle Wasserbewegung über bevorzugte Fließwege zu nennen. Dieser sogenannte "Preferential flow" findet fast ausschließlich in biogenen und geogenen Makroporen statt (BEVEN u. GERMANN 1982; KUNG 1990; OGDEN et al. 1992; DE MOL 1996; FLÜHLER et al. 2001; MOHANTY et al. 2001). Das Schema eines Bodenblocks in Abbildung 7 im Anhang verdeutlicht die Bahnen für Makroporenfluss bei Infiltration. Die Größe der Makroporen (Porenradius) im Bodenprofil schwankt zwischen 30 µm und 10 mm (BEVEN u. GERMANN 1982), während ihr Gesamtanteil am Bodenvolumen meist zwischen 1 - 8 % liegt (OGDEN 1992).

In nicht quellenden Böden fördert eine höhere Bodenfeuchte den Makroporenfluss, da der Potentialgradient zwischen Niederschlag und Bodenwasser in den Poren dann am geringsten ist. In quellfähigen Tonböden entstehen nach Austrocknung Schrumpfrisse, die bei einsetzendem Niederschlag schnell als bevorzugte Fließwege in Frage kommen (LAMMEL 1990). Aufgrund einer hohen Bindigkeit der Tonböden bleiben biogene Makroporen (Wurm- und Wurzelröhren) sehr lange stabil (BECHER 1985). Sie sind jedoch nur hydraulisch wirksam, bei Porenkontinuität bis an die Bodenoberfläche (BEISECKER 1994; NORDMEYER u. ADERHOLD 1995; LE BAYON u. BINET 1999).

Es ist schon länger bekannt, dass dabei Bodenmaterial, PSM und Nährstoffe in kurzer Zeit bis ins Grundwasser verlagert werden können (BECHER 1985; JURY u. FLÜHLER 1990; LAMMEL 1990; BOUMA 1991; EDWARDS et al. 1992; GEISELHART 1994; NORDMEYER u. ADERHOLD 1995; OLSON et al. 1997; STANGE et al. 1998; ABDANK et al. 1999). Eine Quantifizierung der Wasser- und Stoffströme ist nur in wenigen Versuchsreihen vorgenommen worden. Experimentelle Methoden wurden mit Hilfe von Farbtracern (Bromid) in Lysimetern oder mit Hilfe von Infiltrometern (DE MOL 1996) oder TDR-Sonden (MALICKI et al. 1992, 1996;) durchgeführt. In Feld- und Laborversuchen mit Regensimulation und Herbizidapplikationen sind häufig schon nach wenigen Minuten Makroporenflüsse mit zum Teil hohen Wirkstoffkonzentrationen (1 - 5 µg/ml) aufgetreten (NORDMEYER u. ADERHOLD 1995). Allerdings sind dort sehr hohe Aufwandmengen verwendet worden bei zeitlich schnell folgender Bewässerung. EDWARDS et al. (1992) kamen bei gleicher Versuchsmethodik zu ähnlichen Ergebnissen. OLSON et al. (1997) erhielten während ihrer Regensimulationsversuche Konzentrationswerte zwischen 0,5 - 14 µg/l. STEENHUIS et al. (1990) führten Lysimeterversuche unter natürlichen Bedingungen durch und registrierten herbizide Wirkstoffe mit Konzentrationen zwischen 0,1 - 0,4 µg/l. Gemessene Nährstoffkonzentrationen (NO₃-N) im Makroporenfluss lagen zwischen 1 - 20 mg/l. In einer vergleichenden Studie geben JURY u. FLÜHLER (1992) für verschieden texturierte Böden prozentuale Anteile von applizierten Wirkstoffen im Makroporenfluss an. Dabei war der Wirkstoffanteil im Makroporenfluss in den Sandböden am höchsten.

In den beschriebenen Arbeiten wurde auf die methodische Schwierigkeit bei der Erfassung des Abflusses über Makroporen hingewiesen. Die Bedeutung des Makroporenflusses für die schnelle Verlagerung von PSM und Nährstoffen wird als beachtlich eingestuft. Eine exakte Berechnung möglicher Stoffeinträge in die Oberflächengewässer auf diesem Pfad ist äußerst schwierig. Für Berechnungsmodelle ist das Problem der räumlichen Größenordnung eine Herausforderung. Anders als beim Oberflächenabfluss sind Feldversuche zur Erfassung von Zwischenabfluss und Makroporenfluss mit ihren sehr kleinen Ausschnitten einer Bodenmatrix in Bezug zur immensen Variabilität der nicht sicht- und messbaren Verlagerungs- und Abbauprozesse von Stoffen nur mit großer Einschränkung auf Räume im Hektarbereich übertragbar. Nach FLÜHLER et al. (2001) gilt es eine Verbindung zwischen den Prozessen des Makroporenflusses und seinen Auswirkungen herzustellen. Es reiche nicht, Dutzende von Proben aus Versuchen zu analysieren. Tausende Proben wären notwendig, um einer Quantifizierung dieses Eintragspfades gerecht zu werden. Hierzu müssten Verfahren mit geringerem Aufwand entwickelt werden, die auch eine Vergleichbarkeit mit z. B. aufwendigen Lysimeterversuchen zulassen (vgl. BISCHOFF et al. 1999). Zu ähnlichen Schlussfolgerungen gelangen auch MICHAELSEN u. REXILIUS (1995), für die eine Risikoabschätzung der Tiefenverlagerung von Stoffen nicht in Adsorptions- und Abbauvorgängen zu suchen ist, sondern in der Funktionalität verschiedener Bodenklassen- und -typen, welche in Zusammenhang mit den Stoffeigenschaften im Gesamtkontext zu sehen.

3.1.1.3 Bedeutung des Drainageabflusses

Dränagesysteme werden angewandt zur Regulierung des Wasserhaushaltes landwirtschaftlicher Flächen, die zur Vernässung durch hoch anstehendes Grund- und Stauwasser neigen. Eine solche Meliorationsmaßnahme führt zur verstärkten Nutzung der vorhandenen Flächen (LENNARTZ u. WIDMOSER 1994). Auf Ackerstandorten kann dies zur Verbesserung des Lufthaushaltes im Boden führen, was ein begünstigtes Pflanzenwachstum zur Folge hat. Die Entwässerung dränkter Ackerflächen erfolgt über die Vorfluter von Gewässereinzugsgebieten. In Deutschland werden etwa 2 Millionen Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche durch Dränung entwässert (LUA-NRW 1999). Die am häufigsten angewandte Dränmethode ist die Rohrdränung (KUNTZE u. BLANKENBURG 2000). Auf diesem Weg erhöht sich das Kontaminationspotential für Oberflächengewässer mit PSM und Nährstoffen aus der landwirtschaftlichen Produktion.

In der Literatur wird die Bedeutung des Drainageabflusses als diffuser Eintragspfad für Herbizide und Nährstoffe unterschiedlich hoch eingestuft. Im Bereich von Gewässereinzugsgebieten zeigt dieser Belastungspfad große Unterschiede im Stoffeintrag. Auch das Sorptionsverhalten der herbiziden Wirkstoffe spielt dabei eine wesentliche Rolle (HUBER 1998; LUA 1999; UBA 2000). Eine

Quantifizierung der Einträge in die Oberflächengewässer erfolgt wie beim Oberflächenabfluss nach Modellierung und Schätzung durch Interpolations- und Extrapolationsmethodik (vgl. Kap. 3.1.1). Berechnete Herbizideinträge mit dem Dränagewasser betrugen meist 0 - 1 % der applizierten Wirkstoffmenge (HURLE et al. 1993; TRAUB-EBERHARD et al. 1993; KÖRDEL et al. 1997; LUA 1999; JAYNES et al. 2001). SOUTHWICK et al. (1990), KLADIVKO et al. (1991) und LENNARTZ u. WIDMOSER (1994) errechneten bis zu 5 % der applizierten Menge an Herbiziden im Dränagewasser. Die durchschnittlichen Konzentrationen liegen im Bereich zwischen 0 - 100 µg/l (LUA 1999). Spitzenwerte bis über 300 µg/l können aber ebenfalls auftreten (KÖRDEL et al. 1997). Die gemessenen Konzentrationen im Dränagewasser sind insgesamt gesehen niedriger als die im Oberflächenabfluss, da sie während der Bodenpassage den Sorptions- und Abbauvorgängen unterliegen. Am häufigsten und mit meist geringen Konzentrationen werden die schwach sorbierten Stoffe gefunden. Mäßig stark sorbierte Stoffe sind weniger verlagerbar, da sie eine höhere Persistenz aufweisen. Sie treten aber oft in höheren Konzentration auf. KÖRDEL et al. (1997) fanden heraus, dass nach Herbstapplikation auf dränierten Ackerflächen in Deutschland die Auswaschungsgefahr von Herbiziden höher ist. Sie führen das auf die feuchtere Witterung im Herbst sowie den verlangsamten Wirkstoffabbau aufgrund der niedrigen Bodentemperaturen zurück.

Eine hohe Bedeutung für den Eintrag von Herbiziden in Dränagesysteme kommt dem Makroporenfluss zu (s. Kap. 3.1.1.2). Auf Standorten mit verstärktem Makroporenfluss kann es nach Niederschlagsereignissen zu einer raschen Tiefenverlagerung von PSM kommen. So wird in Verbindung mit Starkniederschlägen eine hohe Wirkstoffkonzentration im Dränagewasser schon kurz nach der Applikation, insbesondere bei den stark sorbierten Stoffen, als deutlicher Hinweis für eine Verlagerung über "preferential flow" gedeutet (BEISECKER 1994; LENNARTZ u. WIDMOSER 1994; KÖRDEL et al. 1997; KANWAR u. BAKHSH 2001; JAYNES et al. 2001).

Das Gleiche gilt für Nährstoffe, die über diesen Pfad in die Oberflächengewässer gelangen. Vor allem die leicht löslichen Stickstoff-Mengen, die hierbei als Nitrat- ($\text{NO}_3\text{-N}$) oder Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) in die Oberflächengewässer gelangen, sind in der Regel höher als im Oberflächen- oder Zwischenabfluss (LAMMEL 1990). Der Gewässereintrag von Phosphor (P) über Dränagesysteme ist gegenüber N-Einträgen geringer, weil P-Einträge stärker sedimentgebunden sind und hauptsächlich mit dem Oberflächenabfluss in die Vorfluter gelangen (LAMMEL 1990; WERNER et al. 1994; BACH et al. 1996). LAMMEL (1990) berechnete N- und P-Austräge über dränierte Flächen für kleine Gewässereinzugsgebiete im nördlichen Harzvorland. Er kam bei Konzentrationen zwischen 0 - 41 mg/l im Dränageabfluss zu $\text{NO}_3\text{-N}$ -Austrägen in Höhe von 4 bis über 40 kg/ha Ackerfläche. Othophosphat-Austräge ($\text{PO}_4\text{-P}$) bilanzierte er in Höhe von 0 - 0,5 kg/ha, bei Konzentrationen zwischen 0 - 0,1 mg/l. Nach sommerlichen Starkregen mit hohen Dränageabflüssen berechnete er für einzelne Ackerschläge 20 % des gesamten jährlichen N- und P-Austrages, was er

auf verstärkten Makroporenfluss zurückführte. HAIDER (1997) bilanzierte ebenfalls N- und P-Austräge über Dränagen für eine ackerbaulich genutzte Fläche im Stevereinzugsbereich (Nordrhein-Westfalen). Er berechnete niedrigere $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten (10 - 15 kg/ha) als LAMMEL (1990) bei ähnlich hohen Konzentrationen, und gleich hohe P-Austräge bei höheren Konzentrationen (0,2 - 0,4 mg/l) an $\text{PO}_4\text{-P}$.

Eine hohe Signifikanz zwischen Makroporenfluss und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Mengen im Dränagewasser messen BAKHSH et al. (2001) in ihren Feldversuchen unter natürlichen Niederschlagsbedingungen. Sie verglichen natürliche Dränageabflüsse mit simulierten Makroporenflüssen und errechneten einen ca. 23 % höheren N-Verlust auf dränierten Ackerflächen durch "preferential flow". Einige Autoren wie BENGTON et al. (1988), SOUTHWICK et al. (1990, 1997) und WILLIS et al. (1997) verweisen auf die verstärkte Infiltration auf dränierten Ackerflächen und der damit verbundenen Minderung des Oberflächenabflusses und Bodenabtrages. Das Problem des diffusen Herbizid- und Nährstoffeintrages in die Gewässer über Dränagen verringert sich damit nur für die stärker sorbierbaren Stoffe, während leicht lösliche Verbindungen verstärkt über den Pfad "Dränagewasser" ausgetragen werden.

Es bleibt festzuhalten, dass neben den Eintragspfaden Oberflächenabfluss und Bodenabtrag der diffuse PSM- und Nährstoffeintrag über dränierte Ackerflächen in Verbindung mit präferentiellen Fließwegen (Makroporenfluss) ein hohes Potential besitzt (KÖRDEL u. KLÖPPEL 1997). Dieses komplexe Geschehen in der dreidimensionalen Bodenmatrix ist nach MICHAELSEN u. REXILIUS (1995) nur begrenzt in Feldversuchen zu deuten und zu quantifizieren.

3.2 Verfahren der Bodenbearbeitung als Minderungsstrategie gegen Boden- und Stoffausträge erosionsgefährdeter Ackerflächen

Für die landwirtschaftliche Produktion im Bereich des Ackerbaues hat die Bodenbearbeitung bis heute eine zentrale Bedeutung. Neben acker- und pflanzenbaulichen Aspekten kommt der Bearbeitung des Bodens in zunehmendem Maße eine umweltschonende Aufgabe im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft zu (LÜTKE ENTRUP 2000). Eine bodenschonende Bearbeitung von Ackerflächen ist mit einer Reduzierung der Eingriffsintensität in die Bodenmatrix verbunden. Sie verhindert das vollständige Einarbeiten von Pflanzenresten bestimmter Ackerkulturen. Der Verbleib eines Großteils von Pflanzenresten auf der Bodenoberfläche erhöht die Bodenbedeckung sowie die Infiltrationsbedingungen für Niederschlagswasser. Eine reduzierte Bodenbearbeitung schützt damit die Ackerfläche vor möglicher Erosion und Bodenabtrag (BMVEL 2001).

Diffuse Herbizid- und Nährstoffausträge von ackerbaulich genutzten Flächen gelangen in erster Linie über die Pfade Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in die Oberflächengewässer (s. Kap. 3.1.1.1). Als geeignete Strategie zur wirkungsvollen Minderung solcher Austräge werden ackerbauliche Maßnahmen wie die der konservierenden Bodenbearbeitung empfohlen (MANNE-RING u. MEYER 1987; SOMMER et al. 1989; FAWCETT et al. 1994; TEBRÜGGE 1994; ZHAO 1994; HOEGEN et al. 1995; FRIELINGHAUS et al. 1997; SCHMIDT et al. 1997; ECAF u. GKB 1999; SOMMER 1999; WÜRFEL 1999; BUCHNER 2000; ESTLER et al. 2000; LÜTKE ENTRUP 2000; NITZSCHE et al. 2000; SOMMER u. BRUNOTTE; MÜLLER u. LÜTKE ENTRUP 2001; PLOEG van der u. SCHWEIGERT 2001b; RACZKOWSKI et al. 2001; REDDY et al. 2001; REJMAN et al. 2001; LANDESANSTALT FÜR PFLANZENBAU BADEN WÜRTTEMBERG 2002). Aufgrund des flächenbezogenen Ansatzes der reduzierten Bodenbearbeitung wird eine deutliche Verringerung des Eintrages von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen in Oberflächengewässer erwartet.

3.2.1 Konservierende Bodenbearbeitung und das Direktsaatverfahren

Der entscheidende Unterschied zwischen Bodenbearbeitungssystemen liegt in der Intensität der Bodenlockerung und -durchmischung. In Deutschland werden im wesentlichen 3 Bearbeitungsvarianten unterschieden (LINKE 1998):

- a) 'Konventionelle Bodenbearbeitung'**
- b) 'Konservierende Bodenbearbeitung'**
- c) 'Direktsaat'**

Zu a) Zum Prinzip der konventionellen Bodenbearbeitung gehört die Grundbodenlockerung der Hauptdurchwurzelungszone (Krume) mit Hilfe des Scharpfluges. Die Bearbeitungstiefe beträgt je nach Standort zwischen 20 und 35 cm. Bei dieser wendenden Bearbeitung werden Erdbalken auf gesamter Krumentiefe herausgeschnitten und über das Streichblech des Pfluges mit etwa 120 - 140° gewendet. Sie werden seitlich in die vom Pflug gezogenen Furche wieder abgelegt (ESTLER et al. 2000).

Aufgrund der Pflugarbeit wird die Bodenstruktur gelockert und eine Verbesserung des Lufthaushaltes im Boden erreicht. Ernterückstände, organische Dünger und in der Krume keimende Konkurrenzpflanzen können bis tief in den Boden eingebracht werden, um einerseits eine bessere Nährstoffversorgung der Nutzpflanzen zu gewährleisten und andererseits Ackerkräuter, Gräser sowie Auswüchse von Vorfrüchten mechanisch zu beseitigen ("phytosanitärer Effekt"). Nachteilig für einen Ackerstandort unter Pflug ist die Bildung einer Pflugsohle bedingt durch den Traktorantrieb im

Bereich der Pflugfurche. Die Pflugsohle ist verdichtet und stört den Wasserhaushalt sowie die Durchwurzelung des Bodens. Infolge dessen sinkt die Infiltrationsrate im Boden, die ausreichende Versorgung der Nutzpflanzen mit Nährstoffen ist herabgesetzt. Weiterhin wird durch Pflugarbeit die Aggregatstabilität des Oberbodens verringert, die eine erosionshemmende Wirkung hat. Zudem wird durch das tiefe Einbringen von Pflanzenresten die Bodenoberfläche den Witterungseinflüssen schutzlos ausgesetzt, mit der Folge eines verstärkten Oberflächenabflusses und Bodenabtrages (ESTLER et al. 2000).

Zu b) Beim Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung wird auf die wendende Pflugarbeit verzichtet. Die Krume wird durch Grubbergeräte (ESTLER et al. 1995) nur flach aufgearbeitet. Pflanzenreste, Ackerkräuter und Gräser werden nur in die obere Krume eingemischt. Der Vorteil im Hinblick auf die Minderung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag liegt darin, dass ein Teil der Pflanzenreste an der Oberfläche verbleibt und eine wirksame Schutzdecke gegen erosive Niederschläge bildet (SOMMER 1999). Es entsteht ein kontinuierlicher Übergang zwischen Krume und Unterboden ohne eine verdichtete Sohle. Die verminderte Eingriffsintensität in den Oberboden erhöht die Regenwurmaktivität, die eine Bodenlockerung auf natürliche Weise hervorruft und die Bodenstruktur verbessert. Viele Regenwurmgänge durchziehen den Boden und erhöhen die Infiltration von Niederschlagswasser, so dass Oberflächenabfluss und Bodenabtrag reduziert werden können (KRÜCK et al. 2001). Nach FAWCETT et al. (1994) spricht man von konservierender Bodenbearbeitung, wenn nach der Aussaat einer Kultur noch mindestens 30 % der Bodenoberfläche mit Pflanzenresten der Vorfrucht oder Zwischenfrucht bedeckt sind. Im deutschen Sprachraum spielt die Bodenbedeckung als Einteilungskriterium keine Rolle. Hier wird von konservierender Bodenbearbeitung bei Pflugverzicht und einer generellen Reduzierung der Bearbeitungsintensität gesprochen (SOMMER 1989). Häufig wird der Begriff der konservierenden Bodenbearbeitung insbesondere beim Anbau von Reihenkulturen (Mais, Zuckerrüben) durch den Begriff der "Mulchsaat" ersetzt, da der Verbleib von Pflanzenresten eine schützende Mulchschicht auf der Bodenoberfläche bildet.

Zu c) Das Direktsaatverfahren verzichtet auf jegliche Bearbeitungsmaßnahmen. LINKE (1998, S. 18) definiert das Direktsaatverfahren als "...ein Ackerbausystem, bei dem keine Bodenbearbeitung durchgeführt wird und die Ablage des Saatgutes in den unbearbeiteten Boden erfolgt. Bei der Saat wird der Boden durch die einzelnen Säwerkzeuge jeweils nicht tiefer und breiter als die Saattiefe gelockert."

Die natürliche Bodenstruktur bleibt auf diese Weise erhalten. Neben den wie bei der "Mulchsaat" genannten Vorteilen hinsichtlich der Schutzwirkung gegen erosive Pro-

zesse wird eine bessere Befahrbarkeit der Ackerfläche, hohe Flächenleistung, geringer Arbeitszeitbedarf, Kosten und Energieeinsparungen ermöglicht (TEBRÜGGE et al. 1994; LÜTKE ENTRUP et al. 2000b). Direktsaatverfahren haben jedoch besondere Ansprüche an die Sätechnik, die mit speziellen Maschinen ausgeführt werden muss, wodurch eine bei der Mulchsaat noch verwendbare konventionelle Technik untauglich wird. Ebenso ist, je nach Fruchtfolgesystem, eine verstärkte "Unkrautkontrolle" notwendig, die oft eine Anwendung von Totalherbiziden unausweichlich macht, um Mindererträge zu verhindern. In Getreidefruchtfolgen mit hohen Erträgen wirken sich die großen Mengen an Stroh nach der Ernte sehr nachteilig auf die nachfolgende Einsaat aus (LINKE 1998). Hohe Anforderungen an die Sätechnik und somit des Betriebsmanagements erschweren die Umstellung auf diese Anbaumethode.

Hinsichtlich der Minderung von PSM- und Nährstoffeinträgen in die Oberflächengewässer durch pfluglose Bestelltechniken sind einige zum Teil langjährige Feldversuchsreihen durchgeführt worden. Einige Ergebnisse zum Stoffaustrag von ackerbaulich genutzten Flächen bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten verdeutlichen die Wirksamkeit solcher Anbaumethoden, insbesondere im Zusammenhang mit Oberflächenabfluss und Bodenabtrag.

In den meisten Untersuchungen konnte gegenüber den gepflügten Ackerflächen eine Reduzierung des Bodenabtrages, Herbizid- und Nährstoffaustrages auf Flächen mit konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat von 60 bis über 90 % festgestellt werden (GOLD u. LOUDON 1989; SCHMIDT et al. 1997; FRIELINGHAUS u. WINNIGE 2000; NITZSCHE et al. 2000; BMVEL 2001; MÜLLER u. LÜTKE ENTRUP 2001; REDDY et al. 2001; WÜRFEL u. UNTERSEHER 2002). In diesem Zusammenhang wird immer wieder die Bodenbedeckung genannt, die einen entscheidenden Einfluss auf das Abflussgeschehen an der Bodenoberfläche hat. Schon ab ca. 30 % Bodenbedeckungsgrad ist ein Schutz vor Wassererosion gegeben, der ab ca. 50 % ausreicht, um Boden- und Stoffausträge deutlich zu verringern (HOEGEN et al. 1995; FRIELINGHAUS et al. 1997; BRUNOTTE et al. 1999; BMVEL 2001). KLIK et al. (2001) sowie ROSNER u. KLIK (2001) maßen auf Versuchspartzellen im Direktsaatverfahren gegenüber Partzellen mit Mulchsaat etwas höhere Herbizid- und Nährstoffausträge. Bei geringerem Gesamtabfluss und Bodenabtrag der Partzellen unter Direktsaat führten sie das auf die höher gemessenen Stoffkonzentrationen zurück. Versuchsergebnisse von SAUER u. DANIEL (1987) ergaben erhöhte PSM-Konzentrationen im Abflusswasser von Mulchpartzellen gegenüber unbewachsenen (Schwarzbrache) Partzellen. Sie vermuten, dass die Wirkstoffe von den Pflanzenoberflächen leichter abgewaschen worden sind. Allerdings beziehen sich die Ergebnisse auf Regensimulationsversuche mit sehr hoher Intensität (> 60 mm/h). Auch FAWCETT et al. (1994) erhielten in ihrer rückblickenden Studie über Runoff-Versuche Ergebnisse, welche auf dieses Phänomen bei sehr hohen Niederschlagsintensitäten

hindeuten. Bei simulierten Niederschlägen $< 60 \text{ mm/h}$ maßen NITZSCHE et al. (2000) trotz erhöhter Konzentrationen im Abfluss von Parzellen unter Mulch- und Direktsaat keine erhöhten Nährstoffausträge, was gegenüber den gepflügten Parzellen am deutlich reduzierten Gesamtabfluss ($> 70\text{--}92\%$) lag. KORSAETH et al. (1997) untersuchten die laterale Verlagerung des Herbizids Isoproturon im Oberflächenabfluss und Abtragssediment bei unterschiedlicher Bodenbedeckung. Sie behaupten, dass es auf die Art der Bodenbedeckung, wie zum Beispiel Stroh oder Rapsblätter ankommt, um einen effektiven Schutz der gemulchten Ackerflächen zu erhalten. Der Bodenbedeckungsgrad allein wäre kein Maßstab für die Wirksamkeit von konservierender Bodenbearbeitung.

Diese Ergebnisse scheinen jedoch nicht im Widerspruch zu der insgesamt deutlichen Minderung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf Ackerflächen mit konservierender Bodenbearbeitung oder Direktsaat zu stehen. Dagegen ist die Bedeutung pflugloser Bestellverfahren hinsichtlich des Austrages von Herbiziden und Nährstoffen über die Pfade des Makroporenflusses und Dränabflusses differenzierter zu sehen. Vor dem Hintergrund der skizzierten Prozesse und Untersuchungen der in den Kapiteln 3.1.1.2 sowie 3.1.1.3 beschriebenen Eintragspfade, scheint die Vermutung eines beschleunigten Austrages von PSM und Nährstoffen auf diesen Ackerflächen nahe zu liegen. Vom weitestgehend unbekannten Pfad des Zwischenabflusses abgesehen, sind seit den späten 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts einige Feldversuche zur Verlagerung von Herbiziden und Nährstoffen auf Ackerflächen mit pflugloser Bestelltechnik durchgeführt worden. Dabei konnte in den Arbeiten von SAUER u. DANIEL (1987), GOLD u. LOUDON (1989), ANDREINI u. STEENHUIS (1990); STEENHUIS et al. (1990); EDWARDS et al. (1992); BEISECKER (1994); FAWCETT et al. (1994); KANWAR u. BAKHSH (2001) die Bedeutung solcher Bearbeitungssysteme für den Stoffaustrag über Makroporenfluss und Dränagen teilweise quantitativ belegt werden. Über die Herbiziddynamik in differenziert bearbeiteten Böden kamen DÜRING u. HUMMEL (1995) zu keinem nennenswerten Unterschied in den Bearbeitungsvarianten. DJODJIC et al. (2001) erhielten kaum signifikante Unterschiede im P-Austrag über präferentielle Fließwege und Dränwässer zwischen gepflügten und pfluglosen Versuchsfeldern.

Geogene und biogene Makroporen auf Ackerflächen können durch die Aufprallwirkung ("splash") von Regentropfen am Porenrand schnell mit mechanisch gelöstem Abflusssediment verstopft werden. Infolge dessen können Makroporenflüsse phasenweise oder für die gesamte Dauer des Niederschlagsereignisses unterbrochen werden (TERRY 1998; LE BAYON u. BINET 1999). Während dieser Phasen ist der Stofftransport gestoppt. Er kann aber durch ein erneutes Ereignis in Gang gesetzt werden. Nach solchen Vorgängen ist es denkbar, dass über das eingetragene Sediment in die Makroporen auch stärker sorbierte PSM und Nährstoffe relativ schnell verlagert werden. Generell haben aber schwach sorbierte Stoffe ein höheres Austragspotential über Makroporen und Dränagen als die stark sorbierten (GEISELHART 1994; HAIDER 1994; KLIMSA 1996). Faktoren, die

den Austrag von Stoffen über diese Pfade beeinflussen, sind in ihrer Wirkungsweise sehr variabel. Wie beim Oberflächenabfluss ist der Zeitpunkt zwischen Stoffapplikation und Niederschlag für die Höhe der Austräge entscheidend. Darüber hinaus müssen beim Makroporenfluss die Eigenschaften (Sorption, Persistenz) von Herbiziden in Zusammenhang mit den Bedingungen (Temperatur, Humusgehalt, biologische Aktivität) in den Makroporen gesehen werden. Zum Beispiel wird die Abbaugeschwindigkeit von Herbiziden in Makroporen infolge einer starken mikrobiellen Tätigkeit gegenüber der der Bodenmatrix erhöht (BUNDT et al. 2001). Dementsprechend sinkt die Möglichkeit der konzentrierten Verlagerung von Herbiziden über Makroporen.

Die angeführten Ergebnisse zeigen, dass das Verlagerungsverhalten von Herbiziden und Nährstoffen nicht allein vom Niederschlag und der verwendeten Bestelltechnik abhängt, vielmehr besteht eine Wechselwirkung zwischen den Stoffeigenschaften und den Mobilitätsfaktoren. Das verdeutlicht die Schwierigkeit einer Quantifizierung von Stoffausträgen über diese Pfade (FLÜHLER et al. 2001). Grundsätzlich besteht ein schwer quantifizierbares diffuses Austragspotential von Herbiziden und Nährstoffen über präferenzielle Fließwege bei pfluglosen Bestelltechniken. Es überwiegt jedoch die eindeutig nachgewiesene Austragsminderung über den Pfad des Oberflächenabflusses und Bodenabtrages.

4 Untersuchungsgebiet und erosionsrelevante Faktoren

Zur Standortcharakteristik der Feldversuchsfläche gehört die Genese und Entwicklung des Untersuchungsgebietes bzw. des Landschaftsraumes, in dem sich die Fläche befindet. Hierzu zählt auch eine Betrachtung der gebietsrelevanten Faktoren der Wassererosion. Die Versuchsfläche sollte einem ackerbaulich genutzten Hangstandort in einer durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag gefährdeten Agrarlandschaft Nordrhein-Westfalens entsprechen.

4.1 Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

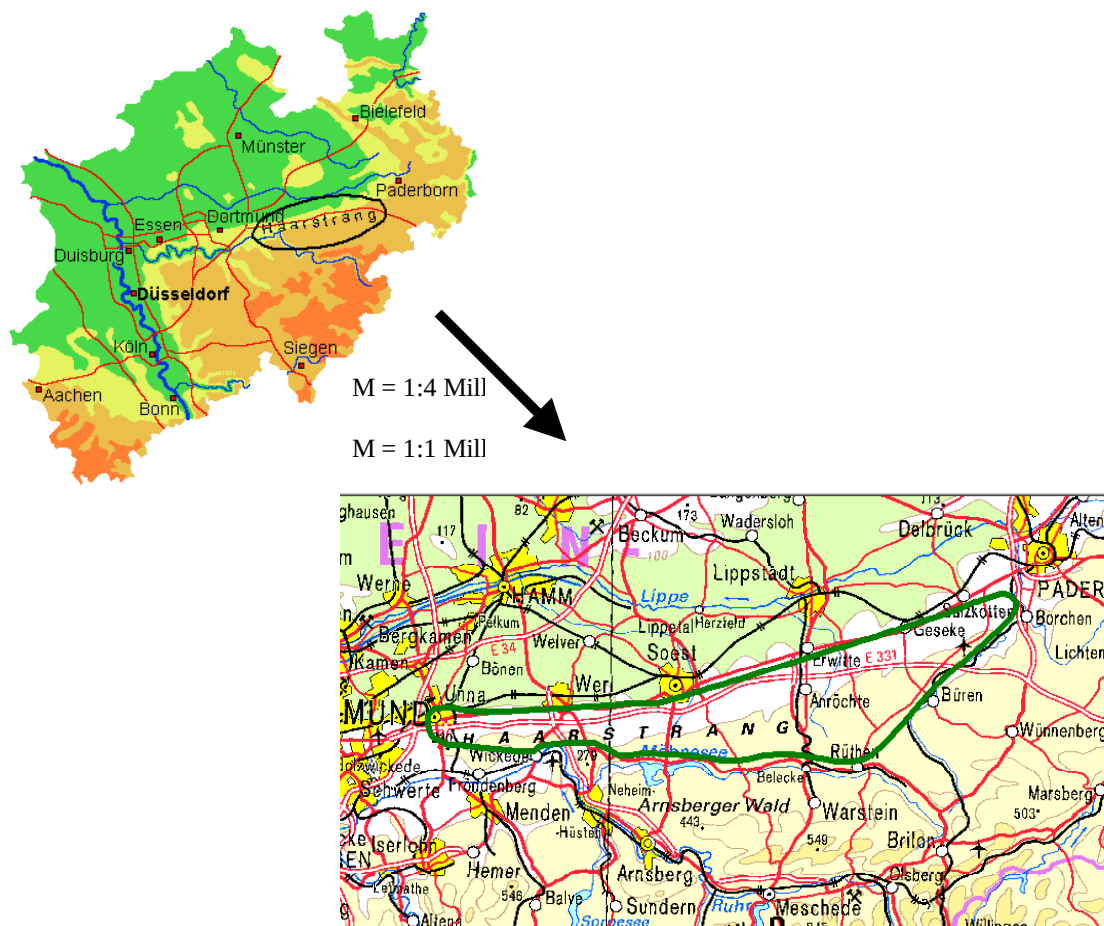


Abb. 1: Übersichtskarte (verkl.) und Kartenausschnitt (vergr.) von Nordrhein-Westfalen mit Untersuchungsgebiet am Haarstrang

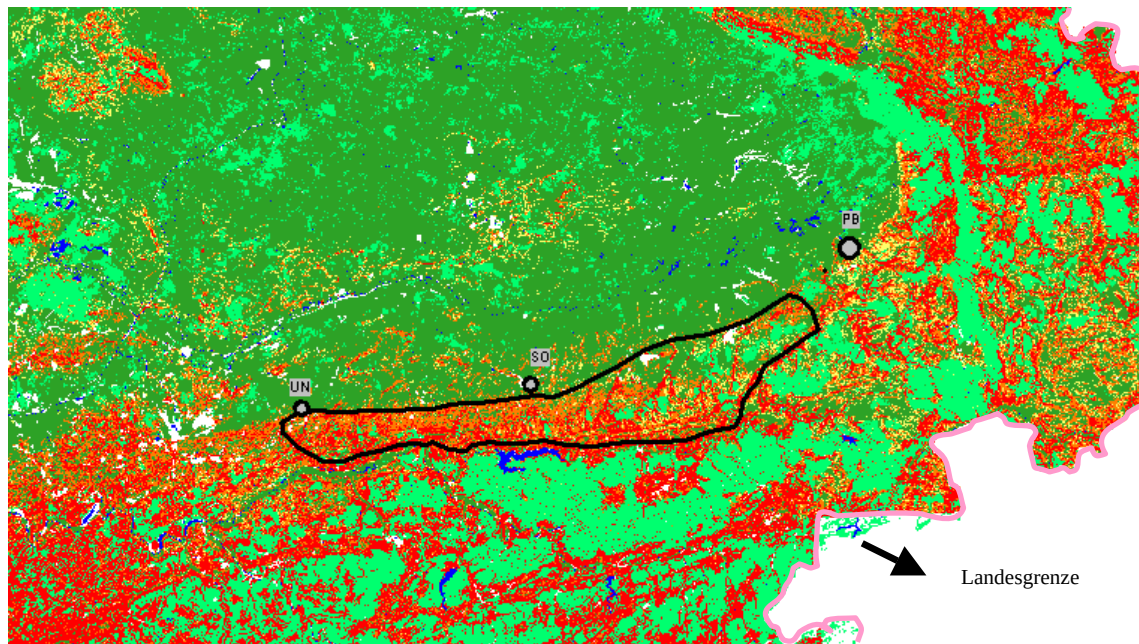
Quelle: LANDESMESSTUNGSAMT NRW (2002), überarbeitet

Die Wahl für das Untersuchungsgebiet in NRW fiel auf den östlichen Teil des Haarstranges. Der Haarstrang selbst ist ein von West nach Ost verlaufender Höhenzug (vgl. Abb. 1). Von Unna im

Westen erstreckt er sich über 65 km bis zum Almetal im Osten. Innerhalb dieser Strecke steigt er von 180 m ü. NN im Westen auf 390 m ü. NN im Osten an (FISCHBACH 1983). Im Norden liegt die westfälische Tieflandsbucht mit dem Lippetal. Im Süden wird der Haarstrang durch die Täler von Möhne und Ruhr begrenzt. Hier beginnt das Nordsauerländer Oberland.

Geologisch gesehen bildet der Haarstrang die Südbegrenzung der westfälischen Tieflandsbucht und trennt sie gegen das rechtsrheinische Schiefergebirge ab. Aufgrund seiner Lössbedeckung und der damit verbundenen anthropogenen Nutzung wird der Haarstrang als Bördelandschaft bezeichnet. Er wird allgemein noch dem Hellwegraum oder Hellweggebiet zugeordnet, welches eine Gebietsbezeichnung für eine westfälische Landschaft ist, die "zwischen der Ober- und Mittellippe und der Möhne im Süden liegt, im Osten von dem Nordweststrang der Paderborner Hochfläche begrenzt wird und im Westen bis an die Emscher-Lippe-Wasserscheide reicht" (MÜLLER-WILLE 1942, S. 63).

Im Gebiet der westfälischen Hellwegbörde ist das Problem des Bodenabtrages auf geneigten Ackerflächen schon lange bekannt (JAGOW 1959, RICHTER 1965). Auch heute zählt der Haarstrang zu den stark erosionsgefährdeten Agrarlandschaften Deutschlands (HOEGEN et al. 1995, GLA-NRW 2000). Die schluffreichen und ackerbaulich genutzten Böden am Rand der Mittelgebirge sind anfällig für bodenabtragende Prozesse, ausgelöst durch Niederschläge. Eine neuere Untersuchung des geologischen Landesamtes von NRW über die Einstufung der potentiellen Erosionsgefährdung der Böden am Haarstrang verdeutlicht das Problem des Bodenabtrages im Untersuchungsgebiet. In Abbildung 3 ist ein Kartenausschnitt mit dem Gebiet des Haarstranges dargestellt. Die meisten Böden des Haarstranges werden als potentiell hoch bis sehr hoch erosionsgefährdet eingestuft.



Legende:

Gefährdung

Erosionsgefährdung

	mittel
	hoch
	sehr hoch
	keine oder geringe Gefährdung

Sonstige Flächen

	unzureichende Datenbasis
	Wald
	Gewässer

Abb. 2: Kartenausschnitt von NRW mit der Einstufung erosionsgefährdeter Böden im markierten Bereich des Haarstranges

Quelle: GLA-NRW (2000), überarbeitet

4.2 Gebietsrelevante Faktoren der Wassererosion

Die Gefährdung einer Ackerfläche oder einer ackerbaulich geprägten Region durch Wassererosion ist nicht überall gleich stark vorhanden. Das Zusammentreffen erosiver Wetterlagen, bestimmte topographische Verhältnisse, die Anfälligkeit der Bodensubstrate für den Transport durch Niederschlagswasser und die Nutzung der Ackerflächen sind Voraussetzung für Oberflächenabfluss und Bodenabtrag.

4.2.1 Reliefentwicklung und Hangneigungsverhältnisse

Die Ausprägung des Reliefs ist neben den Niederschlägen der entscheidende Faktor, der zur Auslösung bodenabtragender Vorgänge führt. Der Beschreibung der Reliefformen und

Hangneigungsverhältnisse für die Erosionsanfälligkeit eines Bodens kommt daher eine große Bedeutung zu. Dazu muss ebenfalls die Entwicklung der Formen des Untersuchungsgebietes am Haarstrang betrachtet werden.

Von den tektonischen Ursachen abgesehen, ist für das heutige Relief am östlichen Haarstrang der Wechsel von härteren und weichen Gesteinsschichten allgemein formgebend. Weiterhin hatten die glazialen und periglazialen Klimabedingungen während des Pleistozäns einen wesentlichen Einfluss auf die Reliefgestaltung. So ergeben sich die unterschiedlichen Reliefformen zwischen dem steileren Südfall und der flacheren Nordabdachung des Haarstranges. Südlich des Haarkammes trägt die Landschaft einen Schichtstufencharakter, während sie auf der Nordabdachung mehr flächenhaften Charakter zeigt (PETERMEIER 1968). Süd-Nord gerichtete Quertäler durchziehen den gesamten Haarstrang (s. Abb. 4). Nördlich und südlich des Haarstranges liegen die großen West-Ost gerichteten Längstäler der Lippe und Möhne, welche schon im Alttertiär angelegt wurden (PETERMEIER 1968). Im mittleren und östlichen Abschnitt der Nordabdachung zeigt das Relief vor allem einen flächenhaften Charakter und gliedert sich in flachwellige, langgestreckte Flächen, die durch schmale, vorwiegend von Süden nach Norden verlaufende Täler (Schledden) zerschnitten werden (KLEINN 1962). Viele dieser Täler führen wegen des verkarsteten Untergrundes nur zeitweise Wasser. Sie nehmen in der Hauptsache das Oberflächenwasser auf, das während längerer Niederschlagsperioden oder Starkregen anfällt (SAUERLAND 1969). Nach Süden, zum Haarkamm hin, werden die Täler zunehmend flacher und enden schließlich in weiten flachen Dellen.

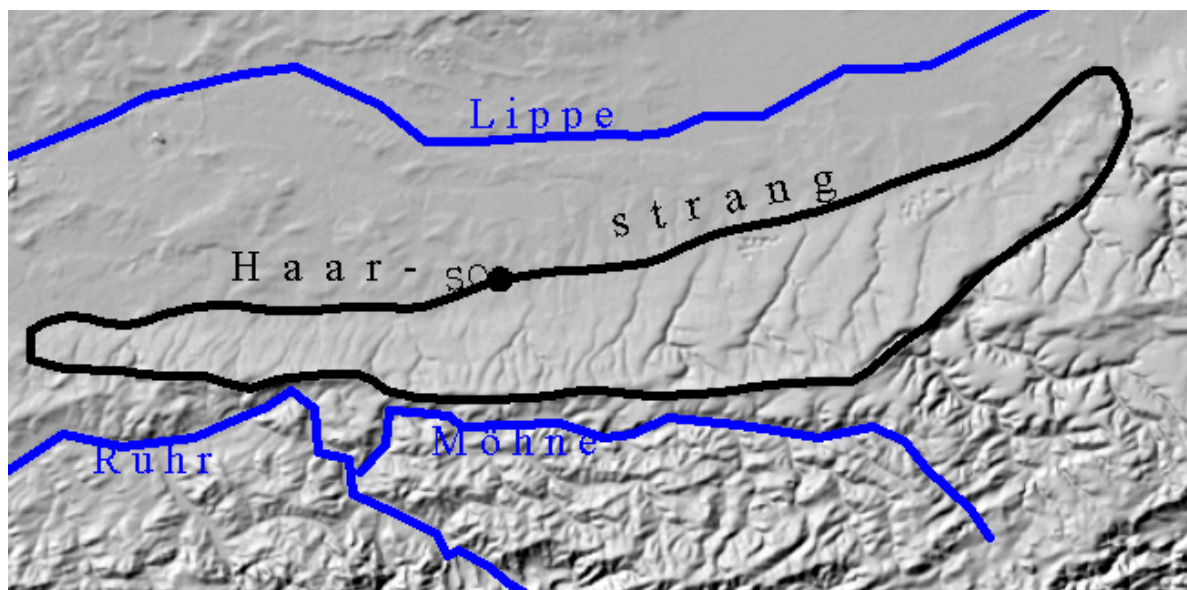


Abb. 3: Höhenreliefkarte des Haarstranges zwischen Lippe, Möhne und Ruhr

Quelle: LANDESVERMESSUNGSAmt NRW (2002), überarbeitet

Die Reliefkarte in Abbildung 4 zeigt die Süd-Nord gerichteten Flusssysteme der Schledden am Haarstrang im Gegensatz zum Ost-West gerichteten Abfluss der sich nördlich und südlich angrenzenden Flusstäler der Lippe bzw. Möhne und Ruhr.

Die Entstehung dieser temporären Trockentäler hat ihren Ursprung an der Wende des Tertiärs zum Quartär. In dieser Zeit hob sich die Rheinische Masse (Paläozoikum) im Bereich des heutigen Sauerlandes empor, wobei das Deckgebirge (Mesozoikum) des Haarstranges eine Kippung nach Norden erfuhr. Dadurch veränderten sich die seit dem Tertiär angelegten Abflusssysteme mit ihren Längstälern (HEMPEL 1962). Die Hauptabflussrichtung am Haarstrang von Osten nach Westen wurde zu einer Süd-Nord-Abflussrichtung. Die ursprünglich auf dem Haarstrang angelegten Längstäler der Lippe und Möhne wurden nach Süden bzw. Norden verdrängt. Gleichzeitig entstand durch die tektonische Schrägstellung der Kreideschichten eine stärkere Klüftung im Gestein, so daß der Niederschlag mit seinen Sickerwässern zur Verkarstung der carbonatreichen Sedimentgesteine (Kalke und Mergel) auf der Nordabdachung führte. Die verkarsteten Flächen sind von quartären Deckschichten überlagert, daher liegen die verkarsteten Kalksteine nicht sichtbar an der Erdoberfläche, so daß von einem bedeckten Karst gesprochen werden kann. Daher kommen die Trockentäler als einzige, deutlich sichtbare Karsterscheinungen am östlichen Haarstrang vor. KLEINN (1961) spricht von den "Schledden" als Randerscheinungen des Karstes. Erst in der nach Osten sich anschließenden Paderborner Hochfläche sind eindeutige Hinweise (Dolinen, Einsturzlöcher) auf eine vollständige Verkarstung beobachtet worden (FEIGE 1983, FISCHBACH 1983).

Im gesamten Untersuchungsgebiet variieren die Hangneigungen von 1 bis ca. 18 %. Außerhalb der meistens asymmetrisch angelegten Trockentäler liegen sie zwischen 2 und 7 %, während sie im Bereich der Talhänge von 7 auf 12 % und in einigen Abschnitten bis auf 17 % ansteigen.

4.2.2 Ausgangssubstrate der Bodenbildung

Ein weiterer Faktor für den Bodenabtrag ist das Ausgangssubstrat. Es bestimmt die Textur des Oberbodens, welche je nach Art und Menge der einzelnen Kornfraktionen die Erodierbarkeit eines Bodens mitbestimmt. Aus der Körnung der verwitterten Ausgangssubstrate ergeben sich daher Bodeneigenschaften, welche die Erosionsanfälligkeit eines Bodens fördern oder sinken lassen (AG BODENKUNDE 1994, SCHWERTMANN et al. 1990). Die bodenbildenden Substrate sind durch die Verwitterung des Ausgangsgesteines entstanden, das den geologischen Aufbau des Haarstranges bestimmt.

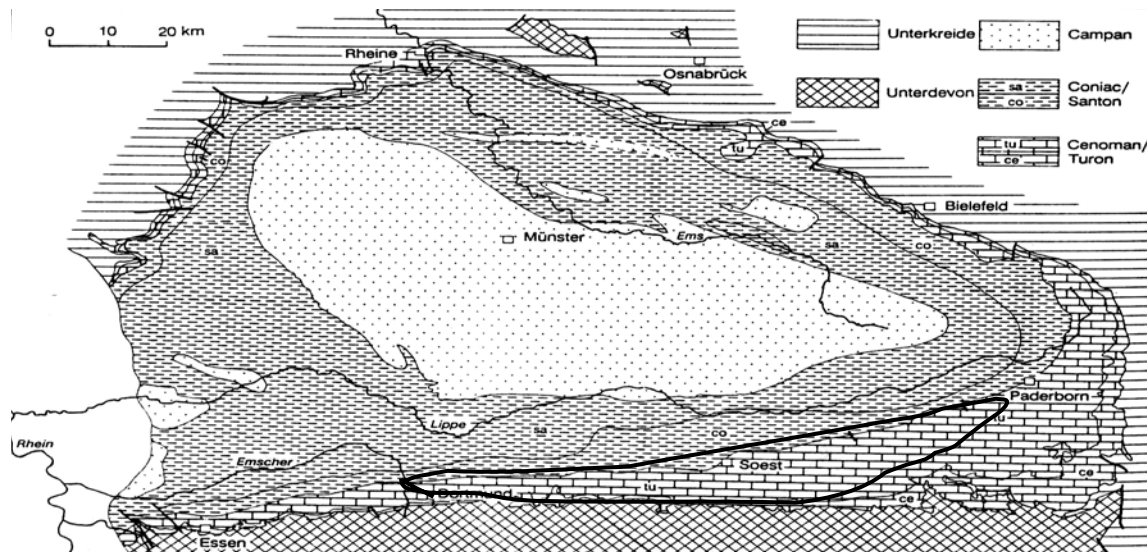


Abb. 4: Geologische Übersichtskarte der Münsterländer Oberkreidemulde mit Lage des Haarstranges

Quelle: WALTER (1992), überarbeitet

Geologisch betrachtet, gehört der Haarstrang zum Südrand des Münsterländer Kreidebeckens (vgl. Abb. 4). Er wird von Kalken, Mergelkalken, Mergeln und Kalksandsteinen der Oberkreide (Cenoman und Turon) aufgebaut (FEIGE 1983). Die Schichten des Cenomans und Turons lagern diskordant dem gefalteten paläozoischen Grundgebirge (Karbon und Devon) des Rheinischen Schiefergebirges auf. Die älteren Oberkreideschichten (Cenoman-Schichten) streichen im Süden zum Möhne- und Ruhrtal hin aus, während die jüngeren Schichten (Turon-Schichten) die nördliche Abdachungsfläche zur Hellwegniederung aufbauen. Die flachlagernden Kreideschichten verlaufen allgemein in ost-westlicher Richtung und fallen mit ca 2 - 3° nach Norden ein. Sie wurden dann im Quartär von pleistozänen Sedimenten (Löss, Geschiebelehm, Kiese) überdeckt und nehmen heute große Flächen am Haarstrang ein.

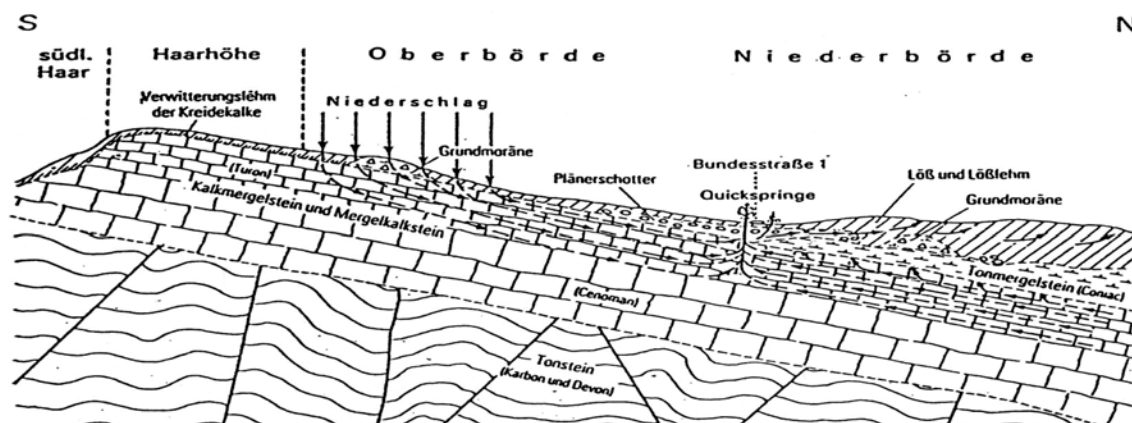


Abb. 5: Geologisches Profil durch den östlichen Teil des Haarstranges

Quelle: KIVELITZ (1996)

Der geologische Untergrund des östlichen Haarstranges wird somit größtenteils von den Sedimentgesteinen des Turons aus der Oberkreide aufgebaut. Er liegt im Bereich des Lamarcki-Pläners, der große Flächen auf der Nordabdachung des östlichen Haarstranges einnimmt. Der Lamarcki-Pläner besteht aus blau-gelben bis weißlichen Kalken, welche in Wechsellagerung mit dunkelgrauen Mergelbänken treten (RITZEL 1972). Sie gehören zu den älteren Gesteinsschichten des Turons und lagern über dem Labiatus-Mergel, mit dem die turonen Fazies (Leitfossilien) beginnen. Die unverwitterten Mergelkalke (Lamarcki-Pläner) stehen durchschnittlich ab ca. 2 m Tiefe an. Sie werden von einer ca. 1 bis 2 m mächtigen Verwitterungsdecke aus Mergelkalken bedeckt. Sie wird als Hottenstein-Schlufflehmdecke bezeichnet und ist aus pleistozänem Frostschutt entstanden, welcher durch Kryoturbation und Solifluktion mit Löss vermengt wurde (ZEZSCHWITZ v. 1982).

Die Hottensteine ("Hotte" (westf.) = Quark, s. ARNOLD 1965, S. 107) selbst sind entkalkte, sehr poröse Pläner des Cenomans und Turons. Die Gesteinsstücke liegen in einer lösslehmhaltigen Matrix und haben noch die Struktur der plattigen Kalke.

ZEZSCHWITZ v. (1982) untersuchte diese Hottenstein-Schlufflehmdecken im Gebiet der Paderborner Hochfläche. Demnach sind die Hottensteine aus Cenoman- und Turonplänern der Oberkreide durch Auslaugungs- und Verwitterungsprozesse entstanden, indem die nach der Entbasung sowie nachfolgender Verwitterung (Tonmineralbildung) freiwerdende Kieselsäure im Gestein verblieb und somit ein kieseliges Gerüst bildete, während die gelösten Kationen weggeführt wurden. Die Entstehung dieser Verwitterungsdecken begann mit der Saale-Kaltzeit (Pleistozän). Der überall auf den Hochflächen durch Frostverwitterung entstandene Schutt aus Kalk- und Mergelsteinen, wanderte infolge solifluidaler Prozesse, meist während der Rückzugsphasen des Eises gegen Ende des Saale-Glazials, langsam hangabwärts und wurde mit Löss vermischt. Die Schuttdecken unterlagen während des Eem-Interglazials der Lösungsverwitterung und einer damit verbundenen Verlehmung. Dabei wurden die Mergelkalke langsam entcarbonatisiert. In einer lehmigen Matrix zurück blieben die quarzhaltigen Bestandteile, die ein kieseliges Skelett hinterließen. So entstanden aus den Mergelkalken die Hottensteine. Während des Weichsel-Glazials begannen die Solifluktionsvorgänge in geringem Umfang erneut. Zugleich wurden die Hottenstein-Schlufflehmdecken von einer Lössschicht bedeckt. Aus diesem lösshaltigen Decksediment bildeten sich unter den wärmeren Klimabedingungen des Holozäns die rezenten Böden. Die unter dem Decksediment liegenden Hottenstein-Schlufflehmdecken sind zum Teil verbraunt. Daher spricht ZEZSCHWITZ v. (1982) sie als eemzeitliche Paläoböden an. In seiner Dissertation über die "Vergesellschaftung, Entstehung und Eigenschaften der Böden im Soester Hellweggebiet", berichtet HOHNVEHLMANN (1963, S. 38 ff.) ebenfalls von "hottensteinigen Verwitterungsdecken" über den anstehenden Mergelkalken.

Verkarstungsvorgänge führten zu einer starken Zerklüftung der Gesteine. In den Klüften der verkarsteten Kalksteine hielten sich teilweise Reste eines jungtertiären Verwitterungsproduktes (Kalksteinverwitterungslehm), das als Paläoboden vom Typ der Terra-Fusca (Terrae Calcis) angesprochen werden kann (ZEZSCHWITZ v. 1982).

Die bodenbildenden Substrate werden im Untersuchungsgebiet also hauptsächlich von den quartären Deckschichten gebildet. Vorgänge der Bodenabtragung legten allerdings das kreidezeitliche Deckgebirge des Haarstranges zum Teil wieder frei, was die Bodeneigenschaften nachhaltig veränderte.

4.2.3 Bodenkundliche Ausstattung

Der Haarstrang gehört trotz seines geologischen Untergrundes aus mesozoischen Sedimentgesteinen der Kreidezeit zur Bodenregion der Löss- und Sandlösslandschaften, da er größtenteils mit einer mehr oder weniger mächtigen Lössauflage bedeckt ist (GLA-NRW 2000). Er grenzt im Süden an die Region der Böden aus paläozoischen Sedimentgesteinen des rechtsrheinischen Schiefergebirges und im Osten an die Region der Berg- und Hügelländer mit überwiegend Böden aus mesozoischen Sedimentgesteinen (s. Abb. 6).

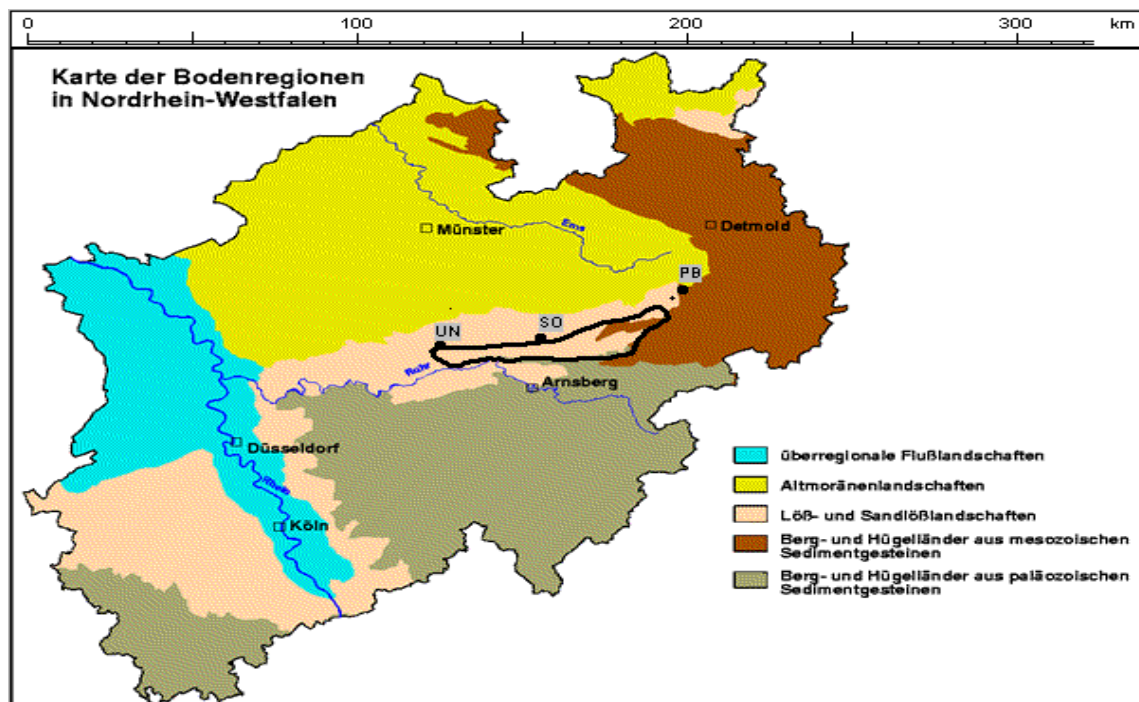


Abb. 6: Karte der Bodenregionen Nordrhein-Westfalens mit Lage des Haarstranges

Quelle: GLA-NRW (2000), überarbeitet

Für die Bildung der heutigen Böden am Haarstrang sind, neben dem holozänen Klima, die quartären Deckschichten von entscheidender Bedeutung (s. Kap. 4.2.2). Sie bedecken das aus Kalken und Mergeln der Kreidezeit bestehende Ausgangsgestein am Haarstrang. Aus dem lösshaltigen Decksediment bildeten sich die fruchtbaren Lössböden, die für den Ackerbau bestens geeignet sind.

Nach der Einteilung in die deutsche Bodensystematik von MÜCKENHAUSEN (1977) hat HOHNVEHLMANN (1963) für den Bereich des mittleren und östlichen Haarstranges folgende Böden unterschieden:

Die terrestrischen Böden sind hauptsächlich durch die Bodenklassen der Braunerden und Parabraunerden vertreten. Auf steileren Hängen und Kuppen der höher gelegenen Flächen sind flachgründige Böden entwickelt, wie zum Beispiel Rendzinen und Pararendzinen. In ebeneren Lagen kommen auch staunasse und kolluviale Böden vor. Meistens liegen diese Böden als Übergangsformen (Subtypen wie Braunerde-Pseudogley) zwischen den Bodentypen vor. Semiterrestrische Böden wie Gleye, kommen nur in den großen Flusstalungen der Hellwegniederung, sowie im Möhne- und Ruhrtal vor. Die ehemals flächendeckend ausgebildeten "Lössschleier" sind weitgehend der Erosion zum Opfer gefallen oder in die Ackerkrume eingearbeitet, so dass aus den ehemals gebildeten Böden Subtypen und Varietäten entstanden sind, die für einen erosionsbedingten Standort ein typisches Bodenmosaik ergeben (SEMME

1983). Bodenabtragende Prozesse legten zum Teil ältere Bodenprofile frei, welche heute als Bodenrelikt die Bodenfruchtbarkeit entscheidend mitbestimmen (ZEZSCHWITZ v. 1982).

4.2.4 Klima, typische Wetterlagen und erosive Niederschläge

Das Klima wird größtenteils durch die Elemente Temperatur und Niederschlag bestimmt. Temperaturunterschiede in der Atmosphäre erzeugen Luftdruckgegensätze, die sich in Hoch- und Tiefdruckgebieten zeigen und im Fall des Luftmassenaustausches zu Turbulenzen und Niederschlägen führen.

Der Haarstrang gehört zum atlantischen Klimabereich. Daher ist das Klima im Bereich des Haarstranges stark maritim beeinflusst und wird überwiegend durch westliche Winde geprägt. Die Temperaturschwankungen sind im Jahresverlauf gering. Kühle Sommer und milde Winter charakterisieren dieses Klima. Die mittleren Jahresniederschläge liegen meist im Bereich zwischen 750-850 mm. Sie steigen am östlichen Haarstrang an. Die Jahresmitteltemperaturen liegen zwischen 7° und 9° Celsius. Scharf abgegrenzt sind die Jahresmittel der Temperaturen und Niederschläge gegen das "Nordsauerländer Oberland". Hier sinken die Jahresmitteltemperaturen auf ca. 7° Celsius und die mittleren jährlichen Niederschlagsmengen steigen auf 900 bis über 1000 mm an (KLIMAATLAS VON NORDRHEIN-WESTFALEN 1989).

Am östlichen Haarstrang wirkt sich der Anstieg von Norden nach Süden um ca. 200 - 250 m auf die klimatischen Verhältnisse aus. So steigen die Niederschläge vom Hellwegtal bis zum Haarkamm an, während die Jahresmitteltemperaturen leicht fallen. Auf der Haarnordabdachung weisen die im Bereich des Haarkammes gelegenen Ortschaften Effeln, Menzel und Nettelstädt die höchste Jahresniederschlagssumme auf.

Die Verteilung des Jahresniederschlages im Bereich der Versuchsflächen ist in Tabelle 2 dargestellt. Insgesamt kann von einer relativ konstanten Verteilung der Niederschläge gesprochen werden, wobei ein Hauptmaximum im Sommerhalbjahr (Mai bis August) und ein Zwischenmaximum im Winterhalbjahr (Januar) zu sehen ist. Geringe Unterschiede sind in den Übergangsjahreszeiten zu erkennen, mit Minimum im Februar/März sowie im Oktober.

Bemerkenswert sind die Werte der Tabelle 2 im Zusammenhang mit der Bodenerosion. Hier lässt sich die relative Häufigkeit konvektiver Starkregen erkennen. So kann statistisch davon ausgegangen werden, dass der Untersuchungsraum durch eine Wiederkehrzeit von erosiven Starkregen alle 6 - 10 Monate gekennzeichnet ist.

Tab. 2: Niederschlagshöhe (mm/24 h) in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit (Station Rütten, 1951-1980) im Bereich des östlichen Haarstranges

Wiederkehrzeit (Jahre)	Niederschlagshöhe in mm/24 h		
	Sommer (Mai - Sep.)	Winter (Okt. - Apr.)	gesamt Jan. - Dez.
0,5	26	21	31
1	33	26	39
2	40	31	46
5	48	37	56
10	55	42	64
20	62	47	72
50	71	53	82
100	77	58	89

Quelle: Dt. Wetterdienst, Wetteramt Essen (1994)

Da sommerliche Niederschläge meist als gewittrige Starkregen fallen, ist eine erhöhte Regenerosivität vorgegeben. Besonders der Juni ist der Monat mit den höchsten und intensivsten Niederschlägen. Abgesehen von sommerlichen Wärmegewittern als einzelnes Starkregenereignis, treten hier häufig sogenannte Trogwetterlagen auf, wo subtropische Warmluftmassen vom Mittelmeer kommend auf kühlere maritime Luftmassen des Nord-Atlantiks treffen. Das Aufeinandertreffen dieser Luftmassen führt dann häufig zu länger andauernden Niederschlägen mit eingebundenen Starkregen. Ebenso typische Wetterlagen für ergiebige Niederschläge sind die sogenannten "Schleifzonen" und "Kaltluftstaffeln" bzw. "Kaltlufttropfen" sowie Vorstöße von Wetterfronten mit Kaltfrontgewittern (GLATTHAAR u. SCHREIBER 1988, S. 329).

Die Häufigkeit von Sommerniederschlägen mit bodenerosiver Wirkung in NRW haben SAUERBORN u. ERDMANN (1993) im Rahmen der Entwicklung einer Isoerodentkarte für 15 verschiedene Klimastationen in Nordrhein-Westfalen berechnet. Sie zeigt sich in einer durchschnittlichen Verteilung der R-Wert-Anteile der Sommermonate (Mai - Oktober) in Prozent am Jahres-R-Wert. Die größere Anzahl erosiver Niederschläge während des Sommers in NRW ist für den mitteleuropäischen Klimaraum als typisches Witterungsgeschehen anzusehen. Aufgrund der Niederschlagsdaten muss daher in den Monaten Mai bis September mit vermehrten Erosivregen gerechnet werden. Dabei führen Starkregenereignisse zu Beginn und gegen Ende einer Vegetationsperiode zu den größten Bodenabträgen, da die Ackerflächen zu dieser Zeit noch teilweise brach liegen.

Im Spätsommer 1987, am späten Nachmittag des 4. Septembers, kam es am östlichen Haarstrang zu einem katastrophalen Starkregenereignis. In einigen Teilbereichen der betroffenen Gebiete fielen in einer knappen Stunde bis zu 100 mm Niederschlag pro m² auf die bereits abgeernteten Ackerflächen. Der größte Teil des Niederschlages floss oberflächlich ab und richtete dabei in der Feldflur und den Ortschaften großen Schaden an. Die Ackerböden sind zum Teil bis auf das Ausgangsgestein abgetragen worden. In den tiefer gelegenen Ortschaften richteten Hochwässer, sowie mächtige Schlamm- und Geröllablagerungen große Schäden an Gebäuden und Straßen an. Ernteauffälle, Gebäudeschäden und ertrunkenes Vieh brachten erhebliche finanzielle Einbußen für die ansässigen Landwirte. Die Abbildungen 1 – 4 im Anhang verdeutlichen die Schäden in der Feldflur.

GLATTHAAR und SCHREIBER (1988) erarbeiteten eine geografische Analyse dieses Niederschlagsereignisses. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass es sich aufgrund der Intensität um ein "Jahrhundertereignis" handelte. Die flächenmäßig enge Begrenzung der Niederschläge deutete auf ein regionales Ereignis hin, welches durch ein spätsommerliches Wärmegewitter ausgelöst wurde.

Über ein ähnliches "Jahrhundertereignis" vom 16. Juli 1965 auf der sich östlich des Haarstranges anschließenden Paderborner Hochfläche, berichteten ZEZSCHWITZ v. (1967) und KARRENBURG (1968). Sie erarbeiteten eine Analyse dieses Starkregenereignisses und stellten Ursachen und Folgen dar. Aufgrund des gleichen Ausgangssubstrates für die dortigen Böden und ähnlichen Nutzungsverhältnissen konnten Parallelen zum Haarstrang gezogen werden.

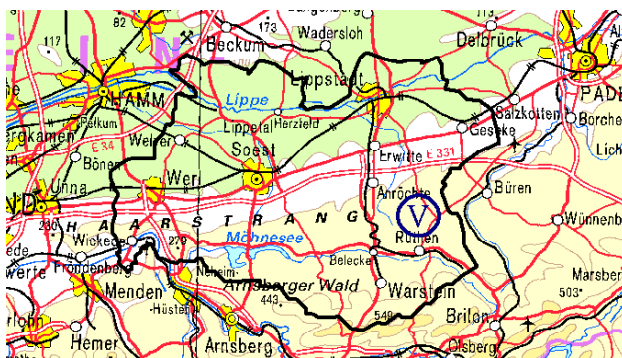
5 Methoden und Material

Vor Beginn der Feldversuche 1997 sind die verschiedenen Methoden zur praktischen Durchführung erarbeitet worden. Dies erforderte die Anschaffung der notwendigen technischen Geräte sowie Baumaterialien. Eine detaillierte Beschreibung über den Versuchsaufbau, die Laboranalytik und die Gewinnung von Messdaten ist im Hinblick auf die Verifizierbarkeit der gewonnen Ergebnisse unerlässlich.

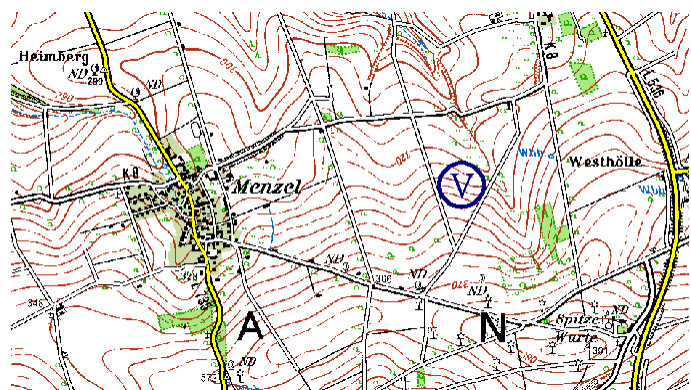
5.1 Die Feldversuchsfläche

Die Feldversuchsfläche befand sich auf der oberen Nordabdachung des Haarstranges, im Südosten des Kreises Soest (vgl. Abb. 7). Sie gehört zur Gemeinde Rüthen und liegt in der Gemarkung Menzel.

M = 1 : 1 Mill. (vergrößert)



Versuchsfläche



M = 1 : 50000 (vergrößert)

Abb. 7: Kartenausschnitte von NRW mit der Kreisgrenze von Soest und der Lage der Versuchsfläche

Quelle: LANDEVERMESSUNGSAMT NRW (2002), überarbeitet

Die Lage der Fläche wurde zur Versuchsdurchführung aufgrund ihrer Standorteigenschaften als sehr geeignet eingestuft. Sie wurde der Fachhochschule Südwestfalen in Form einer Nutzungsvereinbarung für die Zeit der Versuchsdauer zur Verfügung gestellt. In diesem Zusammenhang wird Herrn Landwirt Heinfried Richter und seiner Familie für die freundliche Unterstützung ausdrücklich gedankt.

5.1.1 Standortcharakteristika und Bodenprofilbeschreibung

Die Versuchsfläche lag im oberen Einzugsbereich der Lippe. Als Vorfluter diente der Hoinkhauser Bach, der in die Pöppelsche mündet, welche zur Lippe hin entwässert. Das Flusssystem gehört zu den in Kap. 4.2.1 erwähnten temporären Trockentälern, die eine Randerscheinung des verkarsteten Untergrundes sind.

Standortcharakteristika der Versuchsfläche:

Jahresmitteltemperatur:	7,5 - 8 °C
Mittlerer Jahresniederschlag:	898 mm
Höhenlage:	ca. 340 m ü. NN
Reliefposition:	gestreckter Hang, im Einzugsgebiet des Hoinkhauser Baches
Exposition:	NNE
Hangneigung:	zwischen 6,8 und 7,7 %
Ausgangssubstrat der Böden:	lösslehmhaltiger Kalksteinverwitterungslehm
Bodentypen:	Braunerde, z.T. Rendzina-Braunerde
Bodenzahl:	45 - 55
Flächengröße:	ca. 3 ha

In Bezug zur Gefahr des Oberflächenabflusses und Bodenabtrages werden die Faktoren Niederschlag, Hangneigung, Ausgangssubstrat und der vorherrschende Bodentyp näher beschrieben.

In Tabelle 3 ist die Verteilung der mittleren Monats- und Jahresniederschläge für die Versuchsfläche von 1997 - 2002 im Vergleich zu den langjährig erfassten mittleren Monatsniederschlägen sowie des mittleren Jahresniederschlages in der Ortschaft Menzel, westlich der Fläche gelegen, dargestellt.

Tab. 3: Verteilung der Niederschläge (langjähriges Monats- u. Jahresmittel in mm v. 1975 - 2000) der Messstelle Menzel, ca. 2 km (westlich) vom Untersuchungsstandort und auf der Feldversuchsfläche (1997 - 2002)

Monat	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
Menzel	79,1	54,0	71,3	58,2	69,5	87,7	89,2	78,3	79,8	65,5	75,3	86,3	898,3
Fläche													
1998	65,5	16,0	132,1	73,7	42,4	140,4	78,5	83,1	127,6	190,1	98,1	51,8	1107,8
1999	73,4	85,0	69,1	82,6	58,3	56,7	50,4	74,5	71,8	44,7	89,5	131,5	914,9
2000	52,6	73,5	119,7	29,3	48,6	58,9	162,9	59,2	115,0	51,3	27,7	77,2	919,6
2001	50,1	59,6	91,4	71,5	42,6	128,9	66,6	43,7	138,5	36,2	138,6	128,2	995,9
2002	61,5	141,4	44,5	61,4	77,1	95,1	152,0	163,4	107,9	89,1	104,9	100,6	1198,0

Quelle: KULKE (mündl. Mitteil.) u. eigene Daten

In den 5 Versuchsjahren lagen die Niederschläge im Verhältnis zwischen 2 und 34 % über dem langjährig gemessenen Jahresmittel der näheren Umgebung (Messstation Menzel). Hervorgehoben ist das Niederschlagsmaximum der Sommermonate Mai bis August. Insgesamt betrachtet sind die Werte für den Zeitraum von 25 Jahren relativ konstant. Bei Betrachtung einzelner Monatswerte zeigt sich jedoch eine zum Teil starke Niederschlagsschwankung.

Die Neigungsverhältnisse auf der Versuchsfläche sind nach Einstufung der AG BODENKUNDE (1994) als "schwach geneigt" zu bezeichnen. Nach HOEGEN et al. (1995) besteht auf ackerbau-lich genutzten Flächen mit dieser Hangneigung, je nach Ausgangssubstrat und Textur des Oberbodens, eine mittlere Erosionsgefahr. Die vom GLA-NRW herausgegebene Karte der Erosionsge- fährdung von Böden in NRW stuft den Bereich der Fläche allerdings als hoch gefährdet ein (s. Abb. 8).

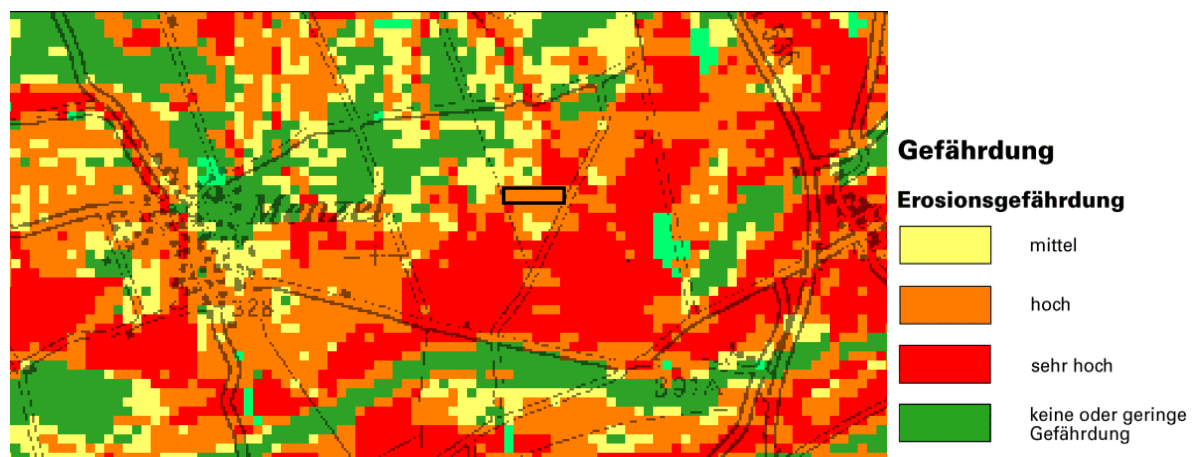


Abb. 8: Ausschnitt der digitalen Karte der Erosionsgefährdung von NRW mit Skizze der Feldversuchsfläche

Quelle: GLA-NRW (2000), überarbeitet. M = 1 : 25000 (vergrößert)

Das Ausgangssubstrat der Böden und der vorherrschende Bodentyp ist in Abbildung 9 zu sehen.

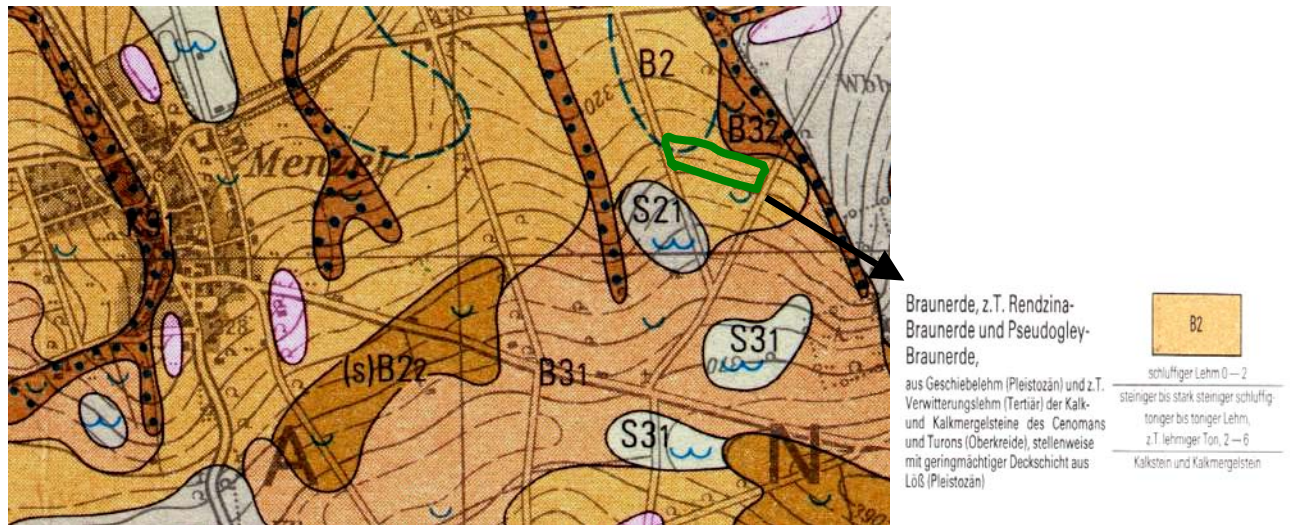


Abb. 9: Ausschnitt der Bodenkarte von NRW, (M = 1 : 50000, vergrößert), Blatt L 4516 Büren mit der Versuchsfläche

Quelle: GLA-NRW (1989), überarbeitet

Die markierte Stelle des Kartenausschnittes zeigt den Bereich der Versuchsfläche. Der angegebene Bodentyp der Braunerde mit Übergang zur Rendzina-Braunerde ist mit dem für die Versuchsfläche angelegten Leitprofil in der Abbildung 10 zu vergleichen. Das Gleiche gilt für die Mächtigkeiten der ausgewiesenen Bodenhorizonte. Der blaumarkierte Bereich am Rand der Versuchsfläche zeigt eine durch Staunässe beeinflusste Stelle innerhalb der Bodeneinheit B 2.



Tiefe	Horizontbezeichnung / -beschreibung	
0 - 25 cm	Ap	dunkelgraubraun (10 YR 4/2) bis leicht olifarben (2,5 Y 5/4), stark humos, carbonatarm, Subpolyeder-Gefüge, schwach bis mittel durchwurzelt, Skelettgehalt ca. 0,2%, sehr schwach alkalisch
25 - 40 (60) cm	II Bv	blasses Braun (10 YR 6/3 - 4) bis leicht gelbbraun (2,5 Y 6/4), mittel humos, schwach carbonathaltig, Subpolyeder sehr schwach durchwurzelt, Skelettgehalt ca. 5%, sehr schwach alkalisch
40 - 60 cm	III BvCv	braungrau (2,5 Y 6/2) bis blass oliv (5 Y 6/3), mittel humos, schwach carbonathaltig, nicht durchwurzelt, Skelettgehalt ca. 6%, sehr schwach alkalisch
> 60 cm	IV mC	grau bis olivgrau (5 Y 5/1 - 2 u. 5 Y 4/1 - 2), anstehender Kalkstein, schwach alkalisch
Bodenform: Braunerde, flach- bis mittelgründig, z.T. Rendzina-Braunerde aus lösshaltigem Kalksteinverwitterungslehm über Kalksteinen und Mergeln (Lamarcki-Pläner) der Oberkreide (Turon)		

Abb 10: Foto des Leitprofils für die Feldversuchsfläche

Anhand der in Tabelle 4 angegebenen Bodenkennwerte wurde die vorherrschende Bodenform nach Einordnung in die deutsche Bodensystematik ermittelt. Es sind 3 Bodenhorizonte im Profil unterschieden worden. Die Mächtigkeiten der Unterbodenhorizonte variieren auf engstem Raum stark. Es sind taschen- und zapfenförmige Ausprägungen im Bodenprofil zu erkennen. Im humosen Oberboden ist der Skelettanteil des Feinbodens gering und nimmt ab ca. 40 - 60 cm Bodentiefe stark zu.

Tab. 4: Chemische und physikalische Bodenkennwerte des Leitprofils

Tiefe (cm)	Skelettgehalt (%)	pH-Wert (CaCl ₂)	CaCO ₃ * (%)	C _{org} (%)	Bodenart (%)			Textur*
					Sand	Schluff	Ton	
0-25	0,2	6,8	0,8	2,3	2,4	52,9	44,6	Tu 3
25-(40)-60	5,7	7,1	1,5	0,3	1,1	45,2	53,7	Tu 2
(40)-60-80	56,6	7,4	5,9	0,3	2,4	47,3	50,3	Tu 2

*Textur = n. AG BODENKUNDE 1994, *CaCO₃ = Skelett n. berücksichtigt

Der pH-Wert im Bodenprofil schwankt zwischen sehr schwach sauer (Ap-Horizont) und sehr schwach alkalisch (B-Horizonte). Der Carbonatanteil des Feinbodens steigt mit zunehmender Bodentiefe und Skelettanteil. Im Oberboden ist der Carbonatanteil durch die Einmischung von Mer-

gel- und Kalksteinresten aus der Bodenbearbeitung zu erklären. Aus dem C_{org} -Gehalt ergibt sich ein stark humoser Oberboden, wobei eine Einmischung von humosem Material bis in die B-Horizonte erfolgte. Der hohe C-Gehalt des Oberbodens ist untypisch für eine Braunerde aus Lösslehm und kommt dem einer Rendzina mit A-C-Profil schon sehr nahe. Vermutlich ist durch die Degradierung des Profils ein Übergang zum Subtyp der Rendzina-Braunerde erfolgt. Das lösshaltige Decksediment, welches seit der letzten Kaltzeit die Fläche bedeckte, ist durch Bodenerosion fast vollständig abgetragen. Dadurch ist der tonige Kalksteinverwitterungslehm freigelegt worden. Zudem füllt der lehmige Ton die Klüfte im Kalkstein aus.

Die Körnungsanalyse zur Texturbestimmung des Feinbodens zeigt eine Verteilung zugunsten der Schluff- und Ton-Fraktion. Die Sandanteile sind verschwindend gering. Nur im Ap-Horizont sind die Schluffanteile gegenüber den Tonanteilen etwas höher. Vermutlich ist hier noch ein Rest der ehemals vorhandenen Lössbedeckung vorhanden. Ab 25 cm Tiefe steht das tonige Verwitterungsprodukt der Kalksteine an. Die Einteilung der Textur des Oberbodens nach der AG BODENKUNDE (1994) ergab einen mittel schluffigen Ton, während die beiden Unterbodenhorizonte als schwach schluffiger Ton zu bezeichnen sind. Der hohe Tongehalt deutet auf einen hohen Verwitterungsgrad hin. Demnach muss der Verwitterungslehm auf jeden Fall älter sein als das darüberliegende schluffreiche Decksediment.

Aufgrund der im Gebiet des Haarstranges untersuchten Böden durch HOHNVEHLMANN (1963) und ZEJSCHWITZ v. (1983) besteht Grund zu der Annahme, dass es sich hierbei um die schon erwähnten Terra Fusca-Reste handelt, die sich in den Gesteinsklüften der verkarsteten Kalksteine erhalten haben und durch beschleunigte Abtragungsprozesse in jüngerer Zeit wieder freigelegt wurden.

5.2 Durchführung der Feldversuche 1997 - 2002

Vor dem Aufbau des Feldversuches ist die vorgesehene Ackerfläche drei Jahre lang mit konservierender Bodenbearbeitung (Mulchsaatverfahren) bestellt worden, so dass von Beginn an durch das Vorhandensein kontinuierlicher Makroporen mit möglichem Zwischenabfluss zu rechnen war und der Feldversuch keiner Anlaufphase bedurfte. Nach der Ernte der zuvor mit Winterweizen bestellten Fläche Anfang August 1997, erfolgte die Vermessung und Markierung der Gesamtfläche. Die Flächenmaße beliefen sich auf ca. 3 Hektar ($28590 \text{ m}^2 = 285 \times 100 \text{ m} = 2,85 \text{ ha}$). Mit einem Pürckhauer-Bohrer wurde eine Sondierung zur Lage des Untergrundes durchgeführt, um einen reibungslosen Aufbau der verschiedenen Messvorrichtungen zu gewährleisten.

5.2.1 Pflanzenbauliche Maßnahmen und Produktionstechnik der Erntejahre 1998 - 2002

Die Durchführung der Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Versuchsflächen oblag, soweit es mit den betriebseigenen Maschinen und Geräten möglich war, dem Betrieb Richter in Menzel. Die übrigen Bewirtschaftungsmaßnahmen wurden mit Hilfe der eigenen Produktionstechnik von den Mitarbeitern des zum Fachbereich Agrarwirtschaft gehörigen Versuchsgutes in Welter-Merklingen, Kreis Soest, erledigt. Bei der Sortenwahl der Kulturen wurde auf die üblichen Sorten des Landwirtes eingegangen. Da der ansässige Landwirt keinen Mais anbaute, sind handelsübliche Sorten verwendet worden. Der Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln entsprach den Regeln der guten fachlichen Praxis. Einen Überblick der zum Versuchszweck notwendigen pflanzenbaulichen Maßnahmen der Versuchsjahre geben die Tabellen 1 - 3 im Anhang.

5.2.1.1 Ackerkulturen und Fruchtfolge

Zum ersten Versuchsfaktor gehörten die Ackerkultur und die Gestaltung der Fruchtfolge. Der Versuch wird vor dem Hintergrund zweier typischer Fruchtfolgen in Nordrhein-Westfalen durchgeführt:

Fruchtfolge 1: Winterraps - Winterweizen - Wintergerste

Fruchtfolge 2: Mais - Winterweizen - Mais

Auf dem Haarstrang wird die erste Fruchtfolge als eine regional typische Folge häufig angebaut. Die Wintergerste dient als Vorfrucht für Winterraps und wird im Rahmen der Erosionsmessungen nicht berücksichtigt. Die Ertragsermittlung wird jedoch auch bei der Wintergerste durchgeführt.

Die zweite Fruchtfolge wurde ausschließlich gewählt, um die erosionsanfällige Reihenkultur Mais zusätzlich zu untersuchen. Mais ist aufgrund der Höhenlage (340 m ü. NN) für den Standort weniger geeignet, dennoch können die Erosionsmessungen zur besseren Bewertung der Erosionsanfälligkeit dieser Kultur einen Beitrag leisten. In Abbildung 11 ist ein Schema der Feldversuchsfläche mit den jeweiligen Fruchtfolgen (F 1 = Fruchtfolge 1, F 2 = Fruchtfolge 2) dargestellt. Die Luftbildaufnahme in Abbildung 12 verdeutlicht die Lage der Fläche. Zu erkennen sind die „Messgruben“ (s. Kap. 5.2.4) am hangabwärts gerichteten Ende der einzelnen Anbauflächen.

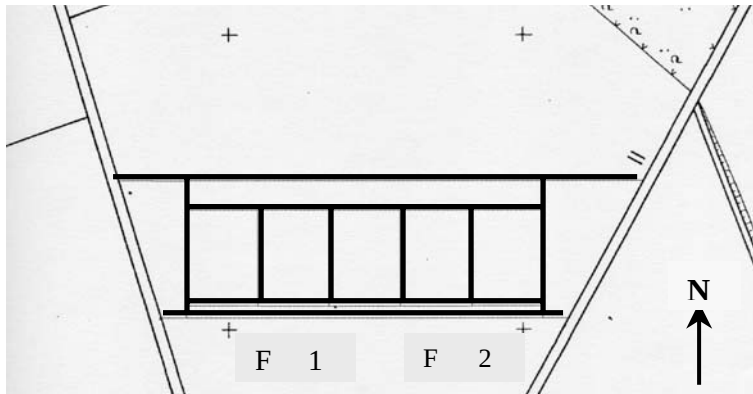


Abb. 11: Karte (M = 1:5000) mit Schema der Versuchsfläche

Quelle: Kreis Soest (2001), überarbeitet



Abb. 12: Luftbild der Feldversuchsfläche (Jun. 1999)

Die ca. 3 ha große Versuchsfläche bestand demnach aus einer dreifeldrigen (Winterraps - Winterweizen – Wintergerste) und einer zweifeldrigen (Mais - Winterweizen) Fruchtfolge mit insgesamt 5 gleich großen Teilflächen (0,3 ha/Kultur). Die eigentliche Anbaufläche hat eine Ausdehnung von 1,5 ha. Zur besseren Befahrbarkeit des übrigen Randbereiches der Fläche ist die Einsaat einer handelsüblichen Klee-Gras-Mischung vorgenommen worden. Der Randbereich hatte die Funktion eines Vorgewendes und musste großzügig ausfallen, da er der produktionstechnischen Arbeitsbreite der Maschinen und Geräte des Landwirtes anzupassen war.

5.2.1.2 Bodenbewirtschaftung und Bodenbearbeitungsvarianten

Der zweite Versuchsfaktor ist die Bodenbearbeitung. Es werden drei unterschiedliche Varianten untersucht: Die konventionelle Bestelltechnik mit jährlich wendender Pflugfurche, die konservierende Bestelltechnik mit nicht wendender flacher Bodenbearbeitung (Mulchsaat) vor der Aussaat und die Direktsaattechnik ohne jegliche Bearbeitung des Bodens. Für die Aussaat von Mais ist ein

mulch- und direktsaatfähiges Maislegegerät eingesetzt worden, das im Versuchsgut Welter-Merklingen zu Verfügung stand. Die Aussaat von Winterraps und Wintergetreide in der Pflug- und Mulchsaatvariante erfolgte durch die übliche Saattechnik des Landwirtes, während für Direktsaat ebenfalls eine versuchsguteigene Drillmaschine eingesetzt worden ist.

1. Pflugvariante: Vor jeder Aussaat wurde gepflügt, wobei ein Krumenpacker zum Einsatz kam. Die Saatbettbereitung erfolgte mit Kreiselegge und Walze (1 bis 2 Überfahrten), die Aussaat mit Drillmaschine bzw. Einzelkornlegegerät.
2. Mulchvariante: Vor jeder Aussaat ist eine Bodenlockerung bis ca. 12 cm Tiefe mit einer Spatenrollegge durchgeführt worden. Für die Saatbettbereitung ist eine Kreiselegge eingesetzt worden. Die Aussaat erfolgte mit einer Scheibendrillmaschine bzw. mit einem Einzelkornlegegerät mit Schneidscheiben.
3. Direktsaat: Nach der Ernte wurde eine Behandlung der Flächen mit einem Totalherbizid vorgenommen. Die Aussaat erfolgte durch eine Direktsaatmaschine mit Scheibenschar in die Reste der Vorfrucht, grundsätzlich ohne Stoppel- und Bodenbearbeitung.

Die Bearbeitungsrichtung erfolgte 90° zu den Höhenlinien (Isohypsen), also mit dem Gefälle des Hanges. Sie entsprach der ortsüblichen Bearbeitung des ansässigen Landwirtes. Die Erträge der Erntejahre 1998 – 2002 für jede Bearbeitungsvariante und für alle Anbaukulturen sind in der Tabelle 4 im Anhang angegeben.

5.2.2 Angewandte Herbizide und ihre Eigenschaften

Für den Feldversuch wurden Herbizide verwendet, die in der landwirtschaftlichen Praxis weit verbreitet waren bzw. noch sind (s. Tab. 5) und ein breites Spektrum an chemisch-physikalischen Eigenschaften aufwiesen. Dadurch konnten die Ergebnisse auf Wirkstoffe mit ähnlichen Eigenschaften (z. B. mit vergleichbarem Sorptionsverhalten) übertragen werden. Es sollten vor allem Wirkstoffe sein, die häufig in Grund- und Oberflächengewässer gefunden wurden. Da Herbizide mengenmäßig den größten Anteil der im Ackerbau eingesetzten PSM ausmachen, wurde nur diese Stoffgruppe untersucht.

Tab. 5: Ausgewählte Herbizide und ihre spezifischen Eigenschaften

Wirkstoff	Präparat	Wirkstoffmenge	Einsatzbereich	Sorption an Humus- und Tonbestandteile	K _{oc} -Wert (L/kg ⁻¹) n. UBA (2000)	Halbwertszeit (d) DT ₅₀ n. UBA (2000)
Chlortoluron	"Dicuran"	700 g/l	Getreide	mittel	210	60
Isoproturon	"IPU"	500 g/l	Getreide	gering	85	20
Metazachlor	"Butisan Top"	375 g/l	Raps	gering	80	10
Metolachlor	"Stentan"	250 g/l	Mais	hoch	250	40
Pendimethalin	"Stentan"	165 g/l	Mais	sehr hoch	> 16000	100
Terbuthylazin	"Stentan"	125 g/l	Mais	hoch	250	70

Quelle: eigene Darstellung nach DOMSCH 1992, UMWELTBUNDESAMT (UBA) 2000

5.2.2.1 Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin

Die in Tabelle 5 angegebenen Herbizide Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin besitzen spezifische Wirkungsweisen und zeigen in ihren Persistenzen und Sorptionseigenschaften gravierende Unterschiede.

Metolachlor [N-(2-Ethyl-6-methylphenyl)-N-(2-methoxy-1-methylethyl)-chloracetamid] ist ein reines Bodenherbizid und wird über die Pflanzenwurzeln aufgenommen. Es wird meistens im Voraufverfahren bei Mais und Zuckerrüben angewandt. Der Wirkstoff gehört zur Stoffklasse der Carbonsäureamide und beeinflusst vor allem das Zellwachstum von Pflanzen und kommt in Kombination mit weiteren boden- und blattaktiven Substanzen zum Einsatz (DOMSCH 1992, RÖDEL et al. 1999, AKKAN et al. 2003). Seit dem Jahr 2002 ist Metolachlor durch den Wirkstoff s-Metolachlor ersetzt worden. Der bis dahin angewandte Wirkstoff Metolachlor wird seit 2002 nicht mehr hergestellt. Das Präparat "Stentan" hat seit diesem Zeitpunkt eine neue Auflage bekommen und darf daher nicht mehr verwendet werden (LWK-WL 2002). Bei mittleren K_{oc}-Werten (s. Tab. 5) besitzt Metolachlor Sorptions-eigenschaften, die eine bevorzugte Verlagerung sowohl im Wasser als auch im Sediment vermuten lassen.

Pendimethalin [N-(1-Ethylpropyl)-3,4-dimethyl-2,6-dinitroanilin] gehört zur Gruppe der 2,6-Dinitroaniline. Es wird als selektives Boden- und Blattherbizid im Voraufverfahren in Mais und Getreide, sowie bei Wintergetreide im Nachaufverfahren bis zum 3-Blattstadium der Wildkräuter angewendet. Es verhindert die Samenkeimung, zerstört die Keimlinge oder bereits aufgelaufene Pflanzen unerwünschter Kräuter und Gräser (GEISELHART 1994). Mit einem K_{oc}-Wert über

16000 (vgl. Tab. 5) gehört dieser Wirkstoff zu den stark sorptiv gebundenen Stoffen und müsste fast ausschließlich mit dem Erosionssediment ausgetragen werden.

Terbuthylazin [2-Chlor-4-ethylamino-6-tert.butylamino-s-triazin] gehört zur Gruppe der symmetrischen Triazine (s-Triazine). Die Wirkung erfolgt über Blatt und Boden. Sie beruht auf der Hemmung der Photosynthese und anderer enzymatischer Prozesse in der Pflanze. Der Wirkstoff wird vorwiegend in Mais zur Wildkraut- und Grasbekämpfung in Kombination mit weiteren Herbiziden wie Metolachlor und Pendimethalin eingesetzt (DÜRING u. HUMMEL 1994). Nach den in Tabelle 5 gezeigten Sorptionseigenschaften hat Terbuthylazin ähnliche Eigenschaften wie Metolachlor. Es müsste daher gleichermaßen gelöst und sedimentgebunden verlagert werden.

5.2.2.2 Metazachlor

Der vor allem im Winterraps eingesetzte Wirkstoff Metazachlor [N-(2,6-Dimethylphenyl)-N-(1H-pyrazolylmethyl)-chloracetamid] kommt im Voraufbau oder im frühen Nachaufbau gegen Wildkräuter und Gräser zum Einsatz (DOMSCH 1992, RÖDEL et al. 1999). Er wirkt als blattaktive Substanz auf das Wachstum der Pflanzen und gehört daher nicht zu den Bodenherbiziden wie Metolachlor. Die Applikation erfolgt in der Regel zum frühen Nachaufbau der Wildkräuter. Terminlich frühere oder spätere Applikation hat meistens nicht die gewünschte Wirkung (LWK-WL 2002). Der K_{oc} -Wert sowie die DT_{50} -Zeit (s. Tab. 5) weisen auf eine hohe Löslichkeit und eine schnelle Abbaugeschwindigkeit hin.

5.2.2.2 Chlortoluron und Isoproturon

Die Getreideherbizide Isoproturon [N-(4-Isopropylphenyl)-N',N'-dimethylharnstoff] und Chlortoluron [3-(3-Chlor-4-methylphenyl)-1,1-dimethylharnstoff] sind Photosynthesehemmer. Sie gehören zur Herbizidgruppe der Phenylharnstoffe und werden als selektive Vor- und Nachaufbauwirkstoffe gegen Gräser und einjährige Wildkräuter in Winter- und Sommergetreide appliziert (KLIMSA 1996; LWK-WL 2002). Sie wirken beide sowohl im Boden über die Wurzeln als auch über die Blattmasse der Pflanzen. Sie unterscheiden sich deutlich in ihren Sorptionseigenschaften und der Persistenz (vgl. Tab. 5). Daher müsste Chlortoluron in der gelösten und festen Phase des Oberflächenabflusses zu finden sein, während Isoproturon vornehmlich im Wasser zu finden sein dürfte. Der Wirkstoff Chlortoluron hat bestimmte Wasserschutzauflagen und ist nicht besonders sortenverträglich. Dies führte zu einer sukzessiven Abnahme in der Anwendung des Wirkstoffes seit 1999. Mittler-

weile ist der Stoff durch sortenverträglichere Wirkstoffe bei gleichem Wirkungsspektrum ersetzt worden und findet kaum noch aktuelle Anwendung im Ackerbau (LWK-WL 2002).

5.2.2.3 Applikation der Herbizide im Feldversuch

Für die Versuchsphasen mit Mais zwischen 1998 - 2002 ist das im Handel erhältliche Präparat "STENTAN", das die 3 Wirkstoffe Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin beinhaltet, mit Hilfe einer Parzellenspritze in jeweils gleicher Aufwandmenge appliziert worden. Die einmaligen Anwendungen erfolgten im Voraufbauverfahren im Frühjahr, ca. 8 - 10 Tage nach der Maisaussaat.

In den Versuchsphasen mit Winterraps zwischen 1997 - 2001 wurde mit einem praxisüblichen Spritzgerät des ansässigen Landwirtes im frühen Nachaufbauverfahren, ca. 10 - 25 Tage nach dem Saattermin, das Präparat "BUTISAN TOP" (Metazachlor) in einer einmaligen Anwendung appliziert. Bei gleicher Anwendungstechnik sind die Getreideherbizide Chlortoluron und Isoproturon mit den Präparaten "DICURAN" und "IPU" während der Versuchsphasen mit Winterweizen zwischen 1997 - 2002 im Nachaufbauverfahren, ca. 30 - 40 Tage nach der Saat, appliziert worden. In Tabelle 6 sind die jeweiligen Präparate mit ihren Wirkstoffen sowie die dazugehörigen Aufwand- und Wirkstoffmengen angegeben. Aus den in Kapitel 5.2.2.3 genannten Gründen ist im letzten Versuchsjahr 2001/2002 auf die Anwendung von Chlortoluron im Winterweizen verzichtet worden.

Tab. 6: Aufwand- und Wirkstoffmengen der für die untersuchten Ackerkulturen applizierten Herbizide

Kultur	Mais	Winterraps	Winterweizen / -gerste
Herbizid	"STENTAN"	"BUTISAN TOP"	"DICURAN" / "IPU"
Aufwandmenge	6 l/ha	2 l/ha	0,75 l/ha / 3 l/ha
Wirkstoffe	a) Metolachlor b) Pendimethalin c) Terbutylazin	Metazachlor	a) Chlortoluron b) Isoproturon
Wirkstoffmenge	a): 1450 g/ha b): 990 g/ha c): 750 g/ha	750 g/ha	a): 525 g/ha b): 1500 g/ha

5.2.3 Angewandte Düngemittel

Der Einsatz der pflanzenbaulich notwendigen Düngemittel richtete sich nach den für die jeweiligen Kulturen üblichen Praxismengen, die dem Standort nach $N_{\min}$ -Bestimmung angepasst wurden.

Aufgrund der Befahrbarkeit der Versuchsflächen und des Versuchsaufbaues ist auf die Anwendung von organischen Düngemitteln verzichtet worden, es wurden nur mineralische Dünger eingesetzt. Die Düngergaben wurden, mit Ausnahme der Unterfußdüngung beim Mais, ausschließlich mit Hilfe der üblichen Technik des Landwirtes ausgebracht.

Im Versuch mit Mais ist während der Aussaat eine Unterfußdüngung mit Diammoniumphosphat (DAP) und, ab Ende Mai bis Anfang Juni, eine Stickstoffgabe mit Ammoniumnitrattharnstofflösung (AHL) erfolgt. Die Berechnung des N-Sollwertes erfolgte Ende Mai nach der Ermittlung des $N_{\min}$ -Gehaltes im Boden (0 - 60 cm) abzüglich der N-Beigabe durch die Unterfußdüngung (s. Tab. 3 im Anhang).

Beim Winterraps erfolgte, nach $N_{\min}$ -Bestimmungen (0 - 60 cm) im Spätsommer und Frühjahr, eine 1. N-Düngung mit AHL im Früherbst vor dem Vierblattstadium. Die 2. und 3. N-Düngung erfolgte im Frühjahr (Februar bis Anfang April) (vgl. Tab. 1 im Anhang).

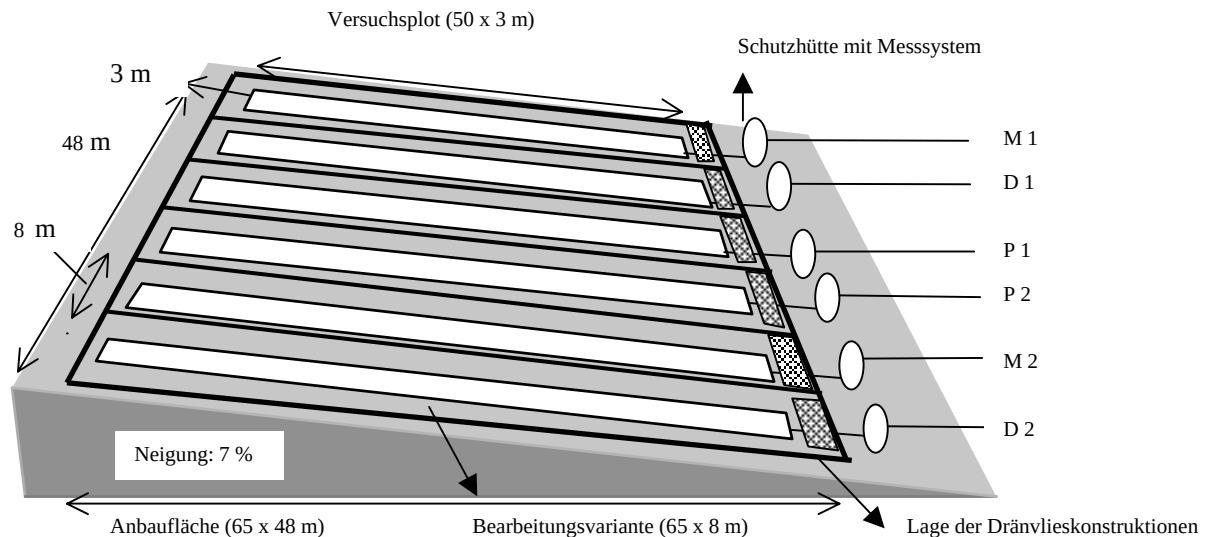
Für das Wintergetreide sind nach $N_{\min}$ -Bestimmung (0 - 60 cm) 3 N-Düngergaben im Entwicklungsverlauf im Frühjahr angewandt worden, wobei die ersten beiden Düngungen bis einschließlich der Schossphase (EC 21 - 32) des Wintergetreides erfolgten. Die Höhe der 2 Teilgaben richtete sich nach der Bestandsentwicklung und der Verteilung des mineralischen N im Bodenprofil. Die 3. und letzte N-Düngergabe erfolgte als Spätdüngung im Mai (EC 39) und wurde spätestens im Entwicklungsstadium des Ährenschiebens (EC 51) abgeschlossen. In Tabelle 2 im Anhang sind die notwendigen Düngemittel und -mengen sowie die dazugehörigen Düngetermine angegeben.

5.2.4 Aufbau der Versuchsplots und -technik

Nach einer Vermessung der ca. 3 ha großen Versuchsfläche im Sommer 1997 begannen die erforderlichen Aufbauarbeiten. Um die Zugänglichkeit der Fläche zu gewährleisten, wurde der noch nicht druschreife Winterweizen Anfang August gehäckselt. Auf der Fläche mussten 3 unterschiedliche Bodenbearbeitungsvarianten mit integrierten "Erosionsmessparzellen" (Versuchsplots) zu jeder Ackerkultur eingerichtet werden, an deren Ende ein Messsystem zur Registrierung von Oberflächen- und Zwischenabfluss sowie Dränageabflüssen installiert wurde.

5.2.4.1 Registrierung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf Großparzellen

Das Blockdiagramm in Abbildung 13 zeigt ein Schema der angelegten Feldversuchsfläche.



M 1: Mulchsaatvariante

D 1: Direktsaatvariante

P 2: Pflugvariante

P 2 – D 2: Wiederholung

Abb. 13: Schema für die Anbaufläche einer Ackerkultur auf der Versuchsfläche mit Bodenbearbeitungsvarianten, Versuchsplots und Dränvlieskonstruktionen

Auf der zur Verfügung stehenden Feldversuchsfläche sind in Anlehnung an die Fruchtfolgen, mit den zu untersuchenden Ackerkulturen, insgesamt 5 gleich große Anbauflächen (5 x 0,33 ha) eingemessen worden. Innerhalb einer Anbaufläche erfolgte eine weitere Unterteilung in 6 gleich große Teilflächen (8 x 65 m = 520 m²) für die 3 untersuchten Bestelltechniken (Bodenbearbeitungsvarianten). Jede Variante ist in zweifacher Wiederholung angelegt worden, wobei das Breitenmaß einer Variante sich an der produktionstechnischen Arbeitsbreite der Geräte des mitwirkenden Landwirtes orientierte. Innerhalb der Wiederholung einer Variante wurden Großparzellen (3 x 50 m) als Versuchsplots ("Erosionsmessparzellen" mit Zink-Blechstreifen (3000 x 200 x 1 mm) abgegrenzt, indem die Bleche ca. 10 cm tief in den Boden eingesetzt wurden. Die Abbildung 5 und 7 – 12 im Anhang zeigen die Versuchsplots mit Ablaufsystem und das Messsystem im Bereich der Schutzhütten.

Für die Installation von Messsystemen zur automatischen Registrierung des Oberflächenabflusses und Bodenabtrages sind am hangabwärts gerichteten Ende einer jeden Anbaufläche 6 Erdaushübe (30 Gruben) mittels Reifenbagger vorgenommen worden. Zur Stabilisierung dieser "Messgru-

ben" wurden Holzverschalungen aus Fichtenholz gebaut und in der Grube zusammengefügt. Die Verschalungen dienten dem Schutz des Messsystems gegen Witterungseinflüsse. Die Abdeckung der Gruben bestand aus Onduline-Dachlatten-Konstruktionen. Das Verschalungsmaß für die Pflug- und Mulchvariante betrug 2,50 x 2,20 m und für die Direktsaatvariante 2,50 x 1,00 m. Die unterschiedliche Größe hing mit der Versuchsmethodik zusammen, da in den Direktsaatvarianten keine automatische Registrierung von Abflussereignissen stattfand. Dort ist, in Erwartung sehr geringer Erosionsereignisse, auf eine Installation der Messsysteme verzichtet worden. Um aber eine Registrierung von möglichen Gesamtabflüssen vornehmen zu können, ist ein Auffangtank mit bis zu 750 l Fassungsvermögen in die jeweils zur Direktsaatvariante gehörenden "Messgrube" aufgestellt worden.

Am unteren Ende der Versuchsplots ist jeweils ein Ablaufsystem eingerichtet worden, das aus einem gekröpften Edelstahlblech (3000 x 350 x 0,8 mm) und einer verzinkten Ablaufrinne (Ø 80 mm) bestand. Das Ablaufblech aus Edelstahl wurde so in den Boden eingelassen, dass es das natürliche Gefälle nicht beeinträchtigte. Die Ablaufrinne wurde mit einem 2 %-igen Gefälle quer zur Hangneigung montiert. An ihrem Ende befand sich ein Ablaufstutzen mit Winkelrohr (Ø 50 mm). Die Ablauföffnung von der Rinne zum Rohr wurde mit verzinktem Maschendraht bedeckt, um einer Verstopfung des Rohrsystems, z. B. durch eingewaschenes Stroh oder einwandernde Mäuse, entgegenzuwirken. Die Ablaufrinne wurde mit einem Zinkblechstreifen abgedeckt, um ein direktes „Hineinregnen“ zu verhindern.

Die verschalteten Schutzhütten ("Messgruben") lagen ca. 16 m unterhalb der Versuchsplots, um die einzelnen Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht zu stören. Die Verbindung zwischen Ablaufrinne und Messgrube ist durch ein verzinktes und gefalstes Fallrohr (Ø 50 mm) hergestellt worden. Das Rohr verlief in einem ca. 20 cm tiefen und Handspaten breiten Graben in Gefällerrichtung von der Ablaufrinne bis zur Schutzhütte. Am Ende der Rohrleitung - im Bereich des Zulaufes in die Schutzhütte - wurde ein Verteilerkasten mit Sieb angebracht, der den ankommenden Oberflächenabfluss auffing. Vom Verteilerkasten konnte das Wasser über zwei Ausläufe durch die Verschalungswand zum Messsystem gelangen. Diese Verbindung wurde durch 2 flexible PE-Schläuche gewährleistet. Ein stark vereinfachtes Schema in Abbildung 14 zeigt die Funktionsweise der Messtechnik.

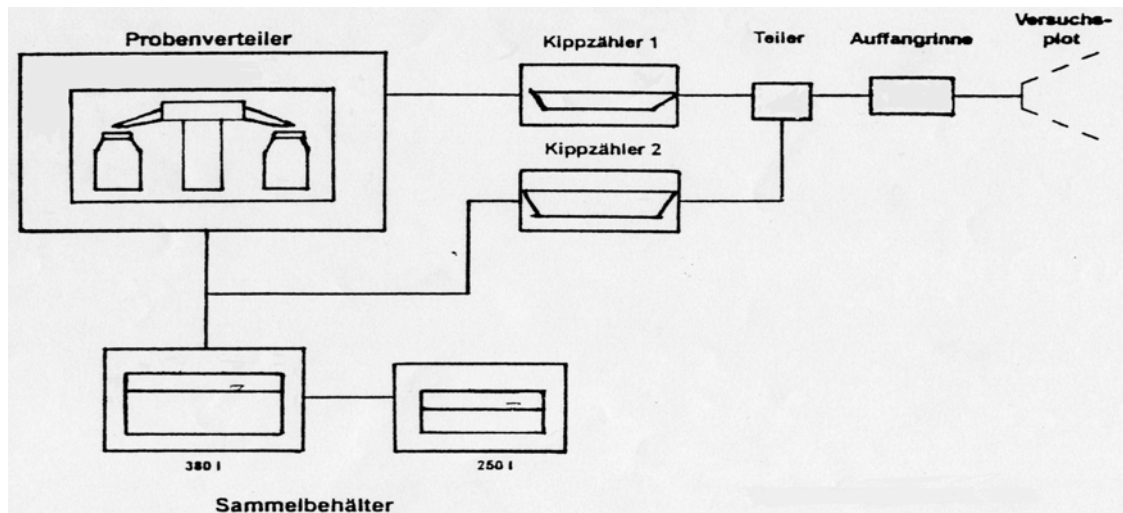


Abb. 14: Schema zur Funktionsweise der Messtechnik. Quelle: SEYFAHRT et al. (1993)

Für das Auffangen von Oberflächenabfluss aus den Versuchsplots der Direktsaatvarianten ist kein Verteilerkasten benötigt worden. Am Ende der verzinkten Rohrleitung, die in die Schutzhütte geführt wurde, ist ein flexibler PE-Schlauch verbunden worden und führte in den Tank.

Das von der Firma UGT in Müncheberg entworfene Messsystem bestand aus einem Edelstahlkessel, in dem sich 24 Probenflaschen (à 1000 ml) befanden, aufgeteilt in einen inneren und äußeren, ringförmigen Flaschenträger zu je 12 Fassungen für die Flaschen. Im Zentrum des Kessels befand sich ein drehbarer Verteilerarm sowie eine am Kesselrand montierte Kippwaage zur Probenregistrierung und -dosierung. Der Verteilerarm (Drehantrieb) wurde über einen Data Logger gesteuert. Die Kippwaage hatte ein Fassungsvermögen von 1 l und fing Abflussmengen solange auf, bis ihre Kapazität (8 l / min) überschritten wurde. Kapazitätsbeeinflussend war hierbei die Fließstrecke von der Kippwaage zur Sammelflasche und die Zeit zum Positionswechsel des Verteilerarms zur nächsten Flasche (SEYFAHRT et al. 1993). Bei hoher Abflussrate von mehr als 8 l / min wurde der Abfluss in eine zweite, als Bypass funktionierende Kippwaage mit 3 Liter Fassungsvermögen und einer Kapazität von mehr als 30 l / min geleitet. Von dort floss die Suspension direkt in den Auffangtank. Die Regulierung der Zuflussmengen zu den einzelnen Kippwaagen erfolgte über einen Steuerschieber.

Das Messsystem war in der Lage, Abflüsse über die Anzahl der Kippungen automatisch zu registrieren und den Verteilerarm im Kessel zu steuern. Die erste Kippung initiierte die Software gesteuerte Probennahme. Ein Signalgeber schaltete die elektronische Steuerung ein, so dass entsprechend des eingegebenen Programmes die Probennahme mit Befüllung der Flaschen erfolgte. Durch ein motorisch angetriebenes Achsrohr (Schwenkantrieb) mit 3 im Winkel von 120 ° versetzten Auslaufrichtern konnten, je nach voreingestelltem Probennahmeintervall, zuerst die Flaschen

des äußeren Ringes und bei weiteren Abflussmengen, die Flaschen des inneren Ringes befüllt oder über den Auslauf in den Auffangtank geführt werden (SEYFAHRT et al. 1993). Das Probenahmeintervall konnte über die Software (Laptop mit Verbindungskabel zum Datalogger) geändert werden. Nach jedem Niederschlagsereignis wurde der Probenehmer wieder in die Startposition zurück gebracht. Der Speicher mit den Daten zur Abflussmenge und -intensität konnte gelesen und wieder gelöscht werden. Datum und Uhrzeit des Dataloggers wurden nach jedem Ereignis mit der Datums- und Uhrzeitanzeige des Laptop's angeglichen.

Die notwendige Energieversorgung wurde über 12 Volt-Akku's gewährleistet, die nach regelmäßiger Kontrolle bei Bedarf ausgewechselt wurden. Für die Messphase in einer Ackerkultur sind insgesamt 4 Messsysteme (2 x Pflug- und 2 x Mulchvariante) benötigt worden. Die Messphasen richteten sich nach den besonders erosionsanfälligen Zeiten der Kulturen zwischen Aussaat und voranschreitender Wachstumsphase mit erhöhter Bedeckung des Bodens durch die Kulturpflanzen.

Für die Untersuchungen der einzelnen Ackerkulturen bedeutete das:

- Mais ► Messphase: ca. Mitte Mai bis Ende Juli
- Winterraps ► Messphase: ca. Mitte August bis Mitte Oktober
- Winterweizen ► Messphase: ca. Mitte Oktober bis Ende März

Die einmaligen Applikationstermine der Herbizide lagen daher, mit Ausnahme für Winterweizen des Jahres 1998/99, immer zu Beginn einer Messphase. Witterungsbedingte Abweichungen in der Bewirtschaftung führten zu geringfügig geänderten Zeitabläufen der Messphasen. Der Aufbau der Versuchplots erfolgte direkt nach vorangegangener Bodenbearbeitung und Aussaat der untersuchten Kulturen. Nach jeweiliger Beendigung einer Messphase wurden alle Versuchplots, inklusive der Ablauf-, Rohr- und Messsysteme, entfernt bzw. demontiert und dem Rotationsprinzip der Ackerkulturen folgend für jedes Versuchsjahr erneut installiert.

5.2.4.2 Zwischenabflussmessung mittels Dränvlieskonstruktion

Die Installation der Versuchsanlage zur Zwischenabflussmessung erfolgte im Sommer 1999. Die dafür geeignete Anbaufläche mit durchschnittlich 80 cm Bodenprofil gehörte zur Fruchtfolge Winterraps - Winterweizen - Wintergerste. Nach dem Rotationsprinzip der Fruchtfolge konnte, für die zum Messprogramm gehörenden Kulturen Winterraps und Winterweizen, mindestens eine Mess-

periode durchgeführt werden. Die dafür vorgesehenen Stellen lagen ca. 1 m unterhalb (hangabwärts) der für jede Variante eingerichteten Versuchsplots (s. Abb. 13) in zweifacher Wiederholung.

Das Material des Drainagevlieses (Produkt: CKL 15, "Enkadrain" der Fa. AKZO NOBEL in Wuppertal) bestand aus einem permeablen Nylonvlies mit einer Porenweite von 150 μm . Die Rückseite bildete eine nicht permeable Folie aus einer Nyloninnenseite und einer verstärkten Außenseite aus Polypropylen (PP), so dass möglicher Zwischenabfluss nur von der Hang zugewandten, wasserdurchlässigen Seite aufgefangen werden konnte. Zwischen diesen beiden Schichten der Drainagematte lag ein 15 mm starker Drainagekern, bestehend aus einem Nylongeflecht, in dem das Wasser perkolieren konnte (s. Abb. 15).

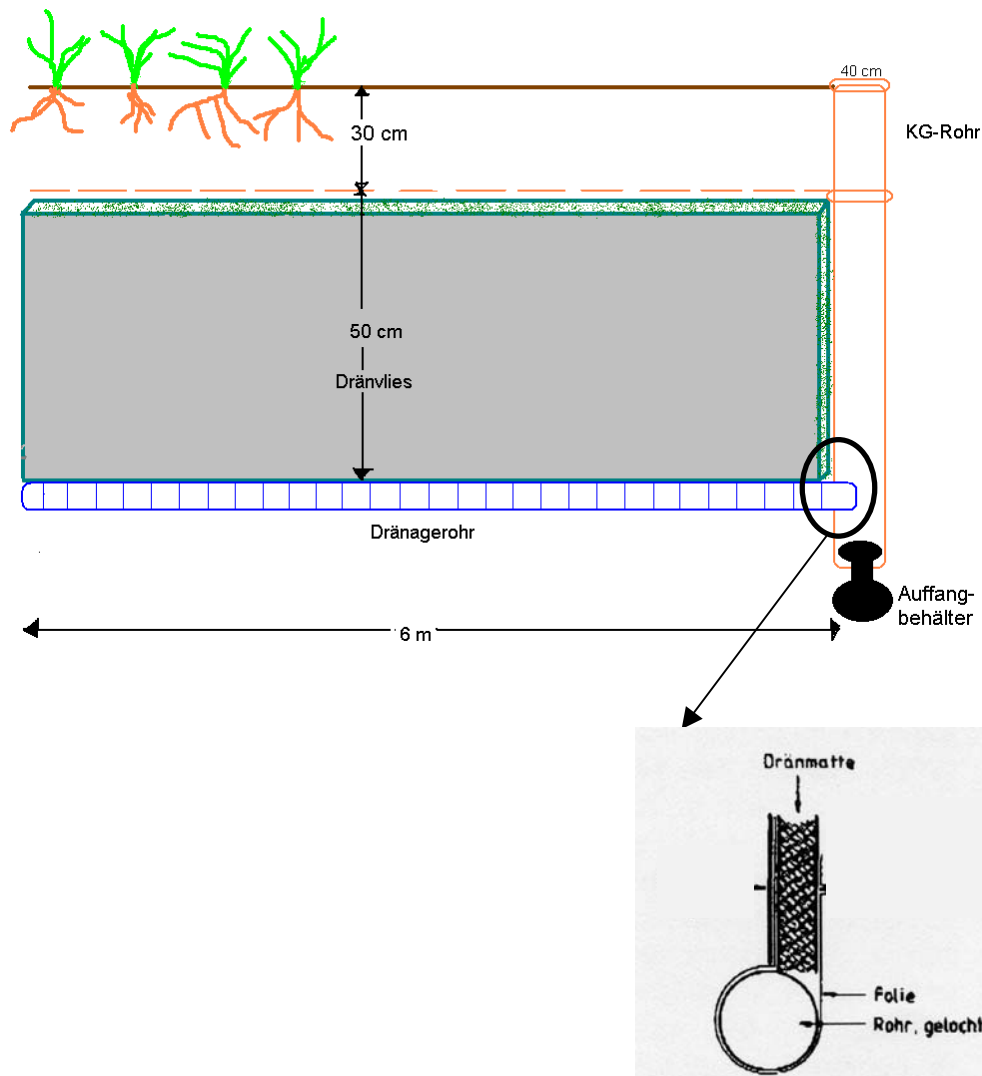


Abb.15: Schematische Darstellung der Erfassung von Zwischenabfluss mittels Drainagevlies

Die Drainagematte (6000 x 500 x 15 mm) wurde unterhalb des humosen Oberbodens (Pflugsohle) ab ca. 3 cm Bodentiefe bis zu einer Tiefe von 80 cm vertikal an der Profilwand befestigt. An der

Unterseite ist ein der Mattenlänge entsprechendes geschlitztes Dränagerohr aus Polyethylen (PE), durch eine 0,5 mm starke PE-Folie geschützt, angebracht worden. Das Dränagerohr führt mit einem 2 % igen Gefälle in ein 1,25 m langes KG-Rohr ($\varnothing$ 400 mm) aus PVC, in dem ein Auffanggefäß aus PE-Material stand (vgl. Abb. 15).

Zum Einbau des Vlieses mussten auf einer Gesamtlänge von 48 m, entsprechend der Breite der Anbaufläche, jeweils 6 x 6 m lange und ca. 1 m tiefe (analog zur jeweiligen Bearbeitungsvariante) Gräben gezogen werden (s. Abb. 13), schmal genug, um das Bodengefüge möglichst wenig zu beeinträchtigen, breit genug, um eine gleichmäßige Befestigung des Vlieses an der Bodenprofilwand zu gewährleisten. Nach jedem Graben schloss sich eine 1 m breite Unterbrechung an, um eine Abgrenzung der jeweiligen Wiederholungen einer Variante zu erreichen. Des Weiteren mussten die KG-Rohre am Ende der Versuchsplots ca. 1 m tief in den Boden eingesetzt werden, in die das Ende des Vlieses durch ausgesägte Schlitze hineinragte und die Auffanggefäße positioniert werden konnten (vgl. Abb. 15). Die erwähnten KG-Rohre ragten etwa 10 - 20 cm aus dem Boden und wurden mit einem stabilen PVC-Muffendeckel versehen. Dieser konnte zur Entleerung der Auffanggefäße abgenommen werden.

Nach Beginn der Messphase im Sommer 1999 wurden 3 l-Gefäße aus PE-Material unter die Ausläufe der Dränagerohre gestellt. Die Proben wurden mittels einer umfunktionierten Handpumpe in 1 l-Flaschen abgesaugt, das Probenvolumen ermittelt und eine 500 ml-Probe gesammelt. In einem einwöchigen Rhythmus wurden die Auffanggefäße in den 400 mm KG-Rohren entleert. Bei andauernden Niederschlagsereignissen sind die Entnahmestellen in einem ein- bis zweitägigen Rhythmus kontrolliert worden.

5.2.4.3 Erfassung von Dränageabflüssen

Bereits beim "Ausheben" der Gruben zur Installierung der Messtechnik ist festgestellt worden, dass auf 2 der 5 Anbauflächen Dränagestränge im Abstand von 15 m diagonal durch die Bodenbearbeitungsvarianten mit den eingegrenzten Versuchsplots laufen. Die Dränagestränge enden im Bereich der Schutzhütten, was auf einen ehemaligen Graben als Vorfluter hinwies. Diese Annahme wurde durch die Aussagen des ansässigen Landwirtes bestätigt. Ein weiterer Vergleich der Fläche mit älteren topographischen Karten vor der Gebietsreform 1975 zeigte einen Graben in dem angenommenen Bereich.

Um die Dränagen sinnvoll in das Messprogramm einbinden zu können, wurden sie an den Grenzen der Bodenbearbeitungsvarianten aufgegraben, dort die Wasserzufuhr unterbrochen und je-

weils am oberen und unteren Drainagestrang Entnahmestellen eingerichtet. Sie bestanden aus einem vertikal bis zum Kalksteinuntergrund eingelassenen 400 mm-KG-Rohr, das zum Drainagerohrauslauf hin mit einer entsprechenden Öffnung versehen wurde. Oberhalb des Drainagestranges der oberen Entnahmestellen wurden keine Drainagerohre gefunden, so dass das Einzugsgebiet für die oberen Drainageabschnitte nicht genau eingegrenzt werden konnte. Bei einem Abstand von 8 m zwischen zwei Entnahmestellen und 15 m zwischen den Drainagesträngen, entspricht das Einzugsgebiet der unteren Drainageabschnitte einer Fläche von 120 m². In Abbildung 16 ist die Lage der erfassten Drainagestränge innerhalb der Versuchsfläche in der Kulturfolge mit Winterraps schematisch dargestellt.

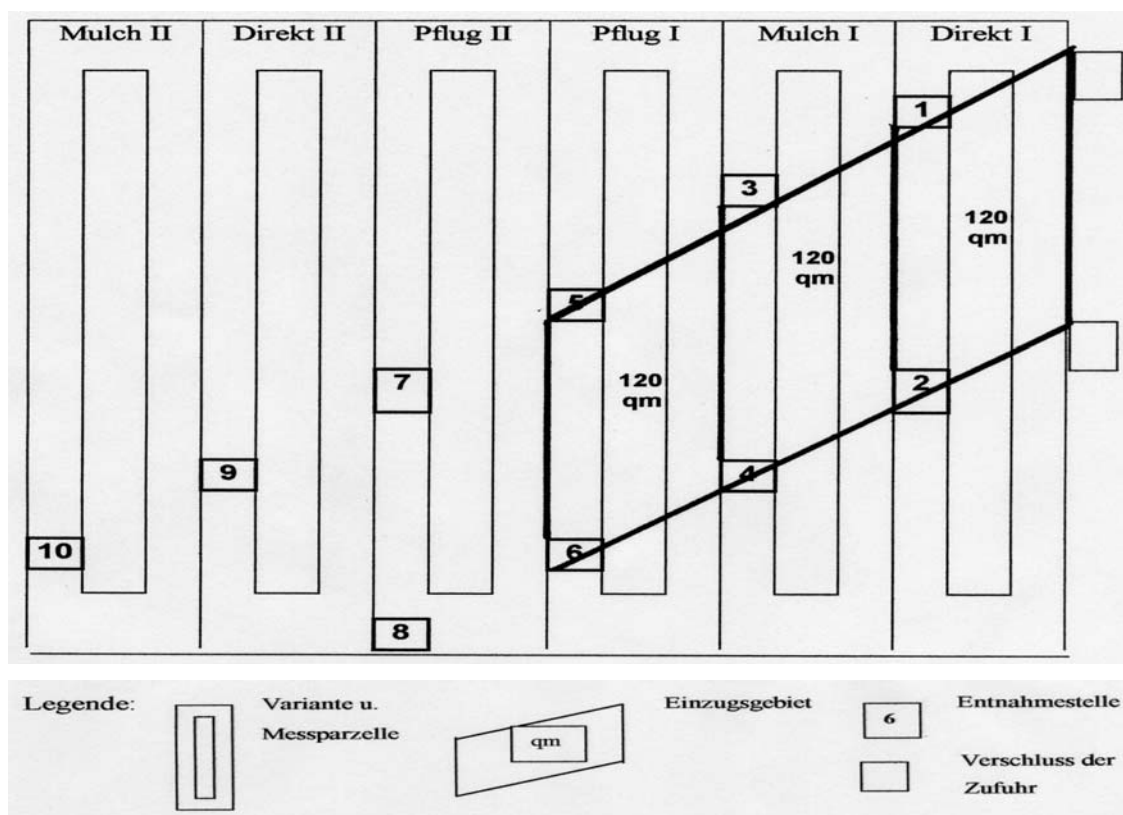


Abb. 16: Lage der Drainagestränge auf der Anbaufläche mit Winterraps

Die nummerierten Quadrate stellen Entnahmestellen der einzelnen Drainageabschnitte auf den jeweiligen Bearbeitungsvarianten dar. Für die unterbrochenen Ausläufe 2, 4 und 6 konnten kleine Einzugsgebiete definiert werden, da die oberhalb liegenden Drainageabschnitte 1, 3, 5, 7 und 8 das Wasser aus der undefinierten Fläche im oberen Bereich der Parzellen aufnahmen. Mit den Abschnitten 2, 4 und 6 konnten alle Bearbeitungsvarianten beprobt werden. Dazu erfolgte je nach Niederschlagsereignis eine regelmäßige Probennahme an den Entnahmestellen. Die in Abbildung 16 aufgeführten Entnahmestellen Pflug II (7 u. 8), Direkt II (9) und Mulch II (10) sind aufgrund ihrer Lage zu den Drainagesträngen nicht berücksichtigt worden, da die Einzugsgebiete für den unteren Strang außerhalb der Bearbeitungsvarianten lagen.

Während eines Abflussereignisses wurden an den jeweiligen Entnahmestellen der Drainageabschnitte zweimal am Tag, in exakt eingehaltenen Zeitabständen, 2 kurz aufeinanderfolgende Wasserproben entnommen und die Abflussrate bestimmt.

5.2.4.4 Erfassung von Niederschlägen

Um die Daten des UGT-Messsystems interpretieren und einordnen zu können, sollten exakte Niederschlagsdaten für den Versuchsstandort erfasst werden. Zu diesem Zweck wurde eine Klimastation der Firma ADOLF THIES GmbH, METEOROLOGIE UND UMWELTMESSTECHNIK auf der Versuchsfläche an einem 2,70 m hohen und verzinkten Mast aus Metall installiert (s. Abb. 6 im Anhang), die folgende Klimaelemente im Sekunden-Takt maß:

- a) Niederschlag (mm)
- b) Temperatur in 2 m Höhe (°C)
- c) Relative Luftfeuchte (%)
- d) Windrichtung und -geschwindigkeit (0 - 360° / m/s)

Die automatische Erfassung des Niederschlags erfolgte mit Hilfe eines Ombrometers in ca. 0,65 m Höhe über der Erdoberfläche. Das Ombrometer bestand aus einem verzinkten Gehäuse mit 26 cm³ Inhalt und einem konisch zulaufenden Boden, in dessen Zentrum sich ein Auslauf befand. Fallendes Niederschlagswasser sammelt sich im Behälter und lief durch den zentralen Auslauf zu einer umgerechnet 0,01 mm fassenden Kippwaage mit Reedkontakt zur Signalgebung an einen Datalogger. Aufgrund eines voreingestellten Mess- und Speichertaktes errechnete der Logger aus den Einzelwerten die Mittelwerte des gefallen Niederschlages pro Zeiteinheit. Aufgrund dieser hohen Auflösung ermöglichte die Klimastation die Registrierung von Niederschlagsintensitäten in mm/min. Es wurde ein 5-sekündiger Messtakt bei einminütigem Speichertakt eingestellt. In den Zeiträumen zwischen Dezember bis April wurde der Speichertakt auf 5 Minuten erhöht, da in dieser Zeit nicht mit Starkregenereignissen zu rechnen war. Temperatur und Luftfeuchte sind über Thermo- und Hygrometer gemessen worden, die sich an einem befestigten T-Träger des Stationsmastes befanden. Jede Messung (Messtakt/min) ist mit Hilfe eines Signalgebers an den Logger zur Speicherung übertragen worden. Am oberen Mastende maß eine montierte Windfahne mit Schalenkreuzanemometer aus Aluminium die Windrichtung und -geschwindigkeit nach gleichem Messprinzip wie bei Temperatur und Luftfeuchte.

Alle Klimadaten wurden über den Datalogger erfasst und konnten mit Hilfe einer 256 Kilobyte fassenden Chip-Karte ("Memory Card") ausgelesen werden. Ein spezielles Lesegerät der Firma

THIES sowie eine dazugehörige Software (MEVIS T-LIGHT 2.0) diente der Übertragung von Wetterdaten auf einen PC. Die gewonnenen Daten waren für gängige Anwender-Software kompatibel, sie ließen sich statistisch auswerten und darstellen. Zur Energieversorgung gehörte ein 12 V-Akku im Gehäuse des Dataloggers. Er erhielt eine kontinuierliche Energiezufuhr über ein austariertes Solarpanel am T-Träger.

Die Klimastation wurde am 6. April 1998 in Betrieb genommen. Eine jährliche Wartung führte die Firma THIES GmbH durch. Die Niederschlagsdaten wurden mit einer in ca. 2 km entfernten Niederschlagsmessstation in der Ortschaft Menzel, ehrenamtlich durch einen ansässigen Landwirt für den deutschen Wetterdienst (DWD) betrieben, verglichen. Nach Berücksichtigung topographischer Gegebenheiten betrug die Abweichung der Klimastation im Jahresmittel ca. 3 - 5 % gegenüber den Werten der Messstation in Menzel. Die ermittelte Abweichung bezieht sich auf die Jahresniederschlagssummen und liegt im Bereich dessen, was für Klimastationen anderer Herkunft ebenfalls errechnet wurde (s. ZOLLFRANK 1995). Der Niederschlagsverlauf aller Versuchsjahre ist in den Tabellen 5 – 10 und den Abbildungen 13 – 18 im Anhang dargestellt.

5.2.5 Durchführung regelmäßiger Messreihen und Bodenprobennahmen im Feld

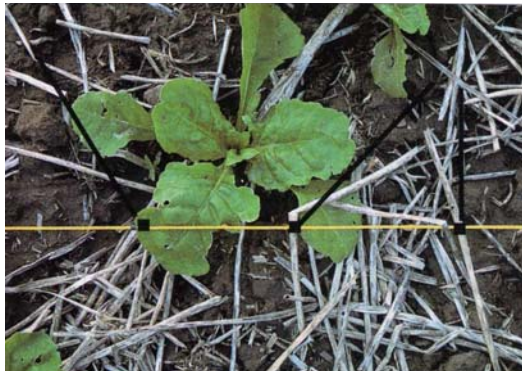
Zur Durchführung von Messreihen und Bodenprobennahmen im Feld sind Methoden angewandt worden, die zum Teil in anderen wissenschaftlichen Felduntersuchungen erprobt worden sind und den Versuchsfragestellungen angepasst waren.

5.2.5.1 Ermittlung aktueller Bodenbedeckungsgrade

Einer der erosionsbestimmenden Faktoren, der auch über den C-Faktor in die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG) nach SCHWERTMANN et al. (1990) einfließt, ist die Bodenbedeckung. Zur Bodenbedeckung allgemein zählten nicht nur die Pflanzen der angebauten Kultur, sondern auch die nicht eingearbeiteten Ernterückstände der Vorfrucht, z. B. nach konservierender Bodenbearbeitung (Mulchsaat) oder Direktsaat; des Weiteren nicht erwünschte Gräser und Kräuter, sowie den Boden bedeckendes anorganisches Material (Steine).

Zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades in den drei Varianten zwischen Saattermin und Beendigung der Messperiode wurde eine einfache Methode nach FRIELINGHAUS et al. (1998) und BRUNOTTE et al. (1999) angewandt. Mit dieser Methode ließ sich der Bedeckungsgrad in % der Bodenoberfläche für jeden Versuchsplot relativ genau bestimmen. Es wurde jedoch nicht m²-weise

ausgewertet, sondern mit Hilfe einer speziell präparierten Leine eine definierte Strecke ausgezählt. Diese Methode wurde 1997 vor allem in Kanada auf ca. 1500 ha Praxisflächen erprobt (FRIELINGHAUS et al. 1998). Hierfür ist eine 15 m lange stabile Leine in 100 gleich große Abschnitte geteilt worden. In Abständen von 15 cm wurden Markierungen von 5 mm Breite vorgenommen. Nur die Pflanzenteile werden gezählt, welche die Leine an den Markierungen schneiden. Nicht berücksichtigt werden dabei Pflanzenreste, die kleiner als 0,3 cm sind (s. Abb. 17 a und b).



a) gezählte Pflanzenteile



b) nicht gezählte Pflanzenteile

Abb. 17 a und 17 b: Gezählte und nicht gezählte Pflanzenteile bei der Zählmethode nach FRIELINGHAUS et al. (1998)

Die Zahl der Schnittpunkte mit der Leine entsprach dem aktuellen Bodenbedeckungsgrad in %. Für die 150 m² großen Versuchsplots in den Bearbeitungsvarianten ist die Anzahl der Zählwiederholungen auf 5 mal, bei gleichmäßiger Verteilung über die gesamte Parzellenlänge, als absolut ausreichend festgelegt worden. Die Mittelwerte sowie die Maximal- und Minimalwerte von Wiederholungen werden in die Auswertung miteinbezogen.

Die Zählungen wurden erstmals zum Winterrapsversuch des Jahres 1998 berücksichtigt und erfolgten 1 Tag nach Aussaat der Kulturen und weiter in 14-tägigem Rhythmus bis zur Beendigung einer jeden Messphase (s. Kap. 5.2.4.1). Darüber hinaus wurde nach jedem Erosionsereignis eine Zählung durchgeführt. Mit relativ geringem Aufwand ließ sich in kurzer Zeit die aktuelle Bodenbedeckung in den einzelnen Varianten ermitteln. Diese Methode wurde nach FRIELINGHAUS et al. (1998) durch zahlreiche Felduntersuchungen in punkto Genauigkeit mit den digitalen Bild- und Rasterverarbeitungen als durchaus vergleichbar eingestuft.

5.2.5.2 Bodenprobennahme zur Standortcharakterisierung und zum Abbauverhalten der angewandten Herbizide

Zur Standortcharakterisierung wurden Bodenproben aus den jeweils abgegrenzten Bodenhorizonten der "Profilgruben" als Mischprobe von jeder der 5 Teilflächen der Ackerkulturen entnommen, in PE-Beutel verpackt und gekühlt gelagert.

Um das Abbauverhalten einzelner Wirkstoffe im humosen Oberboden der Versuchsplots in den jeweiligen Bodenbearbeitungsvarianten aufzuzeigen, wurden in regelmäßigen Zeitabständen Bodenproben entnommen. Die Entnahmetermine lagen jeweils vor Applikation der Herbizide, sowie 1 Tag nach Applikation und anschließend im 14-tägigen Rhythmus bis 8 Wochen nach Applikation. Die Proben sind aus 0 - 5 cm (Stechzylinderprobe) Bodentiefe entnommen worden. Die Bohrkern wurden zu einer Mischprobe für jeden Versuchsplot vereinigt. In jedem Versuchsplot sind 18 Teilproben zu einer Mischprobe pro untersuchter Bodentiefe entnommen worden. Die aus den verschiedenen Tiefen gewonnenen Mischproben wurden vor Ort in PE-Beutel verpackt und im Anschluss der Probennahme in einer Gefriertruhe bei -25° C zwischengelagert.

Zur $N_{\min}$ -Bestimmung für eine fachgerechte Düngung sind im Frühjahr und Herbst, ebenfalls mit einem "Göttinger Besteck", Bodenproben aus 0 - 30, 30 - 60 und 60 - 90 cm Tiefe auf jeder Teilfläche einer Ackerkultur entnommen worden. Mit den erhaltenen Bodenproben ist hinsichtlich der Konservierung so Verfahren worden, wie nach der Gewinnung der Mischproben zur Standortcharakterisierung.

5.3 Durchführung von Laboranalysen

Die Laboranalysen zur Charakteristik des Bodenprofils sind in 2 ausgewiesenen Labors durchgeführt worden. Die Untersuchungen der bodenphysikalischen sowie -chemischen Parameter wie Skelettanteil des Feinbodens, Carbonatgehalt, pH-Wert und die Bestimmung der organischen Substanz wurden im Bodenlabor des Fachbereiches Agrarwirtschaft, Abteilung Soest der Fachhochschule Südwestfalen, durchgeführt. Die Texturanalyse wurde im Bodenlabor des Fachbereiches Physische Geographie der Universität Paderborn durchgeführt.

Für die Bestimmung der Herbizide aus den Feldversuchen ist das Labor im Fachbereich Technische Chemie und Chemische Verfahrenstechnik (FB 13) an der Universität Paderborn zu Beginn der Versuche 1997 bis zur Beendigung im Jahr 2002 beauftragt worden. Die Nährstoffanalytik übernahm das fachbereichsinterne Bodenzentrum der Fachhochschule Südwestfalen.

5.3.1 Bodenuntersuchungen zur Standortcharakterisierung

Zur bodentypologischen Charakterisierung der Versuchsfläche wurden die aus den Profilgruben gewonnenen Mischproben bei Raumtemperatur unter Dunkelheit luftgetrocknet und anschließend über ein 2 mm Bodensieb der Skelettanteil des Feinbodens für die unterschiedenen Horizonte bestimmt. Folgende physikochemischen Kennwerte sind untersucht worden:

- a) Carbonatgehalt in den Bodenhorizonten
- b) pH-Wert der jeweiligen Bodenhorizonte
- c) Bestimmung der organischen Substanz im Boden
- d) Bestimmung der Bodentextur

5.3.1.1 Bodenchemische Kennwerte

Für die Bestimmung bodenchemischer Kennwerte des charakteristischen Bodenprofils auf der Feldversuchsfläche sind in Tabelle 7 die angewandten Analysemethoden mit dazugehörigem Untersuchungsziel angegeben. Die Bodenprobenanalyse erfolgte durch eine Doppelbestimmung ($n = 2$) jeder gewonnenen Mischprobe. Bei signifikant abweichenden Ergebnissen wurde eine Wiederholung in Doppelbestimmung vorgenommen.

Tab. 7: Chemische Analysen zur Bestimmung von Bodenkennwerten

Analyse	Methode	Ziel
CaCO₃	Nach halbquantitativer Vorprobe mit 10 %-iger HCl, gasvolumetrische Bestimmung der Carbonate nach Zerstörung der Calcite und Dolomite bei Zugabe von 20 %-iger HCl und Messung des entweichenden CO ₂ in der <i>Scheibler</i> -Apparatur	Bestimmung des CaCO ₃ -Gehaltes einzelner Bodenhorizonte. Aussagen über die Lage des Ausgangssubstrates in erodierten Bodenprofilen zur Bodenoberfläche bzw. Ackerkrume
pH-Wert	Elektrometrische Bestimmung mit einer Glaselektrode aus einer Boden-Wasser und einer Boden-0,01 mol CaCl ₂ -Lösung, beide im Verhältnis 1 : 2,5	Bestimmung der Bodenacidität sowie Vorbestimmung CaCO ₃ in den Proben. Aussagen über Säure-Pufferung im Boden und der KAK
C_{org}	Bei 578 nm photometrisch gemessene Bestimmung des reduzierten Chromes (Cr ₃₊) nach einer nassen Veraschung mit Kaliumdichromat (K ₂ Cr ₂ O ₇) bzw. nach Glühverlust (450 °C) und Multiplikation des C-Gehaltes mit dem Faktor 2	Bestimmung des Humusgehaltes (Organische Substanz) in Bodenhorizonten. Aussagen über den Verlust an organ. Substanz im Oberboden (Ap) nach Erosionsereignissen

Quelle: VDLUFA (Hrsg.) 1991⁴: Methodenbuch Band I. Die Untersuchung von Böden.

5.3.1.2 Bodenphysikalische Kennwerte

Für Aussagen über die Textur des Bodens ist eine Korngrößenbestimmung durch Sieb- und Sedimentationsanalyse (SCHLICHTING et al. 1995) vorgenommen worden. Zur Analytik wurden die luftgetrockneten Bodenproben (Mischproben) aus den "Profilgruben" verwendet. In Tabelle 8 werden die einzelnen Schritte der Analyseverfahren beschrieben.

Tab. 8: Korngrößenanalyse zur Bestimmung der Bodentextur

Analyse	Methode	Ziel
Sieb- und Sedimentationsanalyse nach KÖHN	Nach vorangegangener Carbonatzersetzung durch 20 %-ige HCl und Zerstörung der organischen Substanz humoser Bodenproben durch Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂) erfolgte die Nasssiebung der Kornfraktionen (2000-63 µm) nach <i>Köhn</i> . Anschließend Dispergierung mit 0,1 mol Natriumpyrophosphat (NaP ₂ O ₇). Nach Pipettierung der Schluff- und Tonfraktionen (< 62 - 2 µm), ebenfalls nach <i>Köhn</i> , werden die Proben bei 105 °C getrocknet, gewogen und, bezogen auf die Einwaage, prozentual berechnet.	Texturbestimmung der einzelnen Bodenhorizonte nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG Bodenkunde 1994). Aussagen und Prognose über die Erodierbarkeit eines Bodens (K-Faktor)

Quelle: SCHLICHTING, BLUME u. STAHR (1995²): Bodenkundliches Praktikum

5.3.2 Aufbereitung der Abflussproben

Oberflächenabflussproben aus den automatischen Probenehmern in den "Messgruben" wurden vor Ort etikettiert und in Kühlboxen für den Rücktransport aufbewahrt. Nach gleicher Vorgehensweise wurden die Wasserproben aus den Zwischenabfluss- und Dränage-Abflusseinrichtungen eingesammelt, kühl gehalten und zur weiteren Aufbereitung ins Bodenlabor transportiert.

5.3.2.1 Phasentrennung und Konservierung

Die im Feld gewonnen Proben (1 l-Braunglasflaschen) wurden im Labor einer Phasentrennung unterzogen. Nach 15-minütiger Zentrifugierung bei 4000 U/min ist das Wasser vorsichtig abdekantiert, in Glasflaschen gefüllt und bei -25 °C bis zur späteren Analyse eingefroren worden. Nach einer weiteren Zentrifugierung (15 min.) bei 3000 U/min wurde das überschüssige Wasser wieder abdekantiert und das zurückgebliebene Sediment mittels HPLC-Wasser zur Lufttrocknung in Glaschalen überspült. Nach Abzug des Leergewichtes ist das Gesamtgewicht der Schale mit der Sedimentprobe ermittelt worden. Bis zur Gewichtskonstanz wurde die Probe luftgetrocknet und zurückgewogen. Die Masse des getrockneten Sedimentes ergab sich aus der Gleichung $m_{\text{sed}} = m_c - m_a$. Danach erfolgte die Konservierung in Glasflaschen bei -25 °C.

Die nach Phasentrennung erhaltenen Proben sind in A-(Herbizide) und B-Proben (Nährstoffe N u. P) unterteilt und entsprechend etikettiert aufbewahrt worden. In Absprache mit dem zur HPLC-Analyse beauftragten Labor in Paderborn wurden die eingefrorenen Wasser- und Bodenproben in Kühlboxen ins Labor transportiert, dort gleich wieder eingefroren oder sofort zur Analyse herangezogen worden. Die nachfolgend aufgelisteten Geräte sind für die Phasentrennung und Konservierung der Proben verwendet worden:

- Analysenwaage, Ablesebereich bis 4000 g
- Messzylinder, NV 500 ml
- Zentrifuge VARIFUGE mit Zentrifugenflaschen aus PE und Schraubverschluss, NV 1000 ml
- Weithalsflaschen aus PE, NV 100 und 250 ml
- Enghalsflaschen aus braunem Glas mit Schraubverschluss, NV 250 ml
- Becherglas, NV 150 und 1000 ml
- Porzellanschalen mit flachem Boden, Rand 100, 180 und 250 mm

5.3.3 Analyse der Herbizide

In einem Probeninformationssystem wurden die eingegangenen Wasser- und Bodenproben erfasst. Die Probenflaschen wurden mit einer Listenummer versehen. Das Gesamtgewicht einer Probenflasche mit Schraubverschluss wurde ermittelt und im Probenahmeprotokoll eingetragen.

Für die Aufbereitung der Wasserproben zur HPLC-Bestimmung der ausgewählten Herbizide gehörten folgende Geräte zur Ausstattung:

- pH-Meter mit Einstabmesskette
- pH-Messstreifen mit Einheiten von 4,5 - 10
- Becherglas, NV 150 ml
- Wasserstrahlpumpe
- Vakuumbox, Baker spe-21 mit Absperrhähnen
- Restek RP-C18 uc-Kartuschen, 100 mg Sorbens
- Kartuschenadapter und Trichteraufsatz, NV 75 ml
- Messzylinder, NV 5, 50, 100, 250 ml
- Pasteurpipetten
- Zentrifugengläser, NV 10 ml
- Reagenzglasschüttler und Trockentemperiersystem
- Mikroliterspritzen aus Glas, NV 500 und 1000 µl
- Mikrofilter, Minisart RC 4, Porenweite 0,45 µm
- Autosamplerfläschchen, NV 1,8 ml, mit Aluminiumkappe und PTFE-beschichtetem Septum

Die dazu verwendeten Laborchemikalien waren:

- 0,1 mol H_2SO_4 + 0,1 mol NaOH
- Methanol und HPLC-Wasser
- Aceton
- Acetonitril/Wasser 15 : 85 und 8 : 2
- 30 %-ige Salzsäure
-

Für die Aufbereitung der Sedimentproben sind die gleichen Geräte und Chemikalien wie bei der Aufbereitung der Wasserproben verwendet worden. Ausnahme bildeten die im folgenden angeführten Geräte:

- Analysenwaage, Ablesegenauigkeit 0,01 g
- Messzylinder, NV 10 ml
- EPA-Fläschchen, NV 20 ml, aus Klarglas mit Schraubverschluss und PTFE-beschichteter Dichtung
- Ultraschallgerät mit Badheizung und Zeitschaltuhr, sowie einer Vorrichtung zur Aufnahme der Extraktionsgefäße

5.3.3.1 Extraktion und Erfassung der eingesetzten Wirkstoffe

Bei der Extraktion der Herbizide in der Wasser- und Sedimentphase vor der HPLC-Analyse ist zwischen neutralen und sauren Wirkstoffen unterschieden worden. Für beide Stoffgruppen wurde die gleiche Aufbereitung durchgeführt, jedoch mit anderen Reagenzien.

Zur Erfassung der Wirkstoffkonzentrationen in der gelösten Phase (Wasserphase) werden ca. 150 ml der Wasserprobe unter Zugabe von H_2SO_4 (neutrale Stoffe) bzw. 30 %-iger HCl (saure Stoffe) mittels Vakuumbox über RP-C 18-Kartuschen aufkonzentriert und die Wirkstoffe mit Aceton (neutrale Stoffe) bzw. Methanol (saure Stoffe) eluiert. Nach kurzer Einwirkungszeit wurde das Lösungsmittel entfernt, das zurückgebliebene Eluat bei 40 °C getrocknet und der Rückstand mit Acetonitril/Wassergemisch (neutrale Stoffe) bzw. Methanol/Wassergemisch (saure Stoffe) gelöst. Der Extrakt wurde über einen Mikrofilter in ein Autosampler-Fläschchen überführt und bis zur HPLC-Messung bei ca. 4 °C lichtgeschützt aufbewahrt.

Die Extraktion der Wirkstoffe aus den Sedimentproben (Festphase) erfolgte mit Aceton bei den neutralen und mit Methanol bei sauren Wirkstoffen nach einer 9-stündigen intensiven Probenschüttelung und Lagerung im Kühlschrank über Nacht bei 4°C. Hierzu wurden 5 g luftgetrocknete Bodenprobe mit 10 ml Aceton bzw. Methanol versetzt und 30 min bei 40°C im Ultraschallbad erwärmt. Nach kurzmaligem Aufschütteln der Probe wurde der Vorgang im Ultraschallbad wiederholt. Die Konservierung der Eluate in den Kartuschen erfolgte bei -25 °C in einer Gefriertruhe.

Die Erfassung der Wirkstoffkonzentrationen, sowohl im Wasser als auch im Sediment, erfolgte mittels Hochdruckflüssigchromatographie (HPLC) über das HPLC-System Turbo-Plus (*Perkin Elmer*). Zusätzlich erforderlich war die Installation einer spezifischen Software (*Turbochrom*). Die HPLC-Anlage und die zur Analyse gehörigen chromatographischen Bedingungen bestanden aus:

Pumpe:	Series 200 LC pump
Autosampler:	Series 200 autosampler
Säule:	SPHERI - 5 ODS, 5µ 220 x 4,6 mm
Detektor:	Dioden Array Detektor 235 C
Injektionsvolumen der Pumpe:	100 µl
Eluent:	Acetonitril/Ammoniumacetatpuffer, Gradientenelution
Fluss:	0,8 ml/min
Säulenofen:	40 °C

Die zuvor extrahierten Wirkstoffe Chlortoluron, Isoproturon, Metazachlor, Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin wurden in verschiedenen Spektralbereichen photometrisch gemessen. Jede einzelne Probe wurde in das HPLC-Gerät injiziert und durchlief das Photometer. Die gemessenen Daten sind automatisch registriert und abgespeichert worden, so dass sie nachfolgend mit gängigen PC-Programmen bearbeitet werden konnten.

Durchführungen von Qualitätssicherungsmaßnahmen sind im Rahmen der Forschungsarbeit mit den beteiligten Institutionen jährlich vorgenommen worden. Diese QS-Maßnahmen erfolgten zeitgleich mit einer Standardlösung und 3 präparierten Proben, bestehend aus einem Trinkwasser/Bodengemisch mit jeweils unterschiedlichen Sediment- und Herbizidkonzentrationen. Beim Vergleich der gewonnenen Stoffmengen im Wasser und Sediment wurden auch die Wiederfindungsraten der einzelnen Wirkstoffe nach der HPLC-Analyse errechnet. Die Berechnung erfolgte nach Trennung und Aufarbeitung der Phasen mit anschließender Ermittlung der Wirkstoffanteile im Wasser und Sediment. Aus diesen Daten ließen sich die Wiederfindungsraten (LUA 1997) wie folgt berechnen:

$$WFR_{i,s} = 100 * m_{i,s} / (50 - 100 * m_{i,w} / WFR_{i,s})$$

Dabei ist:

$WFR_{i,s}$: Wiederfindungsrate des Wirkstoffes i für Sediment in %

$m_{i,s}$: Wiedergefundene Masse des Wirkstoffes i im Sediment in µg

$m_{i,w}$: Wiedergefundene Masse des Wirkstoffes i im Wasser in µg

$WFR_{i,w}$: Wiederfindungsrate des Wirkstoffes i für Wasser in %

In der Tabelle 9 sind die nach 3-jähriger Wiederholung der QS-Maßnahmen der mittleren Wiederfindungsraten der im Feldversuch verwendeten Wirkstoffe für das beauftragte Labor an der Universität Paderborn angegeben.

Tab. 9: Mittlere Wiederfindungsraten einzelner im Feldversuch applizierter Wirkstoffe im Wasser (WFRi,w) und Boden (WFRi,s) nach den Untersuchungsjahren 1997 – 2000

Dotierte Wirkstoffe	Mittlere Wiederfindungsrate (%)	
	WFRi,w; (s < 3 %)*	WFRi,s; (s < 3 %)*
Chlortoluron	94,9	93,0
Isoproturon	93,9	92,3
Metazachlor	93,0	91,5
Metolachlor	93,8	97,6
Pendimethalin	97,6	93,0
Terbuthylazin	69,6	73,0

*(s < 3 %): Standardabweichung der Messwerte

Die Wiederfindungsraten ließen sich mit den Analyseergebnissen anderer Forschungslabors vergleichen. Sie wurden statistisch abgesichert und konnten für die Gewinnung von verifizierbaren Ergebnissen herangezogen werden. Für die gelöste Phase der Wirkstoffe sind die Bestimmungsgrenzen der Wirkstoffkonzentrationen auf 0,1 µg/l und in der festen Phase auf 0,5 µg/kg Boden festgelegt worden.

5.3.4 Nährstoffanalysen

Die konservierten Wasser- und Bodenproben (vgl. Kap. 5.3.2.1) sind im Bodenlabor des Fachbereiches Agrarwirtschaft in Soest zur weiteren Nährstoffanalyse verwendet worden. Die Analyse von Stickstoff (N) und Phosphor (P) erfolgte in gelöster Phase des Oberflächen-, Zwischen- und Dränageabflusses, sowie in der festen Phase des Oberflächenabflusses.

5.3.4.1 Stickstoff- und Phosphorbestimmung im Wasser und Boden

Bestimmung von N und P in der Wasserphase:

Zur Aufbereitung für die Analyse wurden die Wasserproben zunächst über einen Membranfilter (0,45 µm) filtriert.

Stickstoff: Die Bestimmung von Nitrat- (NO₃-N) und Ammoniumstickstoff (NH₄-N) erfolgte im Fließ-Injektionsanalysator (Fa. FOSS) nach kolorimetrischer Bestimmung über ein integriertes Photometer. Folgendes Messprinzip ist dabei zu Grunde gelegt: Ein Aliquot der Wasserprobe im Autosampler wurde mit Reagenzien versetzt, die über einen Chemifold im System zugeführt werden. Diese Messlösung wurde in eine Indi-

katorlösung, die in einem Schlauchsystem zirkulierte, gespritzt und die auftretende Farbreaktion spektralphotometrisch (660 nm) gemessen. Bei der NH_4 -Bestimmung wurde die Aufschlusslösung im Chemifold mit 2 M NaOH versetzt. Das freigesetzte NH_3 diffundierte durch eine Teflonmembran in den Strom einer Säure/Base-Reagenzlösung. Die dabei auftretende Farbänderung ist photometrisch erfasst worden. Die Konzentrationen wurden in mg/l Abflussmenge angegeben (FOSS 1994).

Phosphor: Die Bestimmung von in Wasser gelöstem Phosphat ($\text{PO}_4\text{-P}$) erfolgte ebenfalls mittels Fließ-Injektionsanalysator nach gleichem Prinzip wie bei $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$, aber mit anderen im Chemifold zusammengesetzten Reagenzien (FOSS 1998). Der zu messende Spektralbereich lag bei 690 nm. Die P-Konzentrationen sind in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$ angegeben worden.

Bestimmung von N und P in der Festphase:

Stickstoff: Die Bestimmung der Gesamtstickstoffgehalte (N-gesamt) erfolgte nach Kjeldahl-Aufschluss (420°C) mit Schwefelsäure (H_2SO_4) und Selenreaktionsgemisch als Katalysator. Die Umsetzung der Nitrate erfolgte durch schwefelsaures Phenol. Nach der Reduktion der entstandenen Nitroverbindungen mit Thiosulfat folgte die Ammoniakisolierung durch Destillation im Destillator (Typ: VAPODEST 50, Fa. Gerhard) nach Freisetzung mit NaOH. Im Anschluss daran schloss sich die titrimetrische Bestimmung des N-Gehaltes an. Freigesetztes Ammoniak (NH_3) wurde in Borsäure (H_3BO_3) aufgefangen und mit 0,1 M HCl zurücktitriert. Beim Titrieren wurde ein Farbindikatorumschlag erreicht, der mit einem in gleicher Weise erreichten Blindwert verglichen wurde. Die Differenz beider Werte wurde mit einem Faktor multipliziert und als N-Menge in % angegeben, die in mg/kg Boden umgerechnet wurde. Alle Vorgänge der Destillation, Titration und Berechnung der N-Mengen erfolgten automatisch im Vapodest 50 (GERHARD LABORTECHNIK 1997).

Phosphor: Die Gesamtphosphor-Bestimmung (P-gesamt) erfolgte nach Königswasseraufschluss durch Extraktion der P-Verbindungen im siedenden Salzsäure (HCl) / Salpetersäure (HNO_3)-Gemisch und nachfolgender Messung im Photometer. Dabei wurde die salpetersaure Lösung mit einem Gemisch (1 : 1) aus Molybdat-Vanadat (0,25 %-iges NH_4VO_3 und 5 %-iges $[\text{NH}_4]_2\text{MoO}_4$) versetzt und bei 440 nm gegen den erreichten Blindwert photometrisch gemessen. Die P-Konzentration ($\mu\text{g}/50\text{ ml}$) einer Eichkurve wurde mit dem Faktor 0,005 multipliziert. Die entsprechenden P-Mengen wurden in mg/kg Boden umgerechnet (SCHLICHTING et al. 1995).

5.3.5 Datenauswertung und Statistik

Zur Charakterisierung und Analysierung von Variabilitäten der gewonnenen Feld- und Labordaten wurden verschiedene Methoden der Biometrie angewandt. Für die Konzentrationen einzelner Wirkstoffe und Nährstoffe des Oberflächen-, Zwischen- und Drainageabflusses in den Wiederholungen einer Bodenbearbeitungsvariante sind nach der Laboranalyse grundsätzlich arithmetische Mittelwerte gebildet worden. Die Absicherung der verschiedenen Eichgrade, während der HPLC- und Nährstoffanalysen, ist durch eine automatische Korrelationsberechnung bei der Kalibrierung der Messgeräte zu Beginn jeder Analyse erreicht worden. Um die Streuung der erhaltenen Werte zu messen, ist neben der Ermittlung von Variationsbreiten die Varianz und Standardabweichung berechnet worden.

Die Berechnung von Stofffrachten nach Oberflächen-, Zwischen- und Drainageabflussereignissen erfolgte mittels einer Extrapolationsmethode, das heißt, die Frachtschätzung wurde aus einer Konzentrations-Abfluss-Beziehung errechnet. Aus den für jedes Ereignis gemittelten Werten der Stoffkonzentrationen im Abflusswasser und –sediment für jede Wiederholung der Versuchsplots in der Pflugvariante, Mulchsaat- und Direktsaatvariante ist ein abschließender, arithmetischer Mittelwert zur Berechnung der Frachtsummen an abgetragenen Boden, herbiziden Wirkstoffen sowie an abgeschwemmten Nährstoffen herangezogen worden.

Es muss ausdrücklich betont werden, dass die breiten Streuungsmaße der Stoffkonzentrationen in den registrierten Abflüssen keine exakte quantitative Berechnung der Frachten an Herbiziden und Nährstoffen zuließen. Vielmehr muss bei den flächenhaft errechneten Stofffrachten von einer Abschätzung bzw. Schätzgröße gesprochen werden, da eine empirische Genauigkeit nur durch einen weitaus höheren Probenumfang erreicht werden konnte, der aber den Rahmen dieser Forschungsarbeit gesprengt hätte.

6 Ergebnisse der Versuchsjahre 1997 - 2002

6.1 Bodenabtrag und Stoffausträge mit dem Oberflächenabfluss

Die registrierten Boden-, Herbizid- und Nährstoffausträge mit dem Oberflächenabfluss sind während der für die jeweilige Kultur erfolgten Messphase (s. Kap. 5.2.1) ermittelt worden.

6.1.1 Abflussereignisse der Messphasen im Mais von 1998 - 2002

In Tabelle 10 sind die Abflussereignisse der Versuchsjahre im Mais von 1998 - 2002 mit Angaben über den Jahresniederschlag und den Niederschlag während der Messphasen angegeben. Der Niederschlags- und Temperaturverlauf des jeweiligen Versuchsjahres ist im Anhang in den Tabellen 5 – 10 und den Abbildungen 13 - 18 nachzusehen.

Tab. 10: Messphasen im Mais mit Niederschlagsdaten und Anzahl der Abflussereignisse

	Versuchsjahre mit Mais				
	1998	1999	2000	2001	2002
Jahresniederschlag/ Jahresmittel (mm)	1108 (898)	915 (898)	920 (898)	996 (898)	1198 (898)
Messphase	21.05 - 20.08	20.05 - 02.08	04.05 - 01.08	19.05 - 13.08	21.05 - 29.07
Gesamtniederschlag	273	125	269	229	255
Niederschlagstage	48	30	47	29	31
Niederschlagstage mit Abfluss	3	3	0	1	0

Aus der Standortbeschreibung in Kapitel 5.1.1 wurde die mittlere Jahresniederschlagssumme mit 898 mm entnommen (KULKE 1997). In allen Versuchsjahren wurde dieser Wert zum Teil deutlich überschritten. In den Jahren 1999 - 2001 zwischen 2 und 11 %, sowie im Jahr 1998 mit 23 % bzw. 2002 mit 33 %. Der Gesamtniederschlag während der Messphasen lag mit Ausnahme des Jahres 1999 zwischen 230 und 280 mm, was im Durchschnitt zwischen 25 und 30 % des langjährigen Mittels betrug. Nur die Messphase 1999 war durch relative Trockenheit gekennzeichnet (14 % des Jahresniederschlages). Der Gesamtniederschlag während der Messphasen korrelierte nicht mit den Abflussereignissen (s. Tab. 10). Die Dauer einer Messphase begann immer einen Tag vor der Applikation des eingesetzten Herbizides und endete mit Beginn der Winterrapsaussaat im August. Diese zeitliche Eingrenzung resultierte aus der Umsetzung der Messtechnik von der Mais- in die Rapsparzelle.

Die Tabellen 11 und 12 charakterisieren die Niederschläge und Oberflächenabflüsse während der 5 Versuchsjahre auf den Versuchsplots (150 m²) der verschiedenen Bearbeitungsvarianten. Grundsätzlich sind hier zwei Typen von Niederschlagsereignissen zu unterscheiden. Ein Typ bestand aus einem Niederschlagsereignis mit relativ hoher Regenmenge und war von größerer Dauer (meist über 30 Minuten). Diesem Typ (Typ 2) entsprechen die Ereignisse am 01.08.1998 und das Ereignis in 2001 (Tab. 11 u. 12). Der andere Typ (Typ 1) bestand aus mehreren kurz aufeinander folgenden Niederschlagsereignissen, von denen jedes Einzelne oft nur von kurzer Dauer und geringen Niederschlagsmengen war, aber mit hohen Intensitäten eintrat. Dieser Typ entsprach dem in der Literatur erwähnten Horton-Typ (HORTON 1940; HAIDER 1994). In der Darstellung (s. Tab. 11) werden sie als ein Ereignis mit mehreren Teilniederschlägen gewertet. Dem Typ 1 entsprachen das Abflussereignis am 21. - 22.06.1998 und die Ereignisse von 1999.

Tab. 11: Niederschlagsereignisse mit Oberflächenabfluss der Versuchsjahre 1998 – 1999 und 2001 im Mais

Jahr	Niederschlag					
	Typ	Datum Beginn (h:min)	Menge (mm)	Menge/ Plot (l/150 m ²)	Dauer (h:min)	I max* (mm/h)/ (mm/min.)
1998	1 a	21.06.98 (21:10)	5,2	780	00:16	54/0,9
	1 b	22.06.98 (01:04)	2,9	435	00:04	48/0,8
	1 c	22.06.98 (03:58)	2,9	435	00:10	36/0,6
	2	01.08.98 (21:12)	13,4	2010	01:42	30/0,5
1999	1	12.07.99 (19:15)	11,9	1785	00:24	108/1,8
	1 a	19.07.99 (22:08)	6,1	915	00:08	72/1,2
	1 b	20.07.99 (03:06)	5,2	780	01:22	30/0,5
2001	2	30.06.01 (15:01)	35,0	5250	03:09	84/1,4

*I max = Maximale Niederschlagsintensität

Durch drei Starkregenereignisse in einer Nacht von jeweils sehr kurzer Dauer, aber hoher Intensität zwischen 21 Uhr am 21.06. und 4 Uhr am 22.06.98, erfolgte vor allem auf den Versuchsplots der Pflugvariante ein zwar geringer, aber dennoch deutlich messbarer Oberflächenabfluss (vgl. Tab. 11 u. 12). Da die Niederschlagsereignisse in einer Nacht auftraten, registrierte das Messsystem diese als ein einziges Ereignis. Die niederschlagsfreie Zeit zwischen den einzelnen Regenfällen konnte mit Hilfe der automatischen Klimastation ermittelt werden.

Tab. 12: Oberflächenabflussereignisse auf den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2001 im Mais

Jahr	Niederschlag		Abfluss (mm/% des Niederschlages) in den Versuchsplots der Bearbeitungsvarianten					
	Datum/ Typ	Menge (mm)	Pflug I* (mm/%)	Pflug II (mm/%)	Pflug $\bar{X}$ * (mm/%)	Mulch I* (mm/%)	Mulch II (mm/ %)	Mulch $\bar{X}$ (mm/%)
1998	21.06.98/ 1 a	5,2	0,07/1,4	0,01/0,3	0,04/0,85	k. A*	k. A	k. A
	22.06.98/ 1 b	2,9	0,19/6,5	0,04/1,4	0,115/3,95	0,04/1,4	0,03/0,9	0,035/1,15
	22.06.98/ 1 c	2,9	0,24/8,3	0,08/2,8	0,16/5,6	0,02/0,7	0,02/0,7	0,02/0,7
	01.08.98/ 2	13,4	0,08/0,6	k. A	0,04/0,3	k. A	k. A	k. A
1999	12.07.99/ 1	11,9	0,03/0,25	0,12/1,0	0,075/0,63	k. A	k. A	k. A
	19.07.99/ 1 a	6,1	0,03/0,49	0,1/1,69	0,02/1,1	k. A	k. A	k. A
	20.07.99/ 1 b	5,2	0,01/0,19	0,05/0,96	0,03/0,58	k. A	k. A	k. A
2001	30.06.01/ 2	35,0	2,83/15,2	k. A.	1,415/7,6	0,57/3,94	k. A	0,285/1,97

*Pflug I = Plot I; Pflugvariante; *Mulch I = Plot I; Mulchvariante; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; *k. A = kein Abfluss

Eine genaue Analyse des Abflussereignisses vom Niederschlagsbeginn bis Niederschlagsende gab Aufschluss über den raumzeitlichen Ablauf der Ereignisse auf der Maisfläche. Das 16-minütige Niederschlagsereignis am 21.06.1998 zeigte vor allem in dem Versuchsplot "Pflug I" erosive Wirkung. In dem Versuchsplot "Pflug II" sowie in den Plots der Mulchvariante ist kein Oberflächenabfluss registriert worden. In den Parzellen der Direktsaatvariante wurde kein Oberflächenabfluss festgestellt. Der Oberflächenabfluss auf Pflug (I) betrug 0,07 mm bzw. 1,4 % des auf dem Plot registrierten Niederschlages. Der kurze Abstand zwischen Niederschlagsdauer und Abflussbeginn deutet auf die hohe Minutenintensität hin (vgl. Tab. 11 u. 12).

Ganz anders die Situation am 22.06.98, ca. 2,5 Stunden später. Auf dem schon feuchten Boden kam es zu einem weiteren Oberflächenabfluss. In Abbildung 18 wird deutlich, dass nach nur ca. 1 mm Niederschlag der Oberflächenabfluss in den Versuchsplots der Pflugvariante I innerhalb von 2 Minuten einsetzte, bis kurz nach Regenende anhielt und fast 4,5 mal so hoch war wie beim kurz zuvor erfolgten Ereignis. Auch die Plots der Mulchvariante waren betroffen, da die Vorbefeuchtung des Bodens auch hier die Infiltration von Niederschlagswasser herabsetzte, jedoch mit einer ca. 5 mal niedrigeren Abflussmenge als auf den Plots der Pflugvariante.

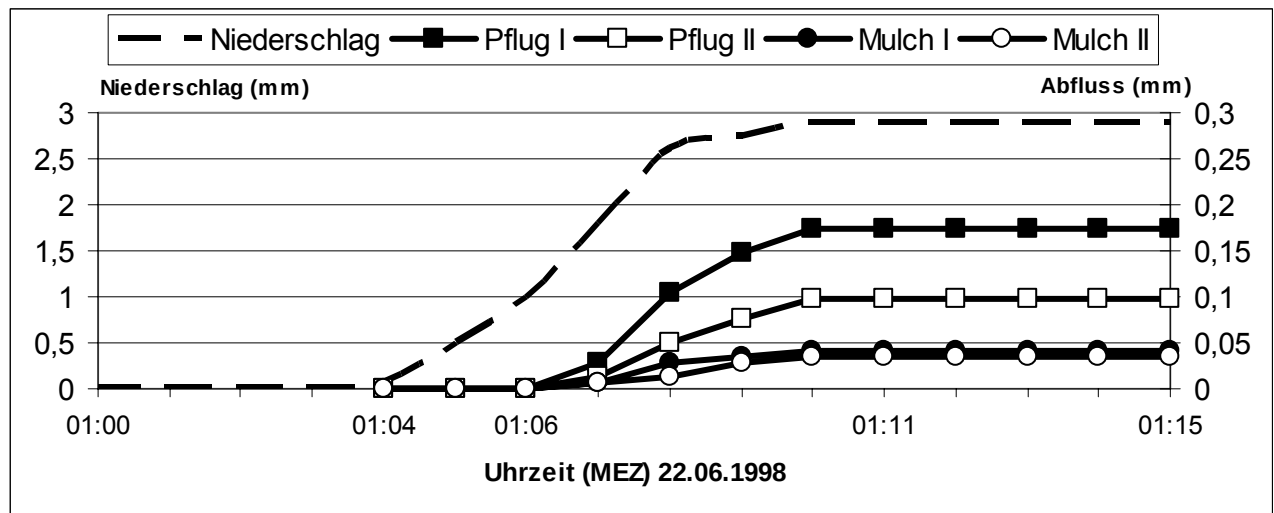


Abb. 18: Kumulierter Niederschlag und Oberflächenabfluss am 22.06.1998 in den Versuchsplots der Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais

Drei Stunden später, um vier Uhr am 22.06.98, löste ein weiteres Niederschlagsereignis von gleicher Regensumme und -intensität, jedoch doppelter Niederschlagsdauer im Vergleich zu dem vorangegangenen Ereignis, erneut Oberflächenabfluss aus. Wie nach dem Ereignis um 1 Uhr (1 b) trat erneut Oberflächenabfluss nach ca. 1 mm Niederschlag auf der Pflugvariante (Pflug I) auf. In der Pflugvariante (Pflug II) wurde der Abfluss mit 0,08 mm (2,8 % v. Niederschlag) ermittelt, während er in Pflug I bei 0,24 mm (8,3 % v. Niederschlag) lag (Abb. 19, vgl. auch Tab. 11). In den zwei Versuchsplots der Mulchvariante betrug der Oberflächenabfluss jeweils 0,02 mm (0,7 % v. Niederschlag).

Die Unterschiede im Abflussverhalten zwischen Pflug I und Pflug II (s. Abb. 18 u. 19) konnten bei einer nachfolgenden Begehung der Flächen geklärt werden.

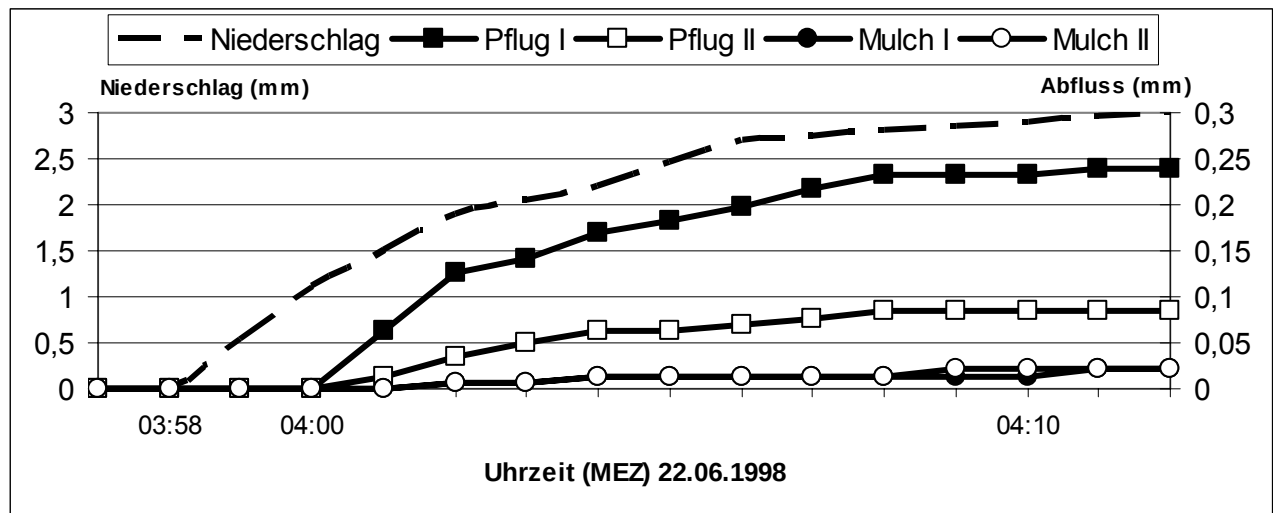


Abb. 19: Kumulierter Niederschlag und Oberflächenabfluss am 22.06.1998 in den Versuchsplots der Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais

Im Bereich des 50 x 3 Meter umfassenden Versuchsplots der Variante Pflug I hatte sich eine ca. 40 Meter lange und ca. 20 cm breite Verschlammungsfläche gebildet. Diese Vorschädigung führte dann bei jedem weiteren Niederschlagsereignis schnell zu einsetzendem Oberflächenabfluss. Als Ausgangslinie dieser Verschlammung war eine Fahrspur der Saatbettbereitung zu erkennen. Die geringfügige Vertiefung reichte aus, um das Wasser aufzunehmen und abzuleiten. Am 01.08.98 trat ein weiteres Abflussereignis auf, das vom Niederschlagstyp 2 war und nur auf dem schon von erhöhtem Abfluss betroffenen Versuchsplot Pflug I zu Oberflächenabfluss führte. (vgl. Tab.12).

Im Versuchsjahr 1999 gab es 3 Abflussereignisse nach Niederschlägen vom Typ 1 (vgl. Tab. 10). Auffällig sind hier die hohen Intensitäten von 1,8 mm/min. (s. Tab. 10). Oberflächenabfluss trat nur in den Versuchsplots der Pflugvariante auf. Das Einzelereignis vom 12.07.99 führte vor allem auf Pflug II zu Oberflächenabfluss (ca. 1 % des gefallenen Regens). In der Nacht vom 19.07.99 zum 20.07. gab es 2 Ereignisse vom Typ 1, die auf der Pflugvariante zu Abfluss führten. Beim ersten Ereignis flossen ca. 2 % des gefallenen Niederschlages an der Oberfläche ab, während es beim zweiten Ereignis nur die Hälfte war (s. Tab. 11 u. 12).

Im Versuchsjahr 2001 kam es während der Messphase zu einem Niederschlagsereignis mit Oberflächenabfluss. Mit Ausnahme der Direktsaatvariante waren Pflug- und Mulchvariante betroffen. Der Niederschlag vom 30.06. war durch lange Dauer und kurzzeitig hohe Intensitäten gekennzeichnet (vgl. Tab. 11). Auf der Pflugvariante (Plot I) trat Abfluss von ca. 15 % des Niederschlages während des Ereignisses auf. Auf Mulch I reduzierte sich der Abfluss um 74 %. (s. Tab. 12).

6.1.1.1 Austräge der applizierten Wirkstoffe im Wasser und Boden

In den Tabellen 13 a und 13 b sind die mittleren Sedimentgehalte und Herbizidkonzentrationen im Oberflächenabfluss ("Runoff-Wasser", "Runoff-Sediment") während der Abflussereignisse der Versuchsjahre 1998, 1999 und 2001 dargestellt. Die Variante "Direktsaat" ist in den Tabellen nicht berücksichtigt, da dort kein Oberflächenabfluss aufgetreten ist.

Zur Berechnung der Gesamtfrachten während der Messperioden nach einer Konzentrations-Abfluss-Beziehung (Extrapolationsmethode) muss auf die in den Tabellen 13 a und 13 b angeführte Prüfstatistik hingewiesen werden. Die Streuungsmaße um den arithmetischen Mittelwert (Standardabweichung) sind größtenteils sehr hoch. Es bestehen sehr hohe Variationsbreiten von Messwerten der untersuchten Stoffe, die sich vor allem in den Variationskoeffizienten für die berechneten Mittelwerte der Stoffkonzentrationen widerspiegelt (vgl. Tab. 13 a und 13 b). Zudem handelt es sich bei den in den Plots aufgefangenen Erosionsproben um unterschiedliche Stichprobenumfänge. Daher gestaltet sich eine statistische Prüfung im Sinne eines Vergleiches der Bearbeitungsvarianten sehr schwierig.

Beim Vergleich der Streuungsmaße zwischen den Herbiziden und Nährstoffen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Keine Bedeutung für das Ausmaß der Streuung vom arithmetischen Mittelwert hatten die verschiedenen Stichprobenumfänge (Anzahl der Erosionsproben). Besonders hohe Abweichungen vom Mittelwert (vgl. Tab. 13 a u. 13 b) sind bei den Stoffkonzentrationen im Abflusssediment errechnet worden, so dass hier bei der Berechnung von flächenhaften Austrägen die Fehlerquote am größten sein dürfte. Dies gilt für die Betrachtung der Herbizide und Nährstoffe gleichermaßen.

Für die angewandte Berechnung von Gesamtfrachten an Herbiziden und Nährstoffen im Oberflächenabfluss mit Hilfe der Extrapolation sind die Frachtsummen der Herbizide und Nährstoffe aus den einzelnen Konzentrationen bestimmter Probennahme-Interwalle des Messsystems (s. auch Kap. 5.2.4) berechnet worden. Aufgrund der zeitlich hoch aufgelösten Sequenzen der Abflussprobennahme durch das Messsystem konnten Teilberechnungen verschiedener Konzentrationen erfolgen. Am Ende der Teilberechnungen wurde der arithmetische Mittelwert der beiden Parzellen (Plot I+II) je Bearbeitungsvariante gebildet und daraus eine flächenhafte Berechnung der Herbizid- und Nährstoffausträge zur Abschätzung des Ausmaßes an Stoffverlusten durch Oberflächenabfluss vorgenommen. Es wurde versucht, dadurch eine bessere Annäherung an die tatsächlichen Stofffrachten zu erreichen.

Tab. 13 a: Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$) im Runoff-Wasser während der Abflussereignisse 1998, 1999 und 2001 im Mais in den Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat). (Applikationstermine: 21.05.98, 20.05.99, 19.05.01; Präparat: STENTAN: 6 l/ha)

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflugvariante (M) = Mulchvariante	Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$)								
		Metolachlor			Pendimethalin			Terbuthylazin		
		$\bar{X}^*$	$\pm S^*$	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
21.06.98	P I (n = 6)*	82,2	1,19	1,5	1,1	0,36	34,1	98,1	0,22	0,2
22.06.98 I	P I (n = 5)	25,1	3,39	13,5	1,2	0,09	7,2	36,4	10,25	28,1
	P II (n = 7)	28,8	10,81	37,6	1,1	0,11	9,8	34,2	13,01	38,1
	M I (n = 4)	32,9	1,42	4,3	0,8	0,44	59,1	54,0	5,03	9,3
	M II (n = 3)	31,7	2,42	7,6	0,7	0,42	62,4	53,7	3,06	5,7
22.06.98 II	P I (n = 5)	27,5	8,45	30,8	1,3	0,11	8,6	33,3	11,67	35,0
	P II (n = 2)	37,5	1,84	4,9	1,1	0,14	12,9	44,2	2,26	5,1
	M I (n = 2)	35,1	1,27	3,6	1,2	0,28	23,6	53,9	2,12	3,9
	M II (n = 2)	28,0	1,41	5,1	0,2	0,00	0,0	47,4	1,70	3,6
01.08.98	P I (n = 6)	7,1	1,35	19,1	< 0,1	n. b.*	n. b.	16,0	2,94	18,4
12.07.99	P I (n = 5)	20,3	2,86	14,1	< 0,1	n. b.	n. b.	11,9	2,98	25,0
	P II (n = 11)	36,1	5,35	14,8	< 0,1	n. b.	n. b.	26,4	5,97	22,7
19.07.99	P I (n = 3)	12,4	1,37	11,0	< 0,1	n. b.	n. b.	10,0	0,78	7,8
	P II (n = 8)	17,0	1,65	9,7	< 0,1	n. b.	n. b.	15,8	2,07	13,1
20.07.99	P I (n = 2)	7,2	0,07	1,0	< 0,1	n. b.	n. b.	5,2	0,21	4,1
	P II (n = 2)	21,3	10,32	48,5	< 0,1	n. b.	n. b.	19,8	6,55	33,2
30.06.01	P I (n = 20)	41,8	0,46	1,1	< 0,1	n. b.	n. b.	76,8	1,00	1,3
	M I (n = 16)	49,5	17,93	36,2	< 0,1	n. b.	n. b.	31,0	8,37	27,1

* (n = 6) = Anzahl d. Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. b. = nicht berechnet

Beim Vergleich der mittleren Herbizidkonzentrationen im Runoff-Wasser zeigten sich kaum signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit einer Ausnahme im Jahr 1998. Dort wurden höhere mittlere Konzentrationen für Terbuthylazin in der Mulchvariante gemessen. Die gemessenen Konzentrationen für Pendimethalin lagen alle um ein Vielfaches niedriger als bei Metolachlor und Terbuthylazin. In den Jahren 1999 und 2001 wurde bei Pendimethalin die Nachweisgrenze unterschritten. Insgesamt nahmen die Konzentrationen im Versuchsjahr 1998 mit zunehmender Dauer der Messphase ab (s. Tab. 13 a). Die gleiche Konzentrationsabnahme konnte bei zeitlich schnell aufeinanderfolgenden Ereignissen registriert werden. Das heißt, dass, insbesondere beim Niederschlagstyp 1 und nur kurzer Unterbrechung von wenigen Stunden, eine Abnahme der Wirkstoffkonzentrationen im Runoff-Wasser zu erkennen ist.

Aus der Tabelle 13 b ist zu entnehmen, dass die mittleren Sedimentgehalte im Oberflächenabfluss der Pflugvariante in allen Versuchsjahren deutlich höher liegen als in der Mulchvariante.

Tab. 13 b: Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Herbizidgehalte (µg/kg) im Runoff-Sediment der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1998, 1999 und 2001 im Mais. (Applikationstermine: 21.05.98, 20.05.99, 19.05.01; Präparat: STENTAN = 6 l/ha)

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflug- variante (M) = Mulch- variante	Sedimentgehalte (g/l)			Herbizidgehalte (µg/kg)								
					Metolachlor			Pendimethalin			Terbuthylazin		
		$\bar{X}^*$	$\pm S^*$	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
21.06.98	P I (n = 6)*	54,0	5,58	10,3	296,7	19,66	6,6	296,0	49,30	16,7	91,7	19,41	21,2
22.06.98 I	P I (n = 5)	52,6	3,07	5,8	240,0	20,00	8,3	442,0	147,21	33,3	88,0	14,83	16,9
	P II (n = 7)	61,5	20,38	33,1	235,0	5,48	2,3	866,7	71,74	8,3	90,0	28,28	31,4
	M I (n = 4)	38,4	9,21	24,0	272,5	55,60	20,4	555,0	129,33	23,3	55,0	5,77	10,5
	M II (n = 3)	48,4	13,61	28,1	210,0	0,00	0,0	603,3	100,66	16,7	50,0	10,00	20,0
22.06.98 II	P I (n = 5)	49,2	5,28	10,7	187,5	25,00	13,3	327,5	59,09	18,0	70,0	8,16	11,7
	P II (n = 2)	30,0	7,62	25,4	205,0	49,50	24,1	790,0	84,85	10,7	105,0	7,07	6,7
	M I (n = 2)	16,8	0,25	1,5	175,0	49,50	28,3	500,0	155,56	31,1	50,0	14,14	28,3
	M II (n = 2)	30,9	2,69	8,7	205,0	35,36	17,2	455,0	91,92	20,2	< 50	n. b.*	n. b.
01.08.98	P I (n = 6)	13,8	3,42	24,7	196,7	32,04	16,3	696,0	131,64	18,9	108,3	18,35	16,9
12.07.99	P I (n = 5)	4,0	1,15	28,6	122,7	3,79	3,1	285,3	95,54	33,5	< 50	n. b.	n. b.
	P II (n = 11)	10,1	4,32	42,7	144,8	21,76	15,0	434,0	58,45	13,5	64,3	6,75	10,5
19.07.99	P I (n = 3)	11,9	0,25	2,1	74,0	4,24	5,7	267,7	34,12	12,7	< 50	n. b.	n. b.
	P II (n = 8)	27,1	3,37	12,4	78,6	12,43	15,8	255,3	66,47	26,0	53,4	7,86	14,7
20.07.99	P I (n = 2)	2,4	0,98	40,2	72,5	20,51	28,3	190,0	63,64	33,5	< 50	n. b.	n. b.
	P II (n = 2)	14,3	1,77	12,4	89,5	9,19	10,3	395,5	64,35	16,3	61,5	4,24	6,9
30.06.01	P I (n = 20)	23,2	3,19	13,9	335,0	83,47	24,9	545,0	215,17	41,8	282,5	60,21	20,3
	M I (n = 16)	22,1	4,23	19,2	432,5	102,43	23,7	806,7	37,86	37,9	127,5	29,86	23,4

*(n = 6) = Anzahl d. Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. b. = nicht berechnet

In der Tabelle 13 b zeigt sich eine deutliche Dreiteilung in Bezug zu den Herbizidgehalten, die im Erosionssediment zu finden waren. Für Pendimethalin sind die höchsten mittleren Wirkstoffgehalte gemessen worden. Sie liegen alle zwischen 190 und 870 µg/kg Boden. Mit Gehalten zwischen 70 und 440 µg/kg für Metolachlor, sowie zwischen 50 und 290 µg/kg für Terbuthylazin, zeigte sich eine Abnahme der Stoffgehalte von Pendimethalin zu Terbuthylazin. Beim Vergleich der Wirkstoffgehalte im Abflusssediment zwischen den Varianten sind keine signifikanten Unterschiede während der Versuchsjahre festgestellt worden. Die Wirkstoffgehalte verringerten sich in allen Varianten mit der Dauer der Messphase. Während im Runoff-Wasser die mittleren Konzentrationen an Terbuthylazin am höchsten waren, lagen sie für diesen Wirkstoff im Runoff-Sediment am niedrigsten. Das war in allen Varianten festzustellen (s. Tab. 13 a und 13 b). Vergleicht man die einzelnen Untersuchungsjahre, dann sind im Jahr 1998 die höchsten Konzentrationen bzw. Gehalte der 3 Wirkstoffe gemessen worden. Ähnlich hohe Werte wurden im Jahr 2001 registriert. Auffällig war dabei die zeitliche Nähe von Applikation und Abflussereignis. Im Versuchsjahr 1999 trat das erste Ereignis gegenüber den Jahren 1998 und 2001 ca. 3 - 4 Wochen später auf.

Für die Messphasen der Versuchsjahre mit Oberflächenabfluss sind in Abbildung 20 die Bodenabträge in den jeweiligen Bearbeitungsvarianten berechnet worden und in Tonnen pro Hektar im Vergleich zur Toleranzgrenze des Bodenabtrages für den Versuchsstandort nach der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) angegeben.

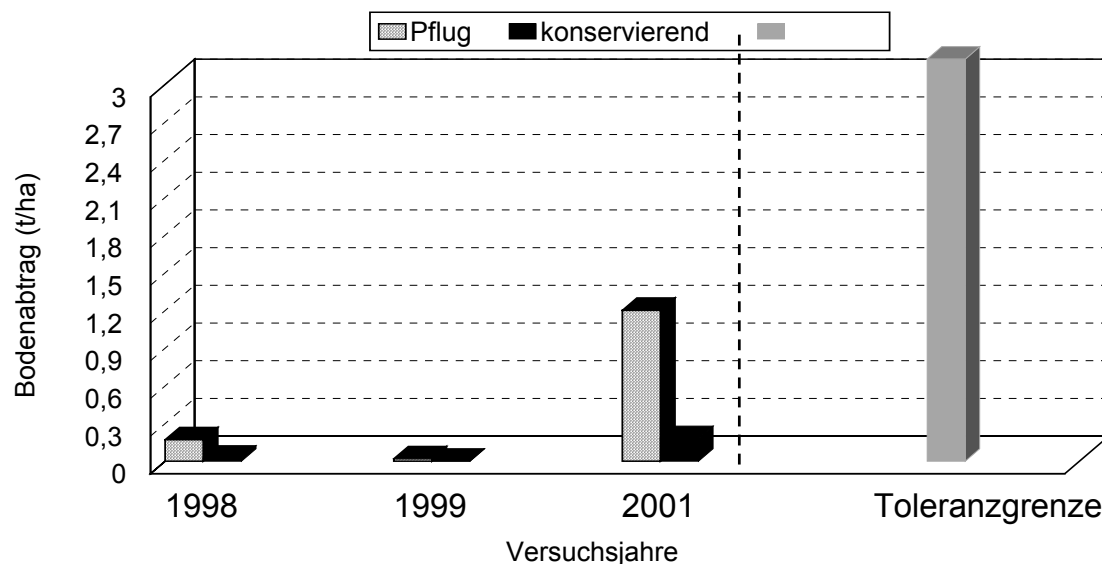


Abb. 20: Bodenabträge aus den Varianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) in den Versuchsjahren mit Oberflächenabfluss im Mais und Darstellung der Toleranzgrenze des Bodenabtrages für den Versuchsstandort, berechnet nach der ABAG

Der im Untersuchungszeitraum Mais 1998 registrierte Bodenabtrag (s. Abb. 20) kann mit 0,2 t/ha für die Pflugvariante als gering bzw. tolerabel gelten (vgl. HOEGEN et al. 1995). Auf der Mulchvariante betrug der Bodenverlust mit 0,02 t/ha nur ca. 13 % des Verlustes bei Pflugeinsatz. Die Minderungswirkung beträgt also 87 % gegenüber der Pflugvariante.

Bei einer den Messparzellen entsprechenden Hanglänge von 50 m und einer durchschnittlichen Hangneigung von etwa 7 %, liegt der in der "Allgemeinen Bodenabtragsgleichung" (s. SCHWERTMANN et al. 1990) variable LS-Faktor bei ca. 1,1. Das entspricht dem LS-Faktor des Standarthanges der "Universal Soil Loss Equation" (USLE) mit 22 m Länge und 9 % Gefälle nach WISHMEIER u. SMITH (1978). Bezogen auf das gesamte Hangeinzugsgebiet auf dem sich die Versuchsfläche befand, liegt der LS-Faktor bei 2,5. Somit würde sich der Bodenabtrag bei gleichbleibenden R-, K-, C- und P-Faktoren von 0,2 t/ha/a auf ca. 0,37 t/ha/a knapp verdoppeln. Die Toleranzgrenze für die auf der Versuchsfläche typischen Bodentypen liegt nach SCHWERTMANN et al. (1990) bei ca. 3,0 t/ha/a und wäre damit noch nicht überschritten.

Dasselbe gilt für das Versuchsjahr 1999, in dem, bezogen auf einen Hektar, ein sehr geringer Bodenabtrag von 0,02 t in der Pflugvariante berechnet wurde. Im Versuchsjahr 2001 lag der Bodenabtrag mit 1,1 t/ha in der Pflugvariante um mehr als 600 % höher als im Jahr 1998. Auf der Mulchvariante reduzierte sich der Abtrag auf ca. 0,18 t/ha/a. Dies ergibt eine Minderungswirkung um etwa 85 % gegenüber der Variante mit Pflugeinsatz.

Die Herbizidausträge für Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin, sowie deren Anteile im Wasser und Boden für das Versuchsjahr 1998 mit Mais sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tab. 14: Herbizidausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 1998 (Applikation: STENTAN: 6 l/ha)

1998 Ereignis- datum	Variante Plot I+II	Herbizidausträge (mg/ha)*			Herbizidanteile relativ (%)					
		Metola- chlor	Pendi- methalin	Terbuthyl- azin	Metolachlor		Pendimethalin		Terbuthylazin	
					Wasser	Boden	Wasser	Boden	Wasser	Boden
Aufwand Menge (g/ha)		1450	990	750						
21.06.	Pflug	32,6	5,55	34,7	85	15	6	94	94	6
22.06. I	Pflug	59,7	45,65	61,55	70	30	4	96	89	11
	Mulch	18,25	10,1	24,55	79	21	3	97	95	5
22.06. II	Pflug	61,65	45,45	61,45	68	32	4	96	88	12
	Mulch	7,45	2,7	10,45	87	13	6	94	98	2
01.08.	Pflug	3,45	3,5	6,25	68	32	2	98	90	10
Summe (g/ha)	Pflug	0,155	0,1	0,165						
	Mulch	0,025	0,015	0,035						
Σ-Anteil (%)	Pflug				73	27	4	96	90	10
	Mulch				84	16	< 1	> 99	96	4
Austrag (%)	Pflug	0,011	0,01	0,022	0,0075	0,003	< 1 ‰	0,01	0,02	0,002
	Mulch	0,0015	0,0015	0,0045	0,0015	< 1 ‰	< 1 ‰	0,0015	0,0045	< 1 ‰

*Herbizidausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante

Es zeigt sich eine deutliche Dreiteilung hinsichtlich des Herbizidaustrages für das Versuchsjahr 1998. Metolachlor, das Herbizid mit der höchsten Aufwandmenge pro Hektar, wies den prozentual geringsten Austrag sowohl bei der Pflug- als auch bei der Mulchvariante auf. Hingegen waren beim Terbutylazin trotz geringster Aufwandmenge die höchsten Austräge bezogen auf die Applikationsmenge zu verzeichnen. Der Austrag von Pendimethalin lag nur knapp unter dem von Metolachlor. In der Summe der absoluten Austragsmenge für das Jahr 1998 zeigt sich, dass Metolachlor (0,16 g/ha) und Terbutylazin (0,17g/ha) zu fast gleichen Mengen ausgetragen wurden, während Pendimethalin mit 0,1 g/ha am wenigsten ausgetragen wurde. Diese Aufteilung in Bezug zu den Austrägen zeigte sich ebenfalls während der Einzelereignisse des Versuchsjahres, unabhängig von den Bearbeitungsvarianten. Bei Betrachtung der Wirkstoffanteile

im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment ist Metolachlor zu 13 bis knapp über 30 % mit dem Sediment ausgetragen worden, wobei die Mulchvariante einen 30 bis über 60 % geringeren Wirkstoffanteil gegenüber der Pflugvariante aufwies. Durch seinen hohen K_{oc} -Wert wurde Pendimethalin in allen Varianten fast ausschließlich im Runoff-Sediment gefunden (94 – 98 %). Mit 88 – 98 % Anteilen im Runoff-Wasser ist Terbutylazin gemessen worden. Ähnlich wie bei Metolachlor lag der Sedimentanteil bei der Pflugvariante gegenüber der pfluglosen Varianten höher. Bezogen auf die applizierte Herbizidmenge lagen die Austräge im Jahr 1998 bei der Pflugvariante unter 0,1 %, während sie in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung, mit Ausnahme des Terbutylazins, weniger als 0,01 % aufwiesen.

Für das Versuchsjahr 1999 sind die Herbizidausträge in der Tabelle 15 dargestellt.

Tab. 15: Herbizidausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 1999 (Applikation: STENTAN: 6 l/ha)

1999 Ereignis- datum	Variante Plot I+II	Herbizidausträge (mg/ha)*			Herbizidanteile relativ (%)					
		Metola- chlor	Pendi- methalin	Terbuthyl- azin	Metolachlor		Pendimethalin		Terbuthylazin	
					Wasser	Boden	Wasser	Boden	Wasser	Boden
Aufwand Menge (g/ha)		1450	990	750						
12.07.	Pflug	44,55	38,85	25,2	70	30	< 1	> 99	78	22
19.07.	Pflug	22,05	12,05	12,1	60	40	< 1	> 99	58	42
20.07.	Pflug	6,85	10,15	5,55	66	34	< 1	> 99	70	30
Summe (g/ha)	Pflug	0,075	0,06	0,04						
Σ-Anteil (%)	Pflug				68	32	< 1	> 99	69	31
Austrag (%)	Pflug	0,005	0,006	0,0055	0,0035	0,0015	< 1 ‰	0,006	0,0035	0,0015

*Herbizidausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante

Im Versuchsjahr 1999 trat nur in der Pflugvariante Oberflächenabfluss auf, so dass dort kein Vergleich mit der konservierenden Bodenbearbeitung (Mulchsaat) möglich ist. Beim Vergleich mit dem Vorjahr 1998 fällt auf, dass die Wirkstoffanteile von Metolachlor und Terbutylazin im Runoff-Sediment signifikant höher lagen als im Vorjahr. Insbesondere bei Terbutylazin liegen die sedimentgebundenen Austräge zwischen 30 und 40 %, während sie 1998 nur zwischen 5 und 15 % lagen. Prozentual zwar geringer, aber dennoch erkennbar, gilt dies auch für Metolachlor. Pendimethalin wurde im Jahr 1998 zu über 90 % im Boden nachgewiesen. Im Jahr 1999 liegt der Wirkstoffanteil im Runoff-Sediment bei nahezu 100 %. Die Ereignisse des Jahres 1999 erfolgten ca. 4 Wochen später als die Ereignisse des Jahres 1998. Aus der Tabelle 10 in Kapitel 6.1.1 lässt sich ersehen, dass während der Erosionsmessphase im Vergleich zu 1998 relativ wenig

Gesamtniederschlag gefallen ist. Möglicherweise bestand im Versuchsjahr 1999 ein Zusammenhang zwischen dem Applikationstermin und dem langen Zeitraum bis zum ersten Abflussereignis in Verbindung mit insgesamt geringen Niederschlägen innerhalb der Messphase (vgl. Kap. 7). Insgesamt gesehen sind die Wirkstoffausträge aller Herbizide deutlich geringer als im Jahr davor. Auch hier lagen die prozentualen Verluste von Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin weit unter 0,1 % der applizierten Menge.

Für das Jahr 2001 als drittes und letztes Versuchsjahr mit Abflussereignissen sind die Herbizidausträge in Tabelle 16 angegeben.

Tab. 16: Herbizidausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 2001 (Applikation: STENTAN: 6 l/ha)

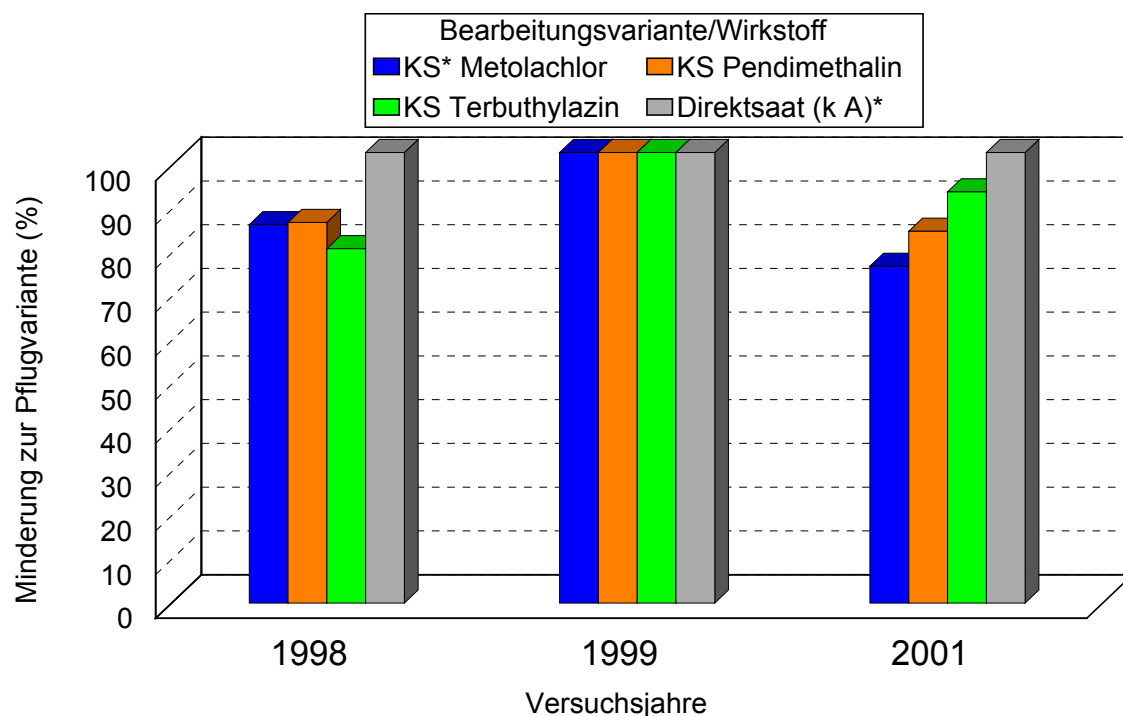
2001 Ereignis- datum	Variante Plot I+II	Herbizidausträge (mg/ha)*			Herbizidanteile relativ (%)					
		Metola- chlor	Pendi- methalin	Terbuthyl- azin	Metolachlor		Pendimethalin		Terbutylazin	
					Wasser	Boden	Wasser	Boden	Wasser	Boden
Aufwand Menge (g/ha)		1450	990	750						
30.06.	Pflug	810,0	585,05	1180,3	59	41	< 1	> 99	76	24
	Mulch	205,1	105,2	110,05	68	32	< 1	> 99	82	18
Summe (g/ha)	Pflug	0,81	0,585	1,18						
	Mulch	0,205	0,105	0,11						
Σ-Anteil (%)	Pflug				59	41	< 1	> 99	76	24
	Mulch				68	32	< 1	> 99	82	18
Austrag (%)	Pflug	0,055	0,06	0,155	0,033	0,023	< 1 ‰	0,06	0,115	0,035
	Mulch	0,015	0,01	0,015	0,01	0,005	< 1 ‰	0,01	0,0125	0,0025

*Herbizidausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante

Aus der Tabelle 16 ist zu entnehmen, dass nur ein Einzelereignis im Versuchsjahr 2001 zu Herbizidausträgen führte. Der Austrag an Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin betrug zwischen 0,05 und 0,2 % der applizierten Menge in der Pflugvariante gegenüber 0,01 - 0,015 % in der Mulchvariante. Ähnlich wie im Versuchsjahr 1998 ist die Austragsmenge an Terbutylazin in der gepflügten Variante mit knapp 1,2 g/ha am größten, gefolgt von Metolachlor (0,8g/ha) und Pendimethalin (0,6 g/ha). In der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung stellte sich die Situation anders dar. Dort war die Austragsmenge bei Metolachlor (0,2 g/ha) am größten, während sowohl Pendimethalin als auch Terbutylazin annähernd gleiche Austragsmengen aufwiesen (s. Tab. 16). Für Pendimethalin lagen die Wirkstoffanteile im Runoff-Sediment bei über 99 % in beiden Versuchsvarianten. Fast die Hälfte des ausgetragenen Metolachlors ist in der Pflugvariante über

das Erosionssediment erfolgt. Auch war der Wirkstoffanteil für Terbuthylazin im Sediment höher als in 1998 (vgl. Tab. 14), jedoch niedriger als in 1999 (s. Tab. 15). In der Mulchvariante war der Wirkstoffanteil der beiden letztgenannten Stoffe im Runoff-Wasser (68 u. 82 %) höher als in der konventionellen Variante mit Pflug (59 u. 76 %).

Beim Vergleich aller 3 Versuchsjahre in den Tabellen 14 - 16 fällt auf, dass der partikuläre Austrag an Metolachlor nach 1998 gegenüber dem Austrag mit dem Runoff-Wasser stetig zunahm. Bei Pendimethalin beschränkten sich die Austragsmengen ausschließlich auf das Runoff-Sediment, während sie für Terbuthylazin, je nach Applikationszeitpunkt und eingetretenem Abflussereignis, stark schwankten. Auf diese Besonderheiten wird in Kapitel 7 näher eingegangen. Im Hinblick auf eine abflussmindernde Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung zeigte sich eine deutliche Reduzierung im Oberflächenabfluss, Bodenabtrag und Herbizidaustrag in allen 3 genannten Versuchsjahren (vgl. Tab. 11 - 16). In Abbildung 21 ist die prozentuale Minderung der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung gegenüber der konventionellen mit Pflug in Bezug zum Herbizidaustrag der Versuchsjahre 1998, 1999 und 2001 dargestellt. In der Variante mit Direktsaat trat während der Messphasen kein registrierter Oberflächenabfluss auf.



*KS = Konservierende Bodenbearbeitung; *(k. A) = Kein Abfluss

Abb. 21: Minderung des Herbizidaustrages bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2001 im Mais gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug

Aus der Abbildung 21 geht hervor, dass die konservierende Bodenbearbeitung die Herbizidausträge in den Versuchsjahren 1998 und 2001 zwischen 79 und 91 % reduzierte. Im Jahr 1999 trat nur in der gepflügten Variante registrierter Oberflächenabfluss auf, so dass die Variante mit Mulchsaat einen 100 % igen Schutz gegen Oberflächenabfluss und Herbizidaustrag bewirkte.

6.1.1.2 Austräge von Stickstoff und Phosphor im Wasser und Boden

In den Tabellen 17 a und 17 b sind die mittleren Sedimentgehalte und Nährstoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss ("Runoff-Wasser", "Runoff-Sediment") während der Abflussereignisse der Versuchsjahre 1998, 1999 und 2001 dargestellt. Wie in Kapitel 6.1.1.1 ist die Variante "Direktsaat" nicht berücksichtigt, da dort kein Oberflächenabfluss auftrat.

Tab. 17 a: Nährstoffkonzentrationen (mg/l) im Runoff-Wasser der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1998, 1999 und 2001 im Mais

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflugvariante (M) = Mulchvariante	Nährstoffkonzentrationen (mg/l)								
		NO ₃ -N			NH ₄ -N			PO ₄ -P		
		$\bar{X}$ *	$\pm S^*$	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
21.06.98	P I (n = 6)*	6,1	0,41	6,7	1,1	0,11	10,2	0,10	0,06	61,6
22.06.98 I	P I (n = 5)	5,7	0,91	16,0	0,18	0,14	77,8	0,44	0,28	62,8
	P II (n = 7)	4,9	2,07	41,9	1,0	0,68	69,3	0,21	0,15	70,5
	M I (n = 4)	6,1	1,40	23,1	0,87	0,39	44,3	0,11	0,02	20,4
	M II (n = 3)	3,7	0,55	15,0	1,1	0,58	55,2	0,15	0,08	52,1
22.06.98 II	P I (n = 5)	4,6	1,77	38,7	0,62	0,48	77,4	0,42	0,22	52,5
	P II (n = 2)	5,9	1,32	22,4	0,23	0,04	18,4	0,68	0,44	64,5
	M I (n = 2)	10,3	4,06	39,4	0,61	0,45	74,2	0,33	0,26	80,5
	M II (n = 2)	3,6	0,21	5,7	0,61	0,06	9,3	0,08	0,02	28,3
01.08.98	P I (n = 6)	9,2	3,48	37,8	4,9	1,37	27,7	0,14	0,10	71,9
12.07.99	P I (n = 5)	31,8	6,32	19,9	22,8	8,53	37,4	0,33	0,20	62,4
	P II (n = 11)	30,2	9,83	32,9	35,9	13,41	37,4	0,07	0,03	40,1
19.07.99	P I (n = 3)	23,8	6,75	26,6	7,6	0,46	6,0	0,18	0,02	11,1
	P II (n = 8)	12,1	4,95	41,1	9,1	2,07	22,8	0,10	0,05	46,0
20.07.99	P I (n = 2)	15,7	1,49	9,5	7,1	0,72	10,2	0,48	0,04	8,3
	P II (n = 2)	25,6	12,36	48,2	11,6	2,21	19,0	0,10	0,00	0,0
30.06.01	P I (n = 20)	9,3	0,90	9,6	3,0	1,68	56,1	0,51	0,03	5,0
	M I (n = 16)	12,2	6,91	56,7	4,3	1,50	35,3	0,83	0,15	18,4

*(n = 6) = Anzahl der Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%)

Die mittleren Konzentrationen an Nitrat- (NO₃-N) und Ammoniumstickstoff (NH₄-N) im Runoff-Wasser lagen im Versuchsjahr 1998 zwischen 3 und 11 mg/l für NO₃-N bzw. 0,1 bis 5 mg/l für NH₄-N. Die Konzentrationen von im Wasser gelöstem Phosphor (PO₄-P) sind zwischen 0,1 und 0,7 mg/l gemessen worden. Während die NO₃-N sowie NH₄-N-Konzentrationen keine Unterschiede in

den Varianten zeigten, lagen die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen in der Pflugvariante deutlich höher als in der Variante ohne Pflugeinsatz. Für das Jahr 1999 fehlt der Vergleich zwischen den Varianten, es ist aber eine signifikant höhere Konzentration an gelöstem $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ in der Pflugvariante gemessen worden als im Jahr davor. Auffällig ist insbesondere die recht hohe Konzentration bei $\text{NH}_4\text{-N}$ in der Pflugvariante. Bei $\text{PO}_4\text{-P}$ gab es kaum Differenzen zum Vorjahr. In 2001 sind ebenfalls höhere Konzentrationen für N und P aufgetreten, sie lagen jedoch nicht in der Höhe von 1999. Unterschiede zwischen den Bestelltechniken blieben sehr gering und waren nicht einheitlich verteilt.

Ob es größere Unterschiede der Nährstoffkonzentrationen zwischen gelöster Phase und der sedimentgebundenen Phase im Runoff gab, wird die Tabelle 17 b zeigen. Dort sind die mittleren Nährstoffgehalte im Runoff-Sediment dargestellt.

Die im Abflusssediment enthaltenen Nährstoffe konnten für die Versuchsjahre 1999 und 2001 nicht analysiert werden, da keine ausreichende Sedimentmenge vorhanden war, um Herbizid- und Nährstofffrachten gleichermaßen analytisch aufzuarbeiten. Die in Tabelle 17 b angegebenen Gehalte an N und P liegen alle im Bereich zwischen 1,5 und 3 g/kg für N-Gesamt (anorganisch) bzw. zwischen 0,5 und 0,7 g/kg für Orthophosphat-P (P_2O_5). Im Gegensatz zur gelösten Phase zeigten sich hier doch eindeutig höhere N- und P-Gehalte in der Mulchvariante. Für N lagen die Werte im Mittel ca. 20 % höher als in der Variante mit Pflug. Für P-gesamt sind ebenfalls in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung ca. 12 und 16 % höhere Gehalte berechnet worden. Ein Vergleich für ein weiteres Versuchsjahr liegt nicht vor. Möglicherweise geben die Untersuchungsperioden im Winterraps und Winterweizen mehr Aufschluss über diese Unterschiede in den Varianten.

Tab. 17 b: Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Nährstoffgehalte (g/kg) im Runoff-Sediment der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1998, 1999 und 2001 im Mais

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflugvariante (M) = Mulchvariante	Sedimentgehalte (g/l)			Nährstoffgehalte (g/kg)					
					N-Gesamt			P-Gesamt		
		$\bar{X}$ *	$\pm S$ *	VK *	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
21.06.98	P I (n = 6)*	50,3	10,26	20,4	2,1	0,05	2,5	0,54	0,02	4,4
22.06.98 I	P I (n = 5)	56,1	8,46	15,1	1,9	0,05	2,9	0,51	0,02	3,9
	P II (n = 7)	61,5	20,38	33,1	2,1	0,27	13,0	0,56	0,06	10,0
	M I (n = 4)	38,4	9,21	24,0	2,6	0,09	3,5	0,60	0,13	23,6
	M II (n = 3)	48,4	13,61	28,1	2,4	0,27	11,1	0,61	0,04	7,3
22.06.98 II	P I (n = 5)	52,7	9,16	17,4	1,8	0,05	2,7	0,51	0,02	3,4
	P II (n = 2)	30,0	10,78	35,9	2,3	0,01	0,3	0,61	0,01	1,4
	M I (n = 2)	16,8	0,25	1,5	2,7	0,16	5,9	0,60	0,02	2,9
	M II (n = 2)	30,9	2,69	8,7	2,5	0,11	4,5	0,63	0,00	0,3
01.08.98	P I (n = 6)	12,0	5,39	44,9	n. n.*	n. b.*	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
12.07.99	P I (n = 5)	4,0	0,99	24,7	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	P II (n = 11)	11,0	5,11	46,3	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
19.07.99	P I (n = 3)	10,5	2,42	23,1	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	P II (n = 8)	25,5	5,54	21,7	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
20.07.99	P I (n = 2)	2,4	0,98	40,2	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	P II (n = 2)	14,3	1,77	12,4	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
30.06.01	P I (n = 20)	23,2	3,19	13,8	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	M I (n = 16)	22,1	4,23	19,2	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

*(n = 6) = Anzahl d. Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. n. = nicht nachgewiesen; *n. b. = nicht berechnet

Die berechneten Nährstoffausträge für Stickstoff und Phosphor sowie deren Anteile im Wasser und Boden für das Versuchsjahr 1998 mit Mais sind in Tabelle 18 dargestellt. Die berechneten N-Austräge betrugen für das Versuchsjahr 1998 ca. 0,4 kg/ha in der gepflügten Variante und 0,05 kg/ha in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. Die P-Austräge waren mit 0,1 kg/ha in der Pflugvariante sowie 0,015 kg/ha in der Variante ohne Pflug deutlich geringer. Die prozentualen Wirkstoffanteile im Runoff zeigten eine fast ausschließlich partikuläre Wirkstofffracht unabhängig von den untersuchten Bearbeitungsvarianten (s. Tab. 18).

Tab. 18: Nährstoffausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 1998

1998 Ereignis- datum	Variante Plot I+II	Nährstoffausträge (g/ha)*		Nährstoffanteile relativ (%)			
		Stickstoff	Phosphor	Stickstoff		Phosphor	
				Wasser	Boden	Wasser	Boden
21.06.	Pflug	40,6	8,75	12	88	< 1	> 99
22.06. I	Pflug	158,1	41,0	5	95	< 1	> 99
	Mulch	42,0	10,2	3	97	< 1	> 99
22.06. II	Pflug	185,35	49,25	4	96	< 1	> 99
	Mulch	14,95	3,4	6	94	2	98
01.08.	Pflug	4,65	0,05	(100)	n. n*	(100)	n. n.
Summe (kg/ha)	Pflug	0,39	0,1				
	Mulch	0,055	0,015				
Σ -Anteil (%)	Pflug			6	94	< 1	> 99
	Mulch			4	96	< 1	> 99

*Nährstoffausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante;

*n. n. = nicht nachgewiesen

Für das Untersuchungsjahr 1999 sind die N- und P-Austräge der Pflug- und Mulchvariante in der Tabelle 19 angeführt.

Tab. 19: Nährstoffausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 1999

1999 Ereignis- datum	Variante Plot I+II	Nährstoffausträge (g/ha)*		Nährstoffanteile relativ (%)			
		Stickstoff	Phosphor	Stickstoff		Phosphor	
				Wasser	Boden	Wasser	Boden
12.07	Pflug	52,6	1,8	(100)	n. n*	(100)	n. n.
19.07.	Pflug	12,6	1,0	(100)	n. n.	(100)	n. n.
20.07.	Pflug	9,6	0,75	(100)	n. n.	(100)	n. n.
Summe (kg/ha)	Pflug	0,075	0,005				

*Nährstoffausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante;

*n. n. = nicht nachgewiesen

In den Tabellen 17 a und 17 b schon angedeutet, war 1999 nur die Pflugvariante von Oberflächenabfluss betroffen (s. Tab.19). Die geringen Sedimentmengen im Runoff ließen keine Nährstoffanalysen im Runoff-Sediment zu, so dass hier ein Vergleich der Versuchsjahre wegfällt. Es kann festgehalten werden, dass die ausgetragene Menge an N im Runoff-Wasser der Pflugvariante im Jahr 1999 ca. 3 mal so hoch war als in 1998 (vgl. Tab 18). Für die P-Mengen im Runoff-Wasser der Pflugvariante ergab sich zwischen 1998 und 1999 keine Veränderung.

Tab. 20: Nährstoffausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Mais, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 2001

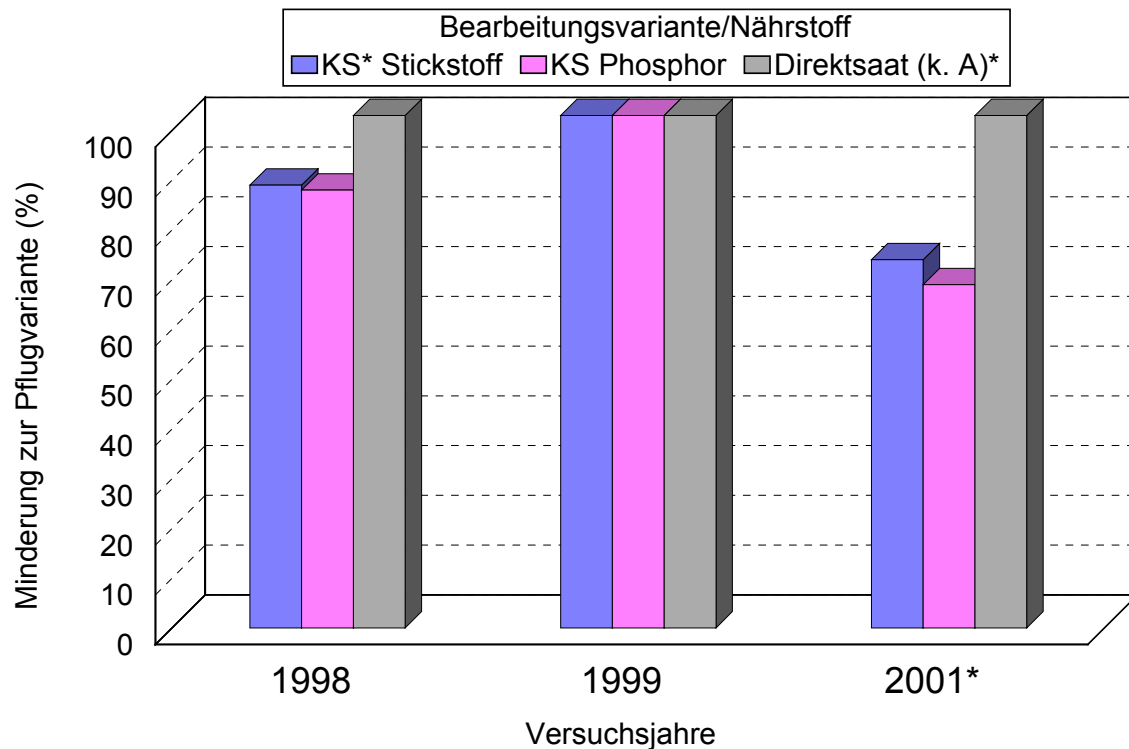
2001 Ereignis- datum	Variante Plot I+II	Nährstoffausträge (g/ha)*		Nährstoffanteile relativ (%)			
		Stickstoff	Phosphor	Stickstoff		Phosphor	
				Wasser	Boden	Wasser	Boden
30.06.	Pflug	180,65	7,5	(100)	n. n.*	(100)	n. n.
	Mulch	47,65	2,4	(100)	n. n.	(100)	n. n.
Summe (kg/ha)	Pflug	0,18	0,0075				
	Mulch	0,05	0,001				

*Nährstoffausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante;

*n. n. = nicht nachgewiesen

Im Versuchsjahr 2001 sind wie für das Jahr 1999 die Nährstoffausträge (N, P) mit dem Runoff-Wasser berechnet worden (vgl. Tab. 20). In beiden Varianten lagen die N- und P-Verluste in der gelösten Phase unter 1 kg/ha. Die Austragsmengen mit dem Runoff-Wasser sind aber höher als in den davor dargestellten Versuchsjahren. Sie betrugen für N in der Pflugvariante 0,18 kg/ha und 0,05 kg/ha in der Variante mit konservierender Bearbeitung. Die P-Austräge lagen bei 0,0075 kg/ha in der gepflügten Variante. Bei Mulchsaat betrug der P-Austrag gegenüber der konventionellen Variante ca. ein Drittel.

Beim Vergleich der Nährstoffausträge der Versuchsjahre mit Oberflächenabflussereignissen (1998, 1999 und 2001) zeigte sich, wie schon bei den zuvor betrachteten Herbizidausträgen, eine deutliche Reduzierung der N- und P-Verluste unter Anwendung der pfluglosen Bestelltechnik (s. Tab. 17 a und 17 b). Die prozentuale Minderung der Nährstoffausträge mit dem Oberflächenabfluss bei angewandter Mulchsaat gegenüber der konventionellen Bestelltechnik mit Pflug veranschaulicht die Abbildung 22.



*KS = Konservierende Bodenbearbeitung; *(k. A) = Kein Abfluss; *2001 = nur Runoff-Wasser

Abb. 22: Minderung des Nährstoffaustrages bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2001 im Mais gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug

In Abbildung 22 gelten die Werte für das Jahr 2001 nur für das Runoff-Wasser. Wie bei den Herbiziden ist eine Minderung der Nährstoffausträge bei konservierender Bodenbearbeitung gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug von 67 bis über 85 % erreicht worden.

6.1.2 Abflussereignisse der Messphasen im Winterraps von 1997 – 2001

In Tabelle 21 sind die Abflussereignisse der Versuchsjahre im Winterraps von 1997 - 2001 mit Angaben über den Jahresniederschlag und die Niederschlagssumme während der Messphasen aufgeführt. Der Niederschlags- und Temperaturverlauf des jeweiligen Versuchsjahres ist im Anhang, Seite 7 – 9 zu entnehmen.

Tab. 21: Messphasen im Winterraps mit Niederschlagsdaten und Anzahl der Abflussereignisse

	Versuchsjahre mit Winterraps				
	1997	1998	1999	2000	2001
Jahresniederschlag/ Jahresmittel (mm)	804 (898)	1108 (898)	915 (898)	920 (898)	996 (898)
Messphase	05.09 - 03.11	21.08 - 15.09	25.08 - 11.10	31.08 - 17.10	28.08 - 23.10
Gesamtniederschlag	131	160	114	138	157
Niederschlagstage	16	17	21	20	27
Niederschlagstage mit Abfluss	0	1	0	4	0

In allen Versuchsjahren (mit Ausnahme des ersten Jahres, in dem die mittlere Niederschlagssumme um ca. 11 % unterschritten wurde) ist der Jahresmittelwert der Niederschlagssumme überschritten worden. In den Jahren 1999 - 2001 zwischen 2 und 11 %, sowie im Jahr 1998 mit 23 % bzw. 2002 mit 33 % (vgl. auch Tab. 10, Kap. 6.1.1). Der Gesamtniederschlag während der Messphasen lag zwischen 110 und 160 mm, was im Durchschnitt zwischen 13 und 17 % des langjährigen Mittels betrug. Aufgrund einer Havarie der Messsysteme am 15.09.1998 verkürzte sich die Messphase bis zu diesem Zeitpunkt (s. Tab. 21). Die Dauer einer Messphase richtete sich größtenteils nach der Erosionsanfälligkeit des Rapses zwischen Aussaat und der Vorwinterentwicklung im Oktober. Sie begann immer einen Tag vor der Applikation des eingesetzten Herbizides und endete kurz vor Beginn der ersten herbstlichen Herbizidapplikation im Winterweizen zwischen Anfang und Mitte Oktober. Während der 5 Versuchsjahre gab es 5 Abflussereignisse von denen 1 im Jahr 1998 und weitere 4 im Jahr 2000 auftraten.

Die Tabellen 22 und 23 charakterisieren die Niederschläge und Oberflächenabflüsse während der 5 Versuchsjahre auf den Versuchspalten (150 m²) der verschiedenen Bearbeitungsvarianten. Wie innerhalb der Messphasen mit Mais wurden grundsätzlich zwei Typen von Niederschlagsereignissen unterschieden. Der erste Typ (Typ 1) bestand aus mehreren kurz aufeinander folgenden Niederschlagsereignissen, von denen jedes Einzelne oft nur von kurzer Dauer und geringen Niederschlagsmengen war. Der zweite Typ bestand aus einem Niederschlagsereignis mit meistens hoher Regenmenge und war von längerer Dauer (meist über 30 Minuten). Diesem Typ (Typ 2) entsprachen alle Ereignisse der Versuchsjahre 1998 und 2000. Niederschläge vom Typ 1 sind nicht registriert worden.

Tab. 22: Niederschlagsereignisse mit Oberflächenabfluss der Versuchsjahre 1998 und 2000 im Winterraps

Jahr	Niederschlag					
	Typ	Datum Beginn (h:min)	Menge (mm)	Menge/ Plot (l/150 m ²)	Dauer (h:min)	I max* (mm/h)/ (mm/min.)
1998	Havarie der Messsysteme am 15.09					
2000	2	07.09.00 (08:38)	10,1	1515	02:46	24/0,4
	2	16.09.00 (05:23)	13,5	2025	01:22	24/0,4
	2	25.09.00 (08:18)	11,0	1650	01:49	30/0,5
	2	27.09.00 (16:00)	3,0	450	00:52	24/0,4

*I max = Maximale Niederschlagsintensität

Das Oberflächenabflussereignis aus dem Jahr 1998 (s. Tab. 21) konnte aufgrund eines massiven Wassereintrittes in die für das Messsystem vorgesehenen Schutzhütten nicht ausgewertet werden. Die in der Tabelle 21 angegebenen Niederschlagsmengen, die Niederschlagsdauer und -intensitäten im September des Jahres 2000 charakterisieren den Verlauf des angeführten Typs 2, mit meistens hoher Regenmenge und -dauer sowie eher geringen bis mittleren Regenintensitäten.

Während der Messphase des Versuchsjahres 2000 mit Winterraps trat nur in der Pflugvariante registrierter Oberflächenabfluss auf. Die Variante mit konservierender Bodenbearbeitung und die Direktsaatvariante blieben ohne registriertes Abflussereignis (s. Tab. 23). Der gemessene Oberflächenabfluss in den Versuchsplots der Pflugvariante lag zwischen 0,15 und knapp 1 mm, was einem Abfluss von ca. 2,5 bis 8 % des gefallen Niederschlags entsprach. Es ist im Versuchsplot Pflug I eine deutliche Steigerung des Abflussgeschehens mit dem Eintritt neuer Abflussereignisse ersichtlich. In Pflug II lässt sich diese Tendenz nicht erkennen. Beim Vergleich der Daten aus Tabelle 23 mit denen der Tabelle 22 ist zu ersehen, dass das kurze und mit relativ wenig Niederschlag eingetretene Ereignis den prozentual höchsten Abfluss ausgelöst hatte. Diese Tendenz konnte auch schon während der Messphase des Jahres 1998 im Mais beobachtet werden, insbesondere wenn mehrere Abflussereignisse aufeinander folgten.

Tab. 23: Oberflächenabflussereignisse in den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) 1998 und 2000 im Winterraps

Jahr	Niederschlag		Abfluss (mm/% des Niederschlages) in den Versuchsplots der Bearbeitungsvarianten					
	Datum/ Typ	Menge (mm)	Pflug I* (mm/%)	Pflug II (mm/%)	Pflug $\bar{X}$ * (mm/%)	Mulch I* (mm/%)	Mulch II (mm/%)	Mulch $\bar{X}$ (mm/%)
1998	15.09.00/ 2	62,1	Havarie der Messsysteme					
2000	07.09.00/ 2	10,1	0,11/1,1	0,35/3,5	0,23/2,3	k. A*	k. A	k. A
	16.09.00/ 2	13,5	0,98/9,7	0,71/5,3	0,845/6,75	k. A	k. A	k. A
	25.09.00/ 2	11,0	0,54/4,9	1,2/10,9	0,87/7,9	k. A	k. A	k. A
	27.09.00/ 2	3,0	0,18/6,0	0,31/10,4	0,245/8,15	k. A	k. A	k. A

*Pflug I = erste Wiederholung Pflugvariante; *Mulch I = erste Wiederholung Mulchvariante;

* $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; *k. A = kein Abfluss

6.1.2.1 Austräge des applizierten Herbizides im Wasser und Boden

In den Tabellen 24 a und 24 b sind die mittleren Sedimentgehalte und Herbizidkonzentrationen im Oberflächenabfluss ("Runoff-Wasser", "Runoff-Sediment") während der Abflussereignisse des Versuchsjahres 2000 dargestellt. Die Variante "Direktsaat" ist in den Tabellen nicht berücksichtigt, da dort kein Oberflächenabfluss aufgetreten ist.

Die im Runoff-Wasser gemessenen mittleren Konzentrationen (19,2 – 74,5 µg/l) an Metazachlor waren ebenfalls größeren Schwankungen unterworfen. Sie nahmen bei weiteren Abflussereignissen tendenziell ab.

Tab. 24 a: Herbizidkonzentration (µg/l) im Runoff-Wasser der Versuchsplots auf der Pflugvariante Während der Abflussereignisse 2000 im Winterraps in (Applikationstermin: 29.08.; Präparat: BUTISAN TOP = 2 l/ha)

Ereignisdatum	Plots: (P) = Pflugvariante	Herbizidkonzentration (µg/l)		
		Metazachlor		
		$\bar{X}$ *	$\pm S$ *	VK*
07.09.00	P I (n = 10)*	46,2	17,35	37,5
	P II (n = 18)	36,7	4,03	11,0
16.09.00	P I (n = 22)	70,0	10,84	15,5
	P II (n = 22)	74,5	9,18	12,3
25.09.00	P I (n = 20)	21,4	2,92	13,7
	P II (n = 23)	22,0	4,99	22,7
27.09.00	P I (n = 13)	19,5	3,64	18,7
	P II (n = 17)	19,2	2,67	13,9

*(n = 10) = Anzahl d. Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%)

Die mittleren Sedimentgehalte im Runoff der Pflugvariante lagen zwischen 3 und 18 g/l und waren je nach Abflussereignis unterschiedlich hoch (vgl. Tab. 24 b). Der Wirkstoff Metazachlor fand sich auch im Runoff-Sediment wieder, wobei die Mittelwerte der Gehalte im Sediment zwischen 110 und 160 µg/kg Boden schwankten. Etwa 4 Wochen nach Applikationstermin ist im Runoff-Sediment kein Metazachlor mehr gemessen worden bzw. lagen die analysierten Werte unterhalb der Nachweisgrenze des Wirkstoffes (s. Tab. 24 b).

Tab. 24 b: Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Herbizidgehalte (µg/kg) im Runoff-Sediment der Versuchsplots auf der Pflugvariante während der Abflussereignisse 2000 im Winter-raps (Applikationstermin: 29.08.; Präparat: BUTISAN TOP = 2 l/ha)

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflugvariante	Sedimentgehalte (g/l)			Herbizidgehalte (µg/kg)		
					Metazachlor		
		$\bar{X}$ *	$\pm S$ *	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
07.09.00	P I (n = 10)*	4,8	2,73	56,6	160,0	29,15	18,2
	P II (n = 18)	6,3	2,44	38,6	157,3	68,13	43,3
16.09.00	P I (n = 22)	14,7	8,08	55,1	116,8	53,31	45,6
	P II (n = 22)	11,5	7,25	62,8	130,0	40,00	30,8
25.09.00	P I (n = 20)	3,1	1,45	47,7	< 0,5	n. b.*	n. b.
	P II (n = 23)	7,9	2,88	36,5	< 0,5	n. b.	n. b.
27.09.00	P I (n = 13)	11,0	2,98	27,1	< 0,5	n. b.	n. b.
	P II (n = 17)	17,7	3,13	17,7	< 0,5	n. b.	n. b.

*(n = 10) = Anzahl d. Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. b. = nicht berechnet

Für die Messphase des Versuchsjahres 2000 mit Oberflächenabfluss ist in Abbildung 23 der Bodenabtrag in den jeweiligen Bearbeitungsvarianten berechnet worden und in Tonnen pro Hektar angegeben. Im Vergleich dazu wurde die Toleranzgrenze des Bodenabtrages für den Versuchsstandort (nach der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung, ABAG) ebenfalls aufgeführt. Die Berechnung der Toleranzgrenze des Bodenabtrages ist in Kap. 6.1.1.1 ausführlich beschrieben.

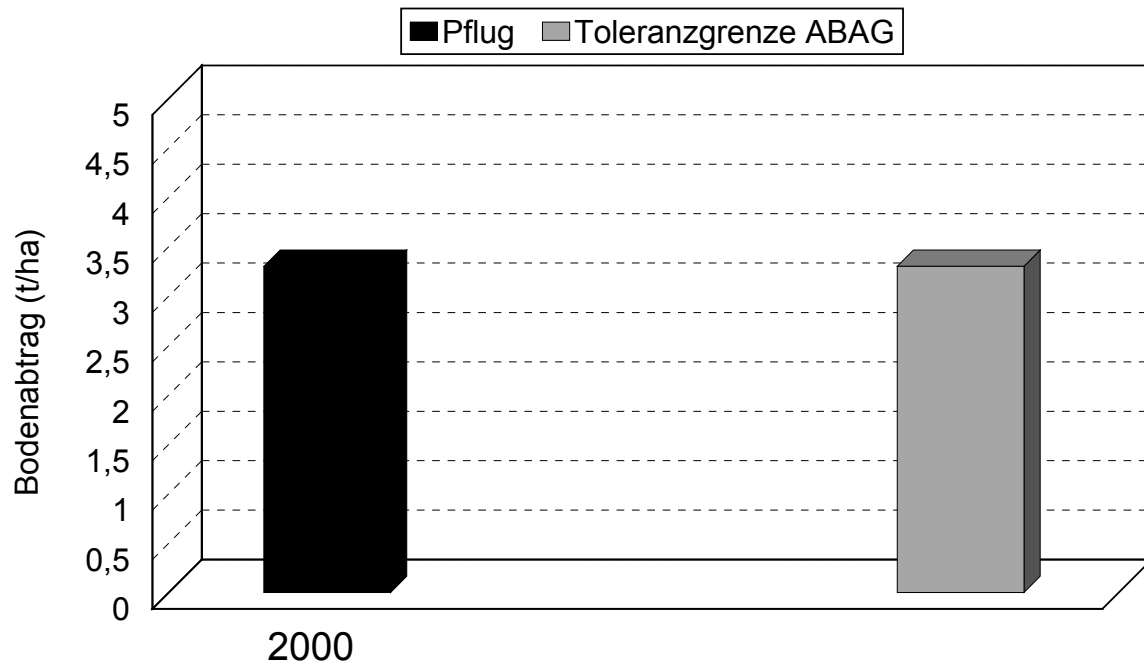


Abb. 23: Bodenabtrag in dem Versuchsjahr mit Oberflächenabfluss im Winterraps und Darstellung der Toleranzgrenze des Bodenabtrages für den Versuchsstandort, berechnet nach der ABAG

Mit 3,1 t/ha Bodenabtrag in der konventionellen Variante mit Pflugeinsatz in der Messphase 2000 im Winterraps wurde die errechnete Toleranzgrenze (3 t/ha/a) knapp überschritten. Für das Versuchsjahr 2000 kann der Bodenabtrag daher höher eingestuft werden. Da in den pfluglosen Varianten (Mulchsaat, Direktsaat) kein registrierter Oberflächenabfluss aufgetreten ist, verdeutlicht das die erosionsmindernde Wirkung der beiden pfluglosen Bestelltechniken. Die Herbizidausträge für Metazachlor und die dazu gehörigen Anteile im Wasser und Boden für das Versuchsjahr 2000 mit Winterraps sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tab. 25: Herbizidausträge von der Bearbeitungsvariante Pflug im Winterraps, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 2000 (Applikation: BUTISAN TOP: 2 l/ha)

2000	Variante Plot I+II	Herbizidausträge (g/ha)*	Herbizidanteile relativ (%)	
Ereignisdatum		Metazachlor	Metazachlor	
			Wasser	Boden
07.09.	Pflug	0,11	79	21
16.09.	Pflug	0,81	76	24
25.09.	Pflug	0,18	> 99	< 1
27.09.	Pflug	0,05	> 99	< 1
Summe (g/ha)	Pflug	1,15		
Σ-Anteil (%)	Pflug		81	19
Austrag (%)	Pflug	0,155	0.125	0.03

*Herbizidausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante

Die Austragssumme an Metazachlor für das Versuchsjahr 2000 betrug 1,15 g/ha, das entsprach ca. 0,15 % der applizierten Aufwandmenge. Die im Runoff der Pflugvariante ermittelten Wirkstoffanteile an Metazachlor lagen bei ca. 20 % für den partikulären Austrag und bei ca. 80 % für den Austrag im Runoff-Wasser (s. Tab. 25). Bei der Betrachtung einzelner Ereignisse stieg der Sedimentanteil leicht über 20 % an. Die Oberflächenabflussereignisse vom 25. und 27.09.2000 traten ca. 4 Wochen nach Applikationstermin auf. Hier ist auffällig, dass kein sedimentgebundener Austrag analytisch nachzuweisen war. Jedoch war in der wässrigen Phase des Runoffs messbares Metazachlor vorhanden und konnte mit der in Tabelle 25 berechneten Summe angegeben werden.

Da in beiden pfluglosen Bearbeitungsvarianten kein Oberflächenabfluss gemessen wurde, erübrigt sich der Vergleich einer prozentualen Minderung der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat gegenüber der konventionellen mit Pflug in Bezug zum Herbizidaustrag des Versuchsjahres 2000. Im Untersuchungsjahr 2000 ist durch konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat eine fast 100 %-ige Minderung des Herbizidaustrages erreicht worden.

6.1.2.2 Austräge von Stickstoff und Phosphor im Wasser und Boden

Die mittleren Sedimentgehalte und Nährstoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss ("Runoff-Wasser", „Runoff-Sediment“) während der Abflussereignisse des Versuchsjahres 2000 im Winterraps sind in den Tabellen 26 a und 26 b dargestellt.

Tab. 26 a: Nährstoffkonzentrationen (mg/l) im Runoff-Wasser der Versuchsplots auf der Pflugvariante während der Abflussereignisse 2000 im Winterraps

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflugvariante	Nährstoffkonzentrationen (mg/l)								
		NO ₃ -N			NH ₄ -N			PO ₄ -P		
		$\bar{X}$ *	$\pm S$ *	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
07.09.	P I (n = 10)*	0,79	0,61	77,0	1,9	1,49	77,5	0,50	0,40	77,5
	P II (n = 18)	0,61	0,30	49,6	0,95	0,45	47,5	0,11	0,07	61,0
16.09.	P I (n = 22)	1,1	0,65	59,5	1,0	0,29	27,8	0,08	0,04	48,7
	P II (n = 22)	1,5	0,60	40,2	1,3	0,40	31,1	0,08	0,04	50,3
25.09.	P I (n = 20)	12,3	9,47	77,2	3,3	1,0	30,8	0,06	0,01	10,5
	P II (n = 23)	18,0	12,72	70,8	2,3	0,45	19,4	n. n.*	n. b.*	n. b.
27.09.	P I (n = 13)	6,3	2,37	37,7	2,8	0,41	14,9	n. n.	n. b.	n. b.
	P II (n = 17)	5,2	3,31	63,8	2,0	0,18	9,1	n. n.	n. b.	n. b.

*(n = 10) = Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. b. = nicht berechnet

Die in Tabelle 26 a dargestellten mittleren Konzentrationen an Nitrat- ($\text{NO}_3\text{-N}$) und Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) im Runoff-Wasser lagen im Versuchsjahr 2000 zwischen 0,5 und 18 mg/l für $\text{NO}_3\text{-N}$ bzw. 0,9 und 3,3 mg/l für $\text{NH}_4\text{-N}$. Während des ersten Abflussereignisses am 07.09.00 sind zum Teil höhere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Vergleich zu den Nitratkonzentrationen gemessen worden. Beim darauffolgenden Ereignis gab es gleich hohe $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen. Sie blieben für $\text{NH}_4\text{-N}$ während der beiden letzten Ereignisse konstant. Für $\text{NO}_3\text{-N}$ erfolgte dagegen wieder ein Anstieg der Konzentrationen. Die Konzentrationen von im Wasser gelöstem Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) sind zwischen 0 und 0,5 mg/l gemessen worden. Im Verlauf der Messphase fielen die P-Konzentrationen im Runoff-Wasser kontinuierlich ab und konnten ab dem vorletzten Ereignis, am 25.09., nicht mehr nachgewiesen werden. Vom Versuchsplot Pflug I sind im Vergleich zu Pflug II die jeweils höheren Werte analysiert worden.

Mögliche Unterschiede der Nährstoffgehalte zwischen gelöster und sedimentgebundener Phase im Runoff zeigt die Tabelle 26 b. Dort sind die mittleren Nährstoffgehalte im Runoff-Sediment dargestellt.

Tab. 26 b: Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Nährstoffgehalte (mg/kg) im Runoff-Sediment der Versuchsplots auf der Pflugvariante während der Abflussereignisse 2000 im Wintertraps

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflugvariante	Sedimentgehalte (g/l)			Nährstoffgehalte (g/kg)					
					N-Gesamt			P-Gesamt		
		$\bar{X}^*$	$\pm S^*$	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
07.09.	P I (n = 10)*	4,8	2,73	56,6	n. n.*	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	P II (n = 18)	6,3	2,44	38,6	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
16.09.	P I (n = 22)	14,7	8,08	55,1	n. n.	n. b.	n. b.	0,53	0,02	4,0
	P II (n = 22)	11,8	7,25	62,8	n. n.	n. b.	n. b.	0,54	0,02	3,7
25.09.	P I (n = 20)	3,1	1,45	47,7	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	P II (n = 23)	7,9	2,88	36,5	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
27.09.	P I (n = 13)	11,0	2,98	27,1	n. n.	n. b.	n. b.	0,56	0,02	3,8
	P II (n = 17)	17,7	3,13	17,7	n. n.	n. b.	n. b.	0,52	0,02	3,9

* (n = 10) = Anzahl d. Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. n. = nicht nachgewiesen; *n. b. = nicht berechnet

Die im Runoff-Sediment enthaltenen Nährstoffe konnten für die Abflussereignisse vom 07.09. und 25.09.2000 nicht analysiert werden, da keine ausreichende Sedimentmenge vorhanden war, um Herbizid- und Nährstofffrachten gleichermaßen analytisch aufzuarbeiten. Zu den Ereignissen am 16.09. und 27.09.2000 konnten die P-Gehalte beider Versuchsplots ermittelt werden. Die in Tabelle 26 b angegebenen Gehalte an Orthophosphat-P (P_2O_5) liegen alle im Bereich zwischen 0,52 und 0,57 g/kg.

Die berechneten Nährstoffausträge für Stickstoff und Phosphor sowie deren Anteile im Wasser und Boden für das Versuchsjahr 2000 mit Winterraps sind in Tabelle 27 dargestellt.

Tab. 27: Nährstoffausträge von der Bearbeitungsvariante Pflug im Winterraps, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 2000

2000 Ereignis- datum	Variante Plot I+II	Nährstoffausträge (g/ha)*		Nährstoffanteile relativ (%)			
		Stickstoff	Phosphor	Stickstoff		Phosphor	
				Wasser	Boden	Wasser	Boden
07.09	Pflug	4,55	0,425		n. n.*		n. n.
16.09.	Pflug	19,95	56,9		n. n.	< 1	> 99
25.09.	Pflug	149,35	0,02		n. n.		n. n.
27.09.	Pflug	15,5	17,05		n. n.	< 1	> 99
Summe (kg/ha)	Pflug	0,19	0,075				

*Nährstoffausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante;

*n. n. = nicht nachgewiesen

Im Versuchsjahr 2000 trat während der Messphase im Winterraps nur in der Pflugvariante Oberflächenabfluss auf. Die zum Teil sehr geringen Sedimentmengen im Runoff ließen keine lückenlose Nährstoffanalyse im Runoff-Sediment zu, so dass hier ein Vergleich der Nährstoffanteile im Runoff des Winterrapses mit denen der Messphasen im Mais schwer zu ziehen ist. Es kann festgehalten werden, dass die ausgetragene Menge an N im Runoff-Wasser der Pflugvariante mit ca. 0,2 kg/ha berechnet wurde. Dies entspricht der ausgetragenen N-Menge des Versuchsjahres 2001 im Mais (vgl. Tab. 27 und Tab. 21, Kap. 6.1.1.2). Mit 0,075 kg/ha ist der P-Austrag berechnet worden (s. Tab. 27). Trotz der nur teilweisen Analyse der Nährstoffgehalte im Runoff-Sediment lässt sich für das Versuchsjahr 2000 der stark sedimentgebundene Austrag an Gesamt-P ablesen.

Da ausschließlich in der Pflugvariante Oberflächenabfluss auftrat, spricht dies für die Minderungswirkung der pfluglosen Bestelltechniken im Vergleich zur konventionellen Technik unter Anwendung des Pfluges.

6.1.3 Abflussereignisse der Messphasen im Winterweizen von 1997 – 2002

In Tabelle 28 sind die Abflussereignisse der Versuchsjahre im Winterweizen von 1997 - 2002 mit Angaben über den Jahresniederschlag und die Niederschlagssumme während der Messphasen aufgeführt. Der Niederschlags- und Temperaturverlauf des jeweiligen Versuchsjahres ist im Anhang den Tabellen 5- 10 und den Abbildungen 13 - 18 zu entnehmen.

Tab. 28: Messphasen im Winterweizen mit Niederschlagsdaten und Anzahl der Abflussereignisse

	Versuchsjahre mit Winterweizen				
	1997 / 98	1998 / 99	1999 / 00	2000 / 01	2001 / 02
Jahresniederschlag/ Jahresmittel (mm)	804 / 1108 (898)	1108 / 915 (898)	915 / 920 (898)	920 / 996 (898)	996 / 1198 (898)
Messphase (Beginn / Ende)	04.11 / 15.03	Havarie	13.10 / 31.03	18.10 - 20.03	25.10 - 11.03
Gesamtniederschlag	317	n. n*	471	287	490
Niederschlagstage	50	n. n.	96	75	78
Niederschlagstage mit Abfluss	0	n. n.	8	0	0

*n. n. = nicht nachgewiesen

Der Zeitraum für die Durchführung der Messphasen im Winterweizen war aufgrund langsamer Herbst- und Frühjahrsentwicklung entsprechend lange angesetzt, so dass die Messungen über die Jahreswende hinaus bis zur Bestockung im Frühjahr erfolgten. In der Tabelle 28 ist die Jahresniederschlagssumme daher für beide Anbaujahre angegeben.

In allen Versuchsjahren (mit Ausnahme des ersten Jahres, in dem die mittlere Niederschlagssumme um ca. 11 % unterschritten wurde) ist der Jahresmittelwert der Niederschlagssumme überschritten worden. In den Jahren 1999-2001 zwischen 2 und 11 %, im Jahr 1998 um 23 %, bzw. 2002 um 33 % (vgl. auch Tab. 10, Kap. 6.1.1). Der Gesamtniederschlag während der Messphasen lag zwischen 287 und 490 mm, was im Durchschnitt zwischen 32 und 55 % des langjährigen Mittels betrug (vgl. Tab. 28). Aufgrund der schon in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Havarie der Messsysteme konnte im Versuchsjahr 1998/99 keine Abflussmessung durchgeführt werden.

Während der 5 Versuchsjahre gab es 8 Abflussereignisse, die alle im Untersuchungsjahr 1999/00 auftraten. Im Gegensatz zu den Messphasen mit Mais und Winterraps trat im Winterweizen Oberflächenabfluss mit den meisten Niederschlagstagen während des Untersuchungszeitraumes auf. Eine Ausnahme stellt das Jahr 1998 in der Messphase mit Mais dar, dort traten die meisten Abflussereignisse mit der höchsten Niederschlagssumme in Verbindung mit den meisten Niederschlagstagen innerhalb des Messzeitraumes auf (s. Tab. 10, Kap. 6.1.1). Ähnliche Niederschlagswerte für die Messphase im Winterweizen gab es im Versuchsjahr 2001/02, jedoch ohne registrierten Oberflächenabfluss. Als problematisch erwiesen sich im Winterhalbjahr aufgetretene Schnee- und Frostperioden. Bei eintretender Schneeschmelze oder Tauwetter trat Schmelzwasser in das Messsystem ein, welches nicht als Oberflächenabfluss gewertet werden konnte. Dies wurde bei der Auswertung der Daten berücksichtigt.

Die Tabellen 29 und 30 charakterisieren die Niederschläge und Oberflächenabflüsse während des Versuchsjahres mit Oberflächenabflussereignissen im Winterweizen auf den verschiedenen Bearbeitungsvarianten.

Tab. 29: Niederschlagsereignisse mit Oberflächenabfluss der Versuchsjahre 1998/1999 und 1999/2000 im Winterweizen

Jahr	Niederschlag					
	Typ	Datum Beginn (h:min)	Menge (mm)	Menge/ Plot (l/150 m ²)	Dauer (h:min)	I max* (mm/h)/ (mm/min.)
1998/99	Havarie der Messsysteme am 15.09					
1999/00	2	22.11.99 (20:55)	9,2	1380	11:30	18/0,3
	2	29.01.00 (14:50)	6,6	990	08:30	24/0,4
	2	24.02.00 (22:00)	20,6	3090	13:00	6/0,1
	2	01.03.00 (01:05)	12,6	1890	14:15	24/0,4
	2	03.03.00 (08:25)	10,2	1575	04:55	54/0,9
	2	08.03.00 (07:50)	24,9	3735	24:55	60/1,0
	2	10.03.00 (20:55)	6,7	1005	13:15	36/0,6
	2	17.03.00 (23:10)	11,3	1695	19:05	24/0,4

*I max = Maximale Niederschlagsintensität

Wie die Tabelle 29 zeigt, waren die Niederschläge während der Messphase im Winterweizen meistens von langer Dauer (Typ 2) und relativ geringer Intensität. In der Literatur wird dieser Niederschlagstyp als Dunne-Typ bezeichnet (DUNNE, 1978). Kurzzeitig traten aber auch höhere Intensitäten auf, beispielsweise während der Ereignisse vom 03.03. und 08.03.2000. Bei Betrachtung der Niederschlagssumme und der Niederschlagsdauer fielen im Schnitt nur ca. 0,5 bis 1 mm Niederschlag in der Stunde, mit Ausnahme des Ereignisses vom 08.03.2000.

Tab. 30: Oberflächenabflussereignisse in den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) 1999/2000 im Winterweizen

Jahr	Niederschlag		Abfluss (mm/% des Niederschlages) auf den Versuchsplots einer Bearbeitungsvariante					
	Datum/ Typ	Menge (mm)	Pflug I* (mm/%)	Pflug II (mm/%)	Pflug $\bar{X}$ * (mm/%)	Mulch I* (mm/%)	Mulch II (mm/ %)	Mulch $\bar{X}$ (mm/%)
1999/ 2000	22.11.99 2	9,2	k. A*	0,05/0,54	0,025/0,252	k. A	k. A	k. A
	29.01.00/ 2	6,6	0,03/0,45	k. A	0,015/0,27	k. A	0,03/0,45	0,015/0,27
	24.02.00/ 2	20,6	0,06/0,29	0,03/0,18	0,045/0,235	0,03/0,18	0,03/0,18	0,03/0,18
	01.03.00/ 2	12,6	0,06/0,48	0,03/0,24	0,045/0,36	k. A	0,03/0,24	0,015/0,12
	03.03.00/ 2	10,2	0,04/0,39	0,03/0,29	0,035/0,39	k. A	0,03/0,39	0,015/0,195
	08.03.00/ 2	24,9	0,06/0,24	0,06/0,24	0,06/0,29	0,04/0,16	0,05/0,2	0,045/0,18
	10.03.00/ 2	6,7	k. A	0,03/0,45	0,015/0,27	k. A	0,03/0,45	0,015/0,27
	17.03.00/ 2	11,3	0,03/0,27	0,03/0,27	0,03/0,27	k. A	0,02/0,18	0,01/0,09

*Pflug I = erste Wiederholung Pflugvariante; *Mulch I = erste Wiederholung Mulchvariante;

* $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; *k. A = kein Abfluss

Aus der Tabelle 30 ist zu ersehen, dass die Oberflächenabflüsse alle gering waren und mit 0,01 bis 0,6 mm durchweg unter 1 % des gefallen Niederschlages lagen. Auf den beiden Versuchsplots der Pflugvariante trat häufiger Oberflächenabfluss auf als auf der Mulchvariante. Von 8 registrierten Abflussereignissen sind nur 2 in Mulch I aufgetreten, während es in Pflug I 6 Ereignisse mit deutlich höheren Abflüssen waren. In den Plots Pflug II und Mulch II trat Oberflächenabfluss gleichhäufig und mit nur geringen Abweichungen in den Abflussmengen auf (s. Tab. 30). Während der Abflussereignisse vom 29.01. und 10.03.2000 gab es keine variantenspezifischen Unterschiede im Abflussgeschehen. Bei allen anderen Ereignissen war jeweils in der Pflugvariante höherer Abfluss zu verzeichnen. Höhere Abflüsse in den Plots der Mulchvariante gegenüber denen in der Pflugvariante sind nicht gemessen worden.

6.1.3.1 Austräge der applizierten Herbizide im Wasser und Boden

In der Tabelle 31 sind die mittleren Sedimentgehalte und Herbizidkonzentrationen in der Wasserphase des Oberflächenabflusses ("Runoff-Wasser") während der Abflussereignisse der Messphase 1999/2000 im Winterweizen dargestellt. Die Variante "Direktsaat" ist in den Tabellen nicht berücksichtigt, da dort kein Oberflächenabfluss aufgetreten ist. Aufgrund der sehr geringen

Sedimentgehalte im Runoff sind keine Herbizid- und Nährstoffgehalte in der festen Phase des Oberflächenabflusses ("Runoff-Sediment") ermittelt worden.

Tab. 31: Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$) im Runoff-Wasser der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1999/2000 im Winterweizen
Applikationstermin: 13.10.99; Präparate: DICURAN = 1,5 l/ha, IPU = 3 l/ha

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflugvariante (M) = Mulchvariante		Sedimentgehalte (g/l)			Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$)					
						Chlortoluron			Isoproturon		
			$\bar{X}$ *	$\pm S$ *	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
22.11.99	P II	(n = 4)*	0,0	n. b.*	n. b.	4,1	0,35	8,4	1,6	0,14	8,8
29.01.00	P I	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	2,0	0,49	24,6	< 0,1	n. b.	n. b.
	M II	(n = 3)	0,0	n. b.	n. b.	3,5	1,06	30,3	0,80	0,09	11,9
24.02.00	P I	(n = 6)	3,4	0,63	18,4	7,5	1,11	14,9	0,54	0,05	10,1
	P II	(n = 4)	0,0	n. b.	n. b.	2,3	0,40	17,3	< 0,1	n. b.	n. b.
	M I	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	2,5	0,50	20,0	< 0,1	n. b.	n. b.
	M II	(n = 3)	0,0	n. b.	n. b.	4,3	0,45	10,4	1,0	0,28	28,8
01.03.00	P I	(n = 6)	6,0	0,83	13,9	6,7	0,93	13,8	< 0,1	n. b.	n. b.
	P II	(n = 3)	0,0	n. b.	n. b.	2,8	0,21	7,5	0,50	n. b.	n. b.
	M II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	5,6	0,05	0,9	1,0	0,00	0,0
03.03.00	P I	(n = 4)	0,0	n. b.	n. b.	6,8	1,44	21,0	< 0,1	n. b.	n. b.
	P II	(n = 3)	0,0	n. b.	n. b.	2,9	0,78	27,1	< 0,1	n. b.	n. b.
	M II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	5,3	0,35	6,7	0,80	0,01	0,6
08.03.00	P I	(n = 6)	5,4	1,34	24,7	6,9	1,33	19,4	< 0,1	n. b.	n. b.
	P II	(n = 6)	0,0	n. b.	n. b.	3,3	0,44	13,5	0,50	0,00	0,0
	M I	(n = 3)	2,9	0,35	12,3	4,2	0,39	9,3	0,65	0,12	17,8
	M II	(n = 5)	0,0	n. b.	n. b.	4,6	0,19	4,0	0,74	0,08	10,8
10.03.00	P II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	3,4	0,57	16,6	< 0,1	n. b.	n. b.
	M II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	4,0	0,45	11,4	0,60	0,10	16,7
17.03.00	P I	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	5,2	0,28	5,4	< 0,1	n. b.	n. b.
	P II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	3,3	0,40	12,1	< 0,1	n. b.	n. b.

*(n = 4) = Anzahl der Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. b. = nicht berechnet

In der Tabelle 31 fallen die geringen Sedimentgehalte im Oberflächenabfluss auf, die bis auf eine Ausnahme am 08.03.2000 ausschließlich in der Pflugvariante registriert wurden und zwar nur im Versuchplot „Pflug I“. Ansonsten trat Oberflächenabfluss ohne messbaren Bodenabtrag auf. Die analysierten Proben ergaben Herbizidkonzentrationen, die auf den ersten Blick sehr gering erscheinen. Allerdings lagen zwischen der Applikation von Chlortoluron und Isoproturon und den registrierten Ereignissen (Ausnahme 22.11.99) schon mehr als 90 Tage. In den Konzentrationen von Chlortoluron (2 - 7,5 $\mu\text{g/l}$) gab es zwischen dem ersten und letzten Abflussereignis kaum signifikante Unterschiede, sowohl in der Pflug- als auch in der Mulchvariante. Klar zu erkennen ist aber die jeweils höhere Wirkstoffkonzentration im Plot I der Pflugvariante, die offensichtlich mit dem Sedimentanteil im Runoff in Verbindung zu bringen ist. Insgesamt gesehen waren die

Konzentrationsunterschiede zwischen den Varianten gering. Für Isoproturon, das nur noch in geringen Mengen vorhanden war, zeigte sich die Tendenz zu höheren Konzentrationen in der Mulchvariante. Sie sind jedoch oft nur knapp über der festgelegten Nachweisgrenze ($< 0,1 \mu\text{g/l}$) analysiert worden. Das erste Ereignis stellt eine Ausnahme dar, hier lag die Konzentration für Isoproturon in der Pflugvariante bei $1,6 \mu\text{g/l}$. Es fehlt aber der Vergleich zur Mulchvariante.

Der Bodenabtrag während der Messphase Winterweizen 1999/2000 ist für die Pflugvariante mit $0,0055 \text{ t/ha}$ und für die Variante ohne Pflug (Mulchsaat) mit $0,0035 \text{ t/ha}$ berechnet worden. Die in Kapitel 6.1.1.1 ermittelte Toleranzgrenze des Bodenabtrages betrug ca. 3 t/ha/a . Im Vergleich zu den Messphasen mit Mais und Winterraps waren das sehr geringe Bodenabträge, bei denen sich die Unterschiede zwischen den Varianten zu relativieren scheinen. Während bei Raps und Mais im Hinblick auf den Bodenabtrag für die Minderungswirkung der pfluglosen Bestelltechniken zwischen 85 - 100 % ermittelt wurde, lag sie im Weizen bei ca. 33 %.

Die Austräge an Chlortoluron und Isoproturon, sowie deren Anteile im Wasser und Boden für das Versuchsjahr 1999/2000 mit Winterweizen sind in Tabelle 32 dargestellt.

Es zeigt sich eine deutliche Zweiteilung hinsichtlich des Herbizidaustrages für das Versuchsjahr 1999/2000. Isoproturon, das Herbizid mit der höchsten Aufwandmenge pro Hektar, wies den prozentual geringsten Austrag sowohl bei der Pflug- als auch bei der Mulchvariante auf. Bezogen auf die applizierte Herbizidmenge an Chlortoluron lag der Austrag im Versuchsjahr 1999/2000 auf der Pflugvariante bei 0,001 %, während er in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung $< 0,001 \%$ lag. In beiden Bearbeitungsvarianten betrugen die Austräge an Isoproturon im Runoff-Wasser weniger als 1 ‰ der applizierten Menge. Hingegen waren an Chlortoluron trotz geringerer Aufwandmenge der höchste Austrag bezogen auf die Applikationsmenge zu verzeichnen. In der Summe der absoluten Austragsmengen einzelner Ereignisse für das Versuchsjahr zeigte sich, dass Isoproturon mit $0,0005 \text{ g/ha}$ und Chlortoluron mit $0,01 \text{ g/ha}$ in der Pflugvariante ausgetragen wurde. Während in der Mulchvariante die doppelte Menge an Isoproturon ($0,001 \text{ g/ha}$) im Runoff-Wasser berechnet wurde, betrug die Austragsmenge an Chlortoluron ($0,005 \text{ g/ha}$) in der Mulchvariante nur die Hälfte gegenüber der Variante mit Pflugeinsatz.

Tab. 32: Herbizidausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Winterweizen, sowie relative Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 1999/2000 (Applikation: DICURAN: 1,5 l/ha, IPU: 3 l/ha)

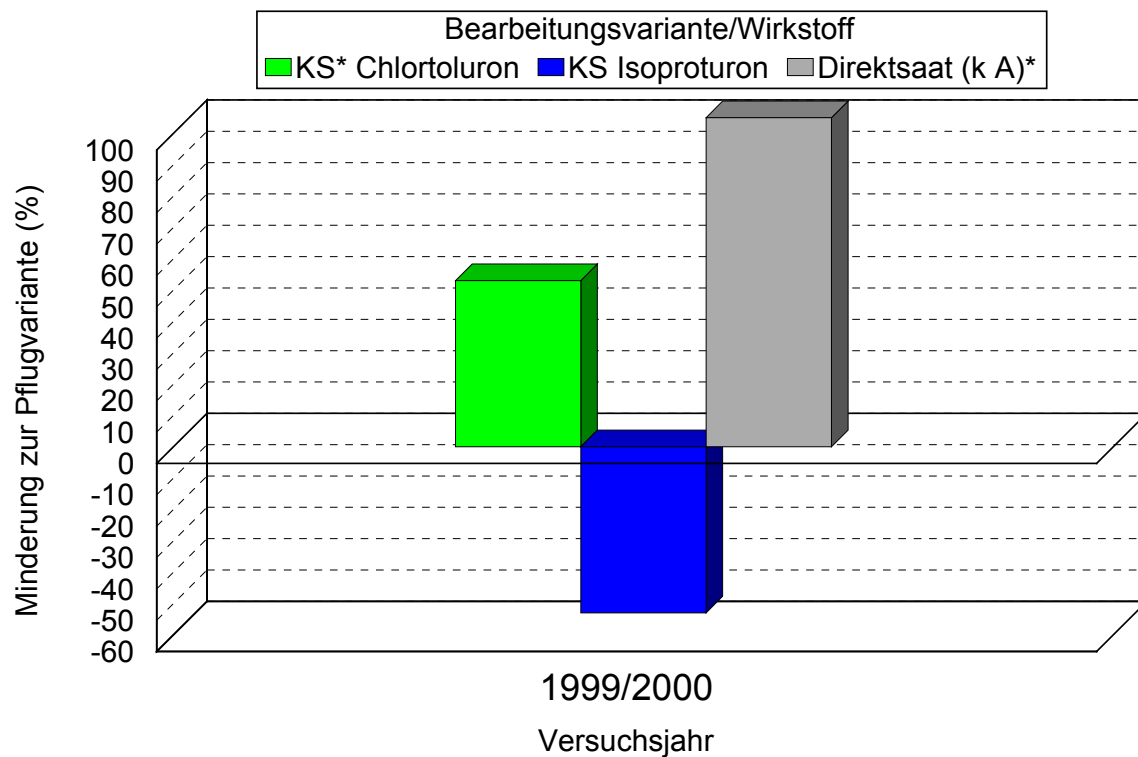
1999/00 Ereignis- datum	Variante Plot I+II	Herbizidausträge (mg/ha)*		Herbizidanteile relativ (%)			
		Chlortoluron	Isoproturon	Chlortoluron		Isoproturon	
				Wasser	Boden	Wasser	Boden
Applikations- menge (g/ha)		1100	1500				
22.11.99	Pflug	0,8	0,3	(100)	n. n. *	(100)	n. n.
29.01.00	Pflug	0,3	< 0,001	(100)	n. n.	(100)	n. n.
	Mulch	0,7	0,1	(100)	n. n.	(100)	n. n.
24.02.00	Pflug	2,25	0,2	(100)	n. n.	(100)	n. n.
	Mulch	1,1	0,2	(100)	n. n.	(100)	n. n.
01.03.00	Pflug	2,3	0,1	(100)	n. n.	(100)	n. n.
	Mulch	0,75	0,2	(100)	n. n.	(100)	n. n.
03.03.00	Pflug	2,0	0,05	(100)	n. n.	(100)	n. n.
	Mulch	0,7	0,1	(100)	n. n.	(100)	n. n.
08.03.00	Pflug	2,6	0,1	(100)	n. n.	(100)	n. n.
	Mulch	1,8	0,25	(100)	n. n.	(100)	n. n.
10.03.00	Pflug	0,4	< 0,001	(100)	n. n.	(100)	n. n.
	Mulch	0,5	0,05	(100)	n. n.	(100)	n. n.
17.03.00	Pflug	1,15	< 0,001	(100)	n. n.	(100)	n. n.
	Mulch	0,3	0,05	(100)	n. n.	(100)	n. n.
Summe (g/ha)	Pflug	0,01	< 0,001				
	Mulch	0,005	0,001				
Σ-Anteil (%)	Pflug			(100)	n. n.	(100)	n. n.
	Mulch			(100)	n. n.	(100)	n. n.
Austrag (%)	Pflug	0,001	< 1 ‰	0,001	n. n.	< 1 ‰	n. n.
	Mulch	< 0,001	< 1 ‰	< 0,001	n. n.	< 1 ‰	n. n.

*Herbizidausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante;

*n. n. = nicht nachgewiesen

In Abbildung 24 ist die prozentuale Minderung der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung gegenüber der konventionellen mit Pflug in Bezug zum Herbizidaustrag des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen dargestellt. Abgesehen von der Direktsaatvariante, auf der kein Oberflächenabfluss registriert wurde, war eine weniger deutliche Minderungswirkung (50 %) des Austrages an Chlortoluron (Runoff-Wasser) auf der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung zu verzeichnen (s. Abb. 24) als in den Versuchsphasen mit Mais und Winterraps. Für Isoproturon ist sogar eine ca. 50 % höhere Austragsmenge in der Mulchvariante gegenüber der Variante mit Pflugeinsatz berechnet worden, die sich jedoch auf das Runoff-Wasser beschränkt. Beim Vergleich der Untersuchungsperioden der 3 Kulturen scheinen sich die Unterschiede während der Messphasen im Winterweizen zu verringern. Ob die

Minderungswirkung bei kleineren bzw. weniger Ereignissen mit Starkniederschlägen im Winterhalbjahr relativiert wird, lässt sich nur tendenziell einschätzen.



*KS = Konservierende Bodenbearbeitung, *(k. A) = Kein Abfluss

Abb. 24: Minderung des Herbizidaustrages bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug

6.1.3.2 Austräge von Stickstoff und Phosphor im Wasser und Boden

Die mittleren Sedimentgehalte und Nährstoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss ("Runoff-Wasser", "Runoff-Sediment") während der Abflussereignisse der Versuchsjahre 1999/2000 sind in der Tabelle 33 dargestellt.

Die Konzentrationen an löslichem Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$) im Runoff-Wasser beider Bearbeitungsvarianten nehmen mit der Dauer der Messphase langsam ab. Während sie in den ersten beiden Abflussereignissen noch im Mittel mit ca. 1 bis 10 mg/l gemessen wurden, verringerte sich die Konzentration an $\text{NO}_3\text{-N}$ auf ca. 1 - 5 mg/l Oberflächenabfluss. Hingegen stiegen die Konzentrationen für $\text{NH}_4\text{-N}$ gegen Ende der Messphase leicht an. Bis auf das Ereignis vom 29.01.00 gab es für $\text{NO}_3\text{-N}$ keine Varianten bezogenen Konzentrationsunterschiede (vgl. Tab. 33).

Tab. 33: Sedimentgehalte (g/l) im Runoff und Nährstoffkonzentrationen (mg/l) im Runoff-Wasser der Versuchsplots Pflug und konservierend (Mulchsaat) während der Abflussereignisse 1999/2000 im Winterweizen

Ereignis- datum	Plots: (P) = Pflugvariante (M) = Mulchvariante		Sedimentgehalte (g/l)			Nährstoffkonzentrationen (mg/l)								
						NO ₃ -N			NH ₄ -N			PO ₄ -P		
			$\bar{X}$ *	$\pm S$ *	VK *	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
22.11.99	P II	(n = 4)*	0,0	n. b.*	n. b.	8,0	4,95	62,3	1,7	0,22	13,2	0,09	0,02	25,0
29.01.00	P I	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	7,5	3,54	47,1	2,0	0,64	32,6	< 0,01	n. b.	n. b.
	M II	(n = 3)	0,0	n. b.	n. b.	9,1	5,63	61,9	0,66	0,19	28,8	< 0,01	n. b.	n. b.
24.02.00	P I	(n = 6)	3,4	0,63	18,4	3,1	0,87	27,8	0,91	0,06	6,5	0,07	0,01	14,2
	P II	(n = 4)	0,0	n. b.	n. b.	2,5	1,00	39,5	1,1	0,31	22,0	0,06	0,01	23,6
	M I	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	5,5	0,07	1,3	0,85	0,02	2,5	0,09	0,00	0,00
	M II	(n = 3)	0,0	n. b.	n. b.	0,74	0,20	26,8	1,4	0,26	18,9	0,08	0,00	0,00
01.03.00	P I	(n = 6)	6,0	0,83	13,9	4,1	1,41	34,1	1,2	0,24	19,5	0,06	0,00	0,00
	P II	(n = 3)	0,0	n. b.	n. b.	2,7	1,24	45,5	1,2	0,29	23,3	0,06	0,00	0,00
	M II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	5,0	0,49	10,0	1,3	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00
03.03.00	P I	(n = 4)	0,0	n. b.	n. b.	2,0	1,80	88,8	1,1	0,19	16,4	0,06	0,01	10,5
	P II	(n = 3)	0,0	n. b.	n. b.	1,0	0,50	48,7	1,2	0,40	32,8	0,10	0,01	70,7
	M II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	1,4	0,69	49,1	1,5	0,28	18,9	0,12	0,05	43,0
08.03.00	P I	(n = 6)	5,4	1,34	24,7	5,4	1,72	31,8	1,5	1,20	76,6	0,07	0,01	10,5
	P II	(n = 6)	0,0	n. b.	n. b.	3,1	1,08	35,2	2,0	0,39	20,0	0,07	0,00	7,4
	M I	(n = 3)	2,9	0,35	12,3	2,2	0,85	38,8	2,2	1,10	48,1	0,15	0,10	66,6
	M II	(n = 5)	0,0	n. b.	n. b.	4,3	1,20	27,7	1,6	0,81	49,9	0,06	0,01	16,7
10.03.00	P II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	2,6	1,34	52,7	2,7	0,28	10,5	0,06	0,00	0,00
	M II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	2,6	0,71	27,2	3,0	0,71	23,6	< 0,01	n. b.	n. b.
17.03.00	P I	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	2,2	0,71	32,1	5,2	0,28	5,4	0,08	0,00	0,00
	P II	(n = 2)	0,0	n. b.	n. b.	3,8	1,48	39,6	3,9	0,71	18,1	0,07	0,01	20,2

*(n = 4) = Anzahl d. Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. b. = nicht berechnet

Das Gleiche galt für NH₄-N. Gelöstes PO₄-P trat in beiden Varianten zwischen < 0,001 und 0,2 mg/l auf. Auch hier sind keine signifikanten Konzentrationsunterschiede in den Varianten gemessen worden. Eine Ausnahme zeigte sich während des Abflussereignisses vom 08.03.00 im Versuchsplot Mulch I (s. Tab. 33).

Tab. 34: Nährstoffausträge von den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) im Winterweizen, sowie relative Nährstoffanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment nach Einzelereignissen für das Versuchsjahr 1999/2000

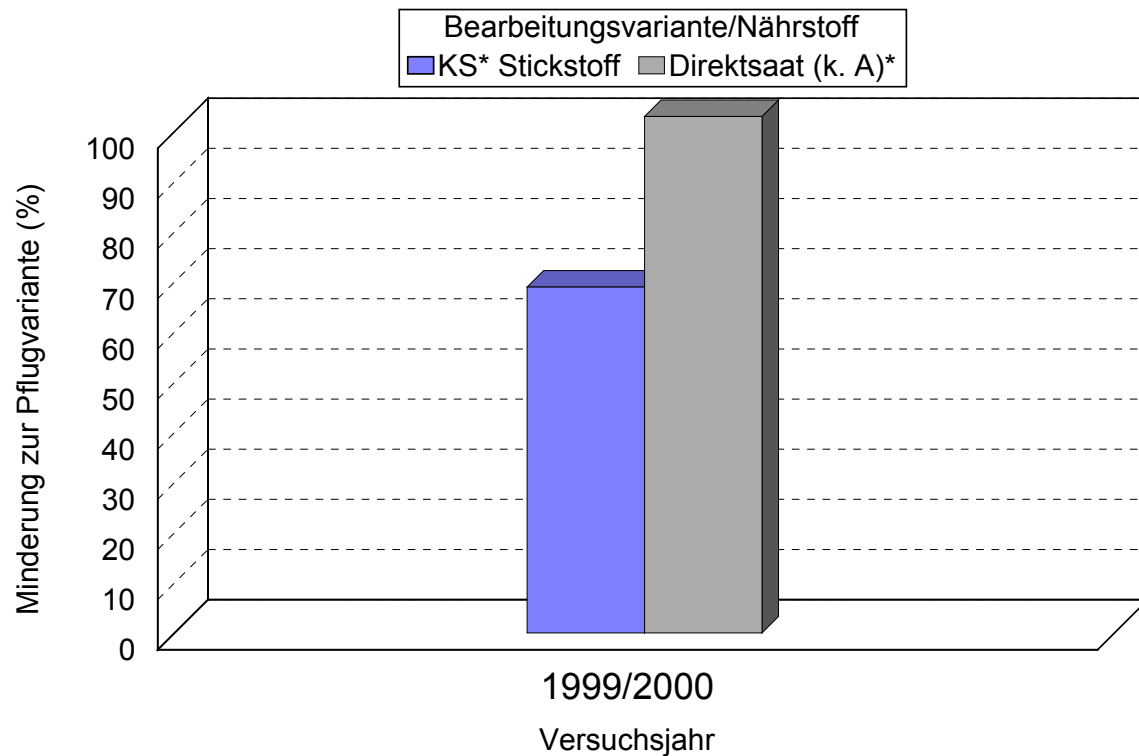
1999/00 Ereignis- datum	Variante	Nährstoffausträge (g/ha)*		Nährstoffanteile (%)			
		Stickstoff	Phosphor	Stickstoff		Phosphor	
				Wasser	Boden	Wasser	Boden
22.11.99	Pflug	2,3	0,005	(100)	n. n *	(100)	n. n
29.01.00	Pflug	1,95	< 0,001	(100)	n. n	(100)	n. n
	Mulch	1,05	< 0,001	(100)	n. n	(100)	n. n
24.02.00	Pflug	1,8	0,015	(100)	n. n	(100)	n. n
	Mulch	1,5	0,01	(100)	n. n	(100)	n. n
01.03.00	Pflug	1,85	0,01	(100)	n. n	(100)	n. n
	Mulch	0,8	< 0,001	(100)	n. n	(100)	n. n
03.03.00	Pflug	1,75	0,01	(100)	n. n	(100)	n. n
	Mulch	0,35	0,01	(100)	n. n	(100)	n. n
08.03.00	Pflug	3,15	0,075	(100)	n. n	(100)	n. n
	Mulch	2,2	0,02	(100)	n. n	(100)	n. n
10.03.00	Pflug	0,8	< 0,001	(100)	n. n	(100)	n. n
	Mulch	0,75	< 0,001	(100)	n. n	(100)	n. n
17.03.00	Pflug	1,6	0,01	(100)	n. n	(100)	n. n
	Mulch	0,15	< 0,001	(100)	n. n	(100)	n. n
Summe (kg/ha)	Pflug	0,015	< 0,001				
	Mulch	0,005	< 0,001				
Σ-Anteil (%)	Pflug			100	n. n	100	n. n
	Mulch			100	n. n	100	n. n

*Nährstoffausträge (mg/ha) = Berechnung aus den Mittelwerten der Versuchsplots I+II je Bearbeitungsvariante;

*n. n. = nicht nachgewiesen

Im Versuchsjahr 1999/2000 sind die Nährstoffausträge (N, P) mit dem Runoff-Wasser berechnet worden. In beiden Varianten lagen Verluste an gelöstem N unter 0,1 kg/ha und < 1 ‰ für gelöstes P. Sie betrugen für N in der Pflugvariante 0,015 kg/ha und 0,005 kg/ha in der Variante mit konservierender Bearbeitung.

Es zeigte sich wie schon bei den zuvor betrachteten Herbizidausträgen eine deutliche Reduzierung der N- und P-Verluste unter Anwendung der pfluglosen Bestelltechnik (s. Tab. 34). Die prozentuale Minderung der Nährstoffausträge mit dem Oberflächenabfluss bei angewandter Mulchsaat gegenüber der konventionellen Bestelltechnik mit Pflug veranschaulicht die Abbildung 25. Die Austräge an gelöstem Phosphor sind in beiden Varianten unter 1 g/ha berechnet worden (s. Tab. 34). Sie sind in der Abbildung 25 nicht berücksichtigt.



*KS = Konservierende Bodenbearbeitung; *(k. A) = Kein Abfluss

Abb. 25: Minderung des Nährstoffaustrages bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug

Auf der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung ist während der Messphase mit Winterweizen des Versuchsjahres 1999/2000 ca. ein Drittel des gelösten N gegenüber der Pflugvariante (= 100 %) ausgetragen worden. Das entspricht einer Reduzierung von ca. 67 %. Die Minderungswirkung war etwas höher im Vergleich zum Herbizidaustrag. Insgesamt gesehen war aber die prozentuale Minderung wesentlich geringer als in den Messphasen mit Mais und Winterraps (s. Kap. 6.1.1 und 6.1.2). Diese Ergebnisse werden in Kapitel 7 noch zu diskutieren sein.

6.2 Boden- und Stoffausträge mit dem Zwischenabfluss

6.2.1 Abflussereignisse der Messphasen im Winterweizen von 1999 – 2002

Mit Hilfe der in Kapitel 5.2.4.2 beschriebenen Dränvlieskonstruktion ist während der Messphasen mit Winterraps und Winterweizen in den Untersuchungsjahren 1999 - 2002 Zwischenabfluss am Untersuchungsstandort erfasst worden. Nach dem Rotationsprinzip standen für Winterweizen 2 Messphasen zur Verfügung, während im Winterraps eine Messphase durchgeführt werden konnte. In der Tabelle 35 sind die Zwischenabflussereignisse in der Fruchtfolge mit Raps und Weizen angegeben.

Tab. 35: Messphasen im Winterweizen und Winterraps mit Niederschlagsdaten und Anzahl der Zwischenabflussereignisse

	Versuchsjahre mit Winterweizen		Versuchsjahr mit Winterraps
	1999 / 00	2001 / 02	2000
Jahresniederschlag/ Jahresmittel (mm)	915 / 920 (898)	996 / 1198 (898)	920 (898)
Messphase (Beginn / Ende)	13.10 / 31.03	25.10 - 11.03	31.08 - 17.10
Gesamtniederschlag	471	490	138
Niederschlagstage	96	78	20
Niederschlagstage mit Zwischenabfluss	15	0	0

Während der Messphase mit Winterweizen 1999/2000 traten 15 Ereignisse mit Zwischenabfluss auf. Trotz der größten Niederschlagsmenge von 490 mm im Versuchsjahr 2001/2002 konnte im Winterweizen kein Zwischenabfluss registriert werden. Im Winterraps stand nur eine Messphase, innerhalb derer kein Zwischenabfluss registriert worden ist, zur Verfügung.

Die Gesamtmengen an Zwischenabfluss während der Messphase mit Winterweizen 1999/2000 (s. Abb. 26), die jeweils an der 6 x 0,5 m breiten Profilwand für jeden Versuchsplot einer Bearbeitungsvariante erfasst wurden, bestanden aus mehreren Einzelereignissen (n = 15) mit jeweils geringen Abflussmengen. Alle nachfolgenden Angaben beziehen sich auf die erwähnte Profilwand mit ca. 3 m² dräniert Fläche. Ein exaktes Einzugsgebiet für jeden Versuchsplot einer Bearbeitungsvariante konnte nicht eindeutig bestimmt werden. Beim erfassten Abfluss handelte es sich um freies Bodenwasser, welches sich in unmittelbarer Nähe der Profilwand am Ende der Plots im mineralischen Unterboden lateral mit dem Gefälle Hang abwärts bewegte.

In Abbildung 26 ist der kumulierte Niederschlag während des Zeitraumes zwischen dem 22.02.2000 und dem 31.03.2000 und der kumulierte Zwischenabfluss, der in diesem Zeitraum erfasst wurde, angegeben.

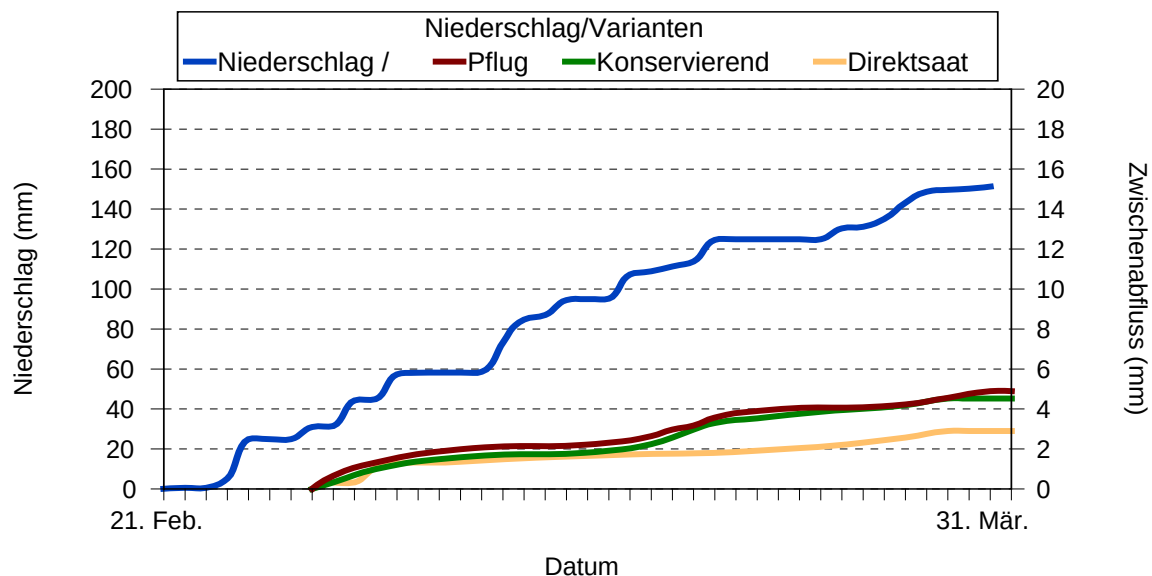


Abb. 26: Kumulierter Niederschlag und Zwischenabfluss vom 22.02. bis 31.03.2000 während der Messphase mit Winterweizen 1999/2000 auf den Bearbeitungsvarianten (n = 2) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

Der Verlauf der Abflusskurven in Abbildung 26 zeigt den Beginn des Zwischenabflusses ca. 4 Tage nach Niederschlagsbeginn. In allen 3 Varianten setzte Zwischenabfluss nach ca. 30 mm Niederschlag ein. Bis etwa Mitte März unterschieden sich die Abflussmengen in den einzelnen Varianten kaum. Danach ist bis zum 31.03.2000 ein weiterer deutlicher Anstieg des Abflusses in den Varianten Pflug und Mulch zu erkennen. In der Direktsaatvariante erfolgte im gleichen Zeitraum ein wesentlich geringerer Gesamtabfluss.

Anders als erwartet trat in der Variante ohne Bodenbearbeitung (Direktsaat) und der Mulchvariante kein höherer Zwischenabfluss gegenüber der konventionellen Variante mit dem Pflug auf. Von 151,9 mm Niederschlag sind in der Pflugvariante sowie in der Mulchvariante ca. 5 mm als Zwischenabfluss registriert worden, das entsprach einer prozentualen Menge von 3,3 %. In der Direktsaatvariante lag der Zwischenabflussanteil bei ca. 2 % (3 mm). Diese Berechnung kann aber nur als tendenzielle Einschätzung gewertet werden, da ein typisches Einzugsgebiet nicht festgelegt werden konnte. Die Eingrenzung nach Art eines Großlysimeters für jeden Versuchsplot hätte eine Begrenzung des Einzugsgebietes ergeben. Die aufgrund der Dränvlieskonstruktion erhaltenen Wasserproben sind daher als erste Tendenz zu interpretieren.

6.2.1.1 Austräge der applizierten Herbizide mit dem Zwischenabfluss

In der Tabelle 36 sind die mittleren Herbizidkonzentrationen an Chlortoluron und Isoproturon während der Messphase Winterweizen 1999/2000 im Zwischenabfluss angegeben. Berücksichtigt wurde nur der gelöste Anteil im Abflusswasser, da der Sedimentanteil für eine HPLC-Analyse zu gering (< 2 g/l) war.

Hinsichtlich der Streuungsmaße (Variationsbreite VB, Standardabweichung $\pm S$, Variationskoeffizient VK) der Herbizid- und Nährstoffkonzentrationen im Zwischenabfluss sind wie bei der Betrachtung der Messwerte im Oberflächenabfluss ähnlich hohe Abweichungen vom arithmetischen Mittelwert berechnet worden. Die errechneten Frachtsummen während der Messphasen mit Zwischenabfluss beschränken sich auf die absoluten Austragsmengen an Herbiziden und Nährstoffen bezogen auf die jeweiligen Varianten. Es bestand kein Zusammenhang zwischen Streuungsmaß und Bearbeitungsvariante. Es fehlt allerdings der Vergleich der Streuungsmaße zwischen gelöster und Sediment gebundener Phase der analysierten Stoffe im Zwischenabfluss.

Tab. 36: Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$) im Zwischenabfluss vom 22.02. bis 31.03.2000 in den Bearbeitungsvarianten (n = 2) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase 1999/2000 im Winterweizen. Applikationstermin: 13.10.99; Präparate: DICURAN = 1,5 l/ha, IPU = 3 l/ha

Varianten (P) = Pflug (M) = Mulchsaat (D) = Direktsaat		Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$)					
		Chlortoluron			Isoproturon		
		$\bar{X}^*$	$\pm S^*$	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
P I	(n = 13)*	1,2	0,80	65,5	0,50	0,00	0,0
P II	(n = 4)	7,2	1,92	26,6	< 0,1	n. b.*	n. b.
M I	(n = 13)	1,2	0,68	55,0	0,93	0,32	34,2
M II	(n = 2)	1,5	1,18	80,6	< 0,1	n. b.	n. b.
D I	(n = 6)	0,97	0,36	37,3	0,76	0,16	21,2
D II	(n = 5)	2,8	0,96	34,4	< 0,1	n. b.	n. b.

*(n = 13) = Anzahl der Proben; * $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; * $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. b. = nicht berechnet

Die analysierten Wirkstoffkonzentrationen an Chlortoluron lagen in der Pflugvariante am höchsten, wobei insgesamt die Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten sehr gering waren (s. Tab. 36). Bei Isoproturon traten in allen Varianten Konzentrationen knapp über der festgelegten Nachweisgrenze von 0,1 $\mu\text{g/l}$ auf. Im Versuchsplot Pflug II und Mulch II wurde die Nachweisgrenze in allen analysierten Wasserproben unterschritten. Beim Vergleich der Wirkstoffkonzentrationen zwischen Oberflächen- und Zwischenabfluss zeigte sich, dass Chlortoluron höhere Konzentrationen im Oberflächenabfluss aufwies als im Zwischenabfluss. Hier muss aber erwähnt werden, dass die

Zeitdauer zwischen Applikationstermin und Abflussereignissen sich deutlich unterscheidet. Während das erste Ereignis innerhalb der Messphase mit Oberflächenabfluss 40 Tage nach der Herbizidapplikation auftrat, erfolgte das erste Ereignis mit Zwischenabfluss mehr als 120 Tage nach Applikationstermin. Aufgrund von nicht registriertem Oberflächenabfluss auf der Variante mit Direktsaat fehlt dort der Vergleich zum Zwischenabfluss. Für den Wirkstoff Isoproturon lassen sich keine Konzentrationsunterschiede zwischen Oberflächen- und Zwischenabfluss erkennen (vgl. Tab. 31, Kap. 6.1.3.1).

Die Austräge an Chlortoluron und Isoproturon mit dem Zwischenabfluss sind in Abbildung 27 angegeben. Im Hinblick auf die Schwierigkeiten bei der Methodik zur Erfassung von Zwischenabflüssen im Feldmaßstab wird nochmals auf die tendenzielle Aussagekraft der Herbizidausträge hingewiesen. Auf eine flächenbezogene Berechnung für ein definiertes Einzugsgebiet ist verzichtet worden. Statt dessen sind die absoluten Frachten mittels einfacher Konzentrations-Abfluss-Beziehung (BACH 1996) berechnet worden, die über das Maß der Abschätzung nicht hinauskommt.

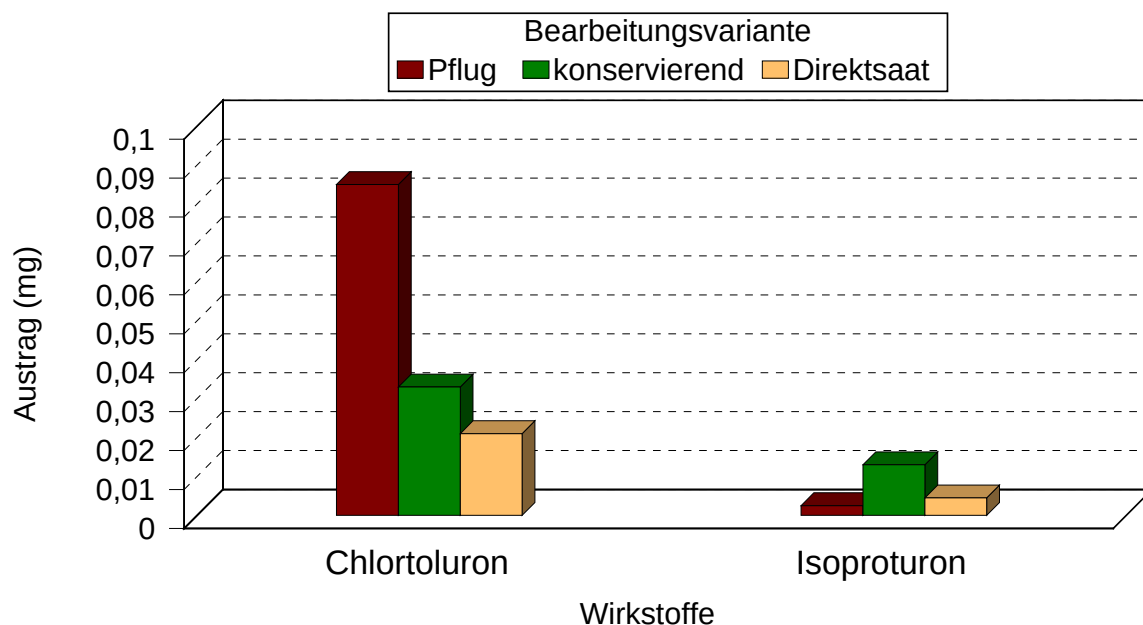


Abb. 27: Herbizidausträge an Chlortoluron und Isoproturon im Zwischenabfluss während der Messphase 1999/00 im Winterweizen vom 22.02. bis 31.03.2000 von den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

Bei den in Abbildung 27 dargestellten Austragsmengen handelt es sich insgesamt um sehr geringe Frachten, die mit dem Zwischenabfluss transportiert wurden. Für Chlortoluron lagen die Mengen zwischen 0,02 und 0,09 mg (Pflug: 0,081 mg, Konservierend: 0,03 mg, Direktsaat: 0,019 mg). Somit reduzierte sich der Chlortoluronaustrag im Zwischenabfluss bei Mulchsaat um ca. 67 % und bei Direktsaat um ca. 77 % gegenüber der gepflügten Variante. Bei Isoproturon zeigte sich eine ande-

re Situation. Die berechneten Frachten im Zwischenabfluss lagen alle wesentlich niedriger als die für Chlortoluron. Die absolute Menge an Isoproturon in der Pflugvariante (0,002 mg) war signifikant geringer als in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung (0,01 mg) und der Direktsaatvariante (0,004 mg). Der Austrag von der Mulchvariante war damit um ca. 80 % höher als in der Pflugvariante, während der Austrag von der Variante mit Direkteinsaat gegenüber der konventionellen Variante um ca. 50 % höher lag. Die Tendenz zu höherem Isoproturon-Austrag von den Varianten mit pflugloser Bestelltechnik war im Oberflächenabfluss während der Messphase Winterweizen 1999/2000 ebenfalls zu sehen (vgl. Tab. 32 und Abb. 24, Kap. 6.1.3.1).

6.2.1.2 Austräge von Stickstoff und Phosphor mit dem Zwischenabfluss

In der Tabelle 37 sind die mittleren Nährstoffkonzentrationen (N, P) während der Messphase Winterweizen 1999/2000 im Zwischenabfluss angegeben. Hinsichtlich einer gewissen Verweildauer des gesammelten Zwischenabflusses in den Auffanggefäßen könnte es zu Umsetzungsprozessen unter den einzelnen Stickstofffraktionen gekommen sein. Diese sind aber während der Wintermonate relativ gering bzw. verlaufen sehr langsam. Der Grund für die Umsetzungsprozesse lag im Abflussereignis selbst, das sich meistens über mehrere Stunden bis Tage hinzog und die Probenahme am darauffolgenden Tag durchgeführt wurde. Aufgrund der geringen Sedimentgehalte im Zwischenabfluss konnte keine Analyse der partikulär gebundenen N- und P-Verbindungen erfolgen. Dennoch sind an dieser Stelle die Konzentrationen der jeweiligen Stickstofffraktionen ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) sowie der in Lösung sich befindenden P-Fraktion ($\text{PO}_4\text{-P}$) dargestellt, um Anhaltspunkte für das vermehrte Auftreten von gelöstem N- und P zu gewinnen.

Tab. 37: Konzentrationen an $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ im Zwischenabfluss vom 22.02. – 31.03.2000 in den Bearbeitungsvarianten (n = 2) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase 1999/00 im Winterweizen

Varianten (P) = Pflug (M) = Mulchsaat (D) = Direktsaat	Nährstoffkonzentrationen (mg/l)								
	$\text{NO}_3\text{-N}$			$\text{NH}_4\text{-N}$			$\text{PO}_4\text{-P}$		
	$\bar{X}^*$	$\pm S^*$	VK*	$\bar{X}$	$\pm S$	VK	$\bar{X}$	$\pm S$	VK
P I (n = 13)*	10,6	4,54	43,0	1,0	0,41	39,5	0,11	0,10	91,2
P II (n = 4)	3,3	2,10	65,0	0,80	0,16	21,3	n. b.*	n. b.	n. b.
M I (n = 13)	10,4	5,22	50,3	1,3	0,78	58,8	0,07	0,03	41,8
M II (n = 2)	5,5	2,47	45,4	1,0	0,99	99,0	< 0,01	n. b.	n. b.
D I (n = 6)	6,3	1,69	27,0	1,1	0,61	57,2	0,05	0,02	32,7
D II (n = 5)	2,8	2,30	82,9	0,73	0,30	40,9	0,07	0,02	30,6

*(n = 13) = Anzahl der Proben; $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; $\pm S$ = Standardabweichung;

*VK = Variationskoeffizient (%); *n. b. = nicht berechnet

Die mittleren Konzentrationen an gelöstem Stickstoff in der Pflugvariante sind mit 3 bis 11 mg/l ($\text{NO}_3\text{-N}$) und 0,7 bis 1,0 mg/l ($\text{NH}_4\text{-N}$) ähnlich wie in der Mulchvariante gemessen worden. Etwas geringer lagen die Werte in der Variante mit Direkteinsaat (s. Tab. 37). Für gelöstes Phosphat lagen die Konzentrationen mit Ausnahme des Versuchsplots Pflug I zwischen 0,05 und 0,07 mg/l. Im Versuchsplot Mulch II konnte kein nachweisbares $\text{PO}_4\text{-P}$ analysiert werden.

Die absoluten Austräge an gelöstem Stickstoff und Phosphor mit dem Zwischenabfluss der Messphase Winterweizen 1999/2000 sind in Abbildung 28 angegeben.

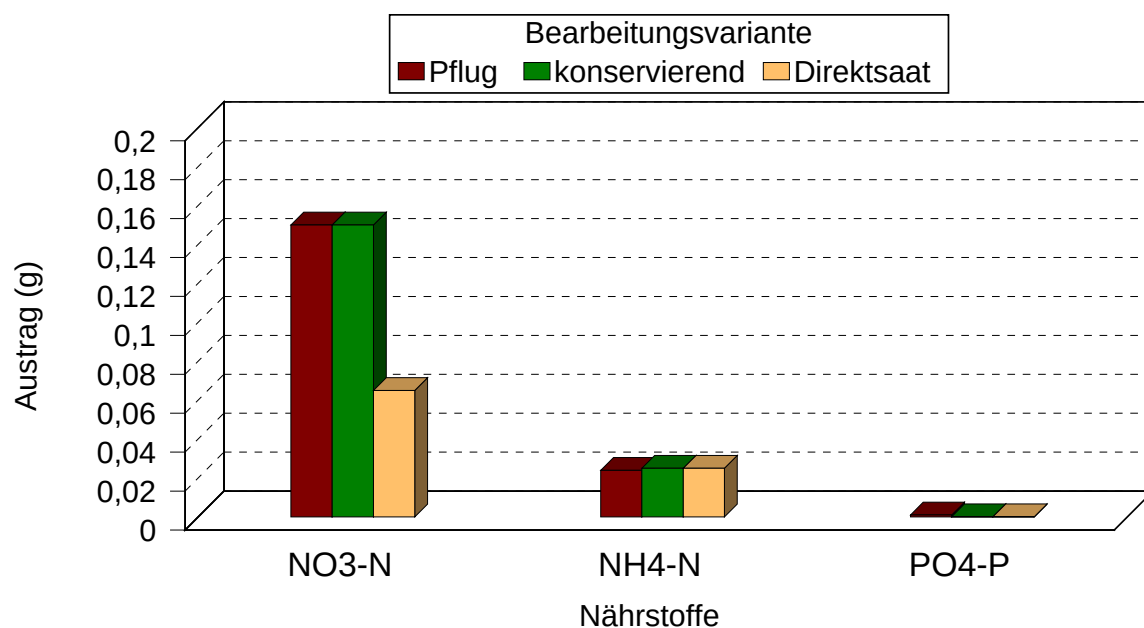


Abb. 28: Nährstoffausträge an gelöstem Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) und Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) im Zwischenabfluss während der Messphase 1999/00 im Winterweizen vom 22.02. bis 31.03.2000 in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

Die in Abbildung 28 dargestellten Frachten an N und P im Zwischenabfluss liegen alle weit unter 1 kg. Sie bewegen sich im Bereich von weniger als 1 g für jede Variante. Im Vergleich zum Oberflächenabfluss sind die Gesamtabflüsse des Zwischenabflusses sehr gering. Zudem scheinen die Austräge an Bodenmaterial ebenfalls sehr gering zu sein. Eine Minderungswirkung der Nährstoffausträge in den pfluglosen Bearbeitungsvarianten war nur für $\text{NO}_3\text{-N}$ in der Variante mit Direkteinsaat zu erkennen. Hier war der Austrag mit 0,06 mg $\text{NO}_3\text{-N}$ um ca. 58 % geringer gegenüber der Pflug- und Mulchvariante, in denen mit jeweils 0,145 mg der gleich hohe Austrag berechnet wurde. Im Austrag an $\text{NH}_4\text{-N}$ (0,02 mg) waren keine variantenspezifischen Unterschiede zu erkennen. Bei $\text{PO}_4\text{-P}$ ist in den pfluglosen Varianten kein Austrag festgestellt worden, während in der Pflugvariante eine sehr geringe Menge analysiert wurde.

Bei der Gesamtbetrachtung des Austragspfades Zwischenabfluss gab es für die Messphase im Winterweizen keinen Hinweis auf einen vermehrten Abfluss und Stoffaustrag in den pfluglosen Bearbeitungsvarianten. Der höhere Austrag des Herbizides Isoproturon in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat beschränkte sich nicht auf den Zwischenabfluss, sondern ist auch im Oberflächenabfluss festgestellt worden (s. Abb. 28 und Abb. 24, Kap. 6.1.3.1).

6.3 Boden- und Stoffausträge über Drainageabflüsse

Mit Hilfe der in Abbildung 16, Kapitel 5.2.4.3 beschriebenen Drainageabschnitte konnten während der Messphasen mit Winterraps 1998 zwei Ereignisse mit Drainageabfluss, innerhalb der Messphase Winterweizen 1999/2000 sind 4 Abflussereignisse über Dränagen erfasst worden. Im Hinblick auf die berechneten Stoffausträge mit dem Dränagewasser sind die Stoffe nur in gelöster Form berücksichtigt worden, da der partikuläre Austrag aufgrund zu geringer Sedimentmengen (< 2 g/l) nicht analysiert wurde.

6.3.1 Abflussereignisse der Messphase im Winterraps 1998

Die Messphase im Winterraps 1998 erstreckte sich vom 21. August bis zum 16. Oktober 1998. In dieser Zeit fielen 160 mm Niederschlag. Am 07.09.98 ist das Herbizid "Butisan Star" (Aufwandmenge: 2 l/ha) mit dem Wirkstoff Metazachlor (Wirkstoffmenge: 750 g/ha) appliziert worden. Eine mineralische Düngergabe von 40 kg/ha N wurde als Ammonium-Nitrat-Harnstofflösung (AHL) am 14.09. aufgebracht. Mit Hilfe der Drainagestränge konnten 2 Abflussereignisse erfasst werden (s. Abb. 16). Die Herbizid- und Nährstofffrachten aus den ca. 120 m² umfassenden Flächen zwischen den 2 Drainagesträngen auf den 3 Bearbeitungsvarianten wurden quantifiziert. In der Abbildung 29 sind die Niederschlagstage mit erfassten Drainageabflüssen und den dazugehörigen Abflussraten der Drainageabschnitte für die jeweiligen Varianten dargestellt.

Während des ersten Abflussereignisses vom 14. bis 19. September ist besonders in der Pflugvariante eine hohe Abflussrate (432 l/h) pro Stunde gemessen worden. Mit 315 l/h in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung und 280 l/h in der Direktsaatvariante wurde die Abflussrate deutlich niedriger bestimmt. Auffällig in Abbildung 29 sind die zeitlich sehr eng begrenzten Abflussereignisse mit hohen Abflussraten. Am deutlichsten zeigte sich dies in der Pflugvariante, bei der die Schwankungen aber auch am stärksten sind. Auf den konservierend bearbeiteten Flächen war die Abflussrate zwar geringer, jedoch kontinuierlicher über die Tage verteilt. Während des

zweiten Ereignisses vom 08.10.98 bis zum 13.10.98 wurde nur ein Bruchteil der Abflussraten gegenüber dem früheren Zeitraum ermittelt (vgl. Abb. 29). Liegen die Abflussraten in der Pflugvariante nur zwischen 6 (08.10.) und 2 l/h (12.10.), bzw. in der Mulchvariante bei 9 l/h (08.10.), so wurde an den Entnahmestellen der Drainageausläufe in der Variante mit Direktsaat 44 l/h (08.10.), 26 l/h (12.10.) und am 13.10. eine Abflussrate von 9 l/h gemessen. In der Pflugvariante waren die Schüttungen der Dränagen meistens von hoher Abflussrate und sehr kurzer Dauer geprägt. Anders in den pfluglosen Bearbeitungsvarianten, hier waren, verbunden mit einer deutlich längeren Abflussdauer, weniger hohe Abflussraten registriert worden (vgl. Abb. 29).

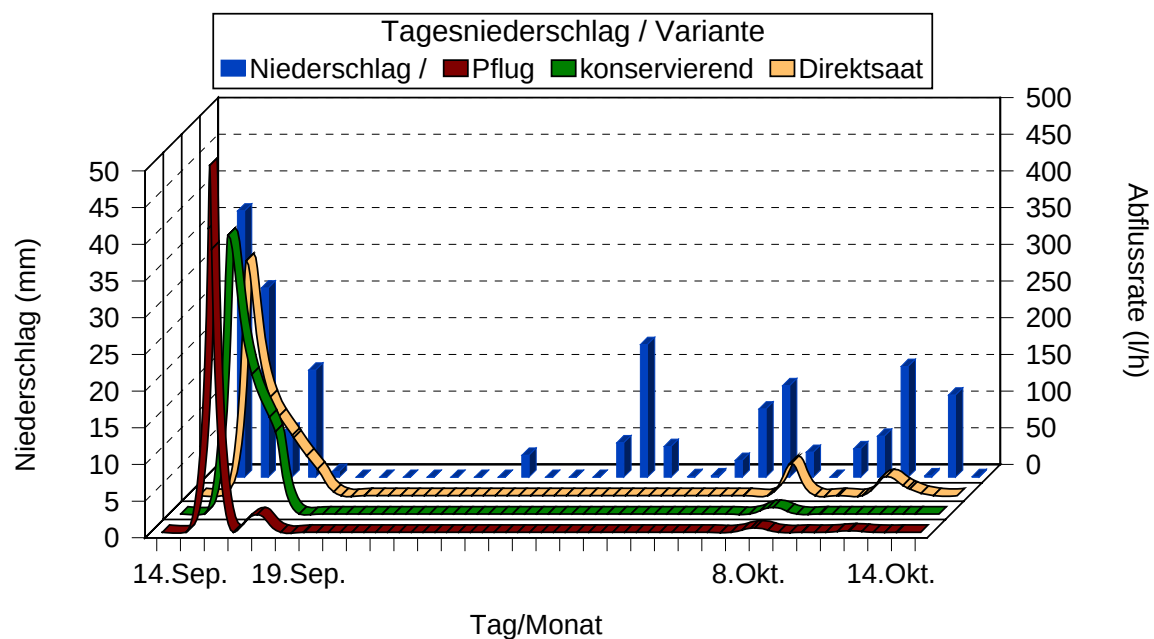


Abb. 29: Tagesniederschläge und Dränagenabfluss in den Bearbeitungsvarianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase im Winterraps 1998

Die beschriebene Charakteristik der Drainageabflüsse erklärt auch die höheren Gesamtabflussmengen in den pfluglosen Bearbeitungsvarianten gegenüber der konventionellen Variante mit Pflugeinsatz in Abbildung 30. Im Zeitraum innerhalb des ersten Abflussereignisses fielen 84 mm Niederschlag. In der Pflugvariante wurde ein Gesamtabfluss von knapp 50 mm berechnet. Die Gesamtmenge an Dränagewasser in den beiden pfluglosen Varianten wurde mit 94 mm (Mulchvariante) und 80 mm (Direktsaatvariante) berechnet. Der gemessene Gesamtabfluss in der Pflugvariante würde, bezogen auf das definierte Einzugsgebiet, ca. 57 % des gefallen Niederschlages betragen. Das entspräche ca. 95 % in der Direktsaatvariante und 112 % in der Mulchvariante (vgl. Abb. 30). Es ist als höchst unwahrscheinlich anzusehen, dass diese Abflussmengen aus der 120 m² umfassenden Fläche zwischen oberem und unterem Drainagestrang stammten. Es muss ein Zufluss erfolgt sein, der außerhalb dieser Fläche stammt und gleichfalls nicht vom oberen Hangbe-

reich eindringen konnte, da die dortigen Wasserströme vom oberen Dränagestrang aufgefangen werden.

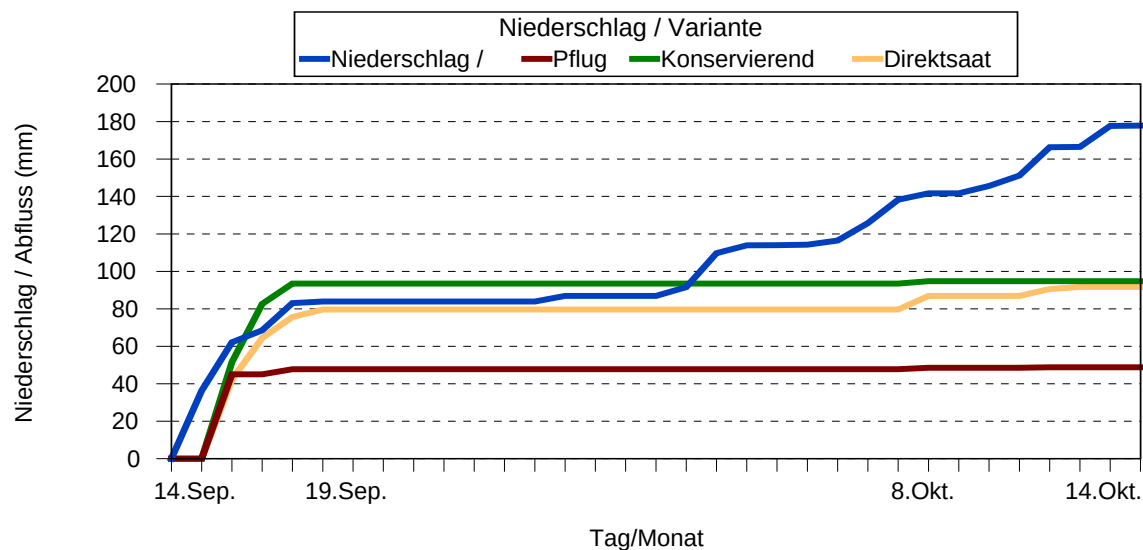


Abb. 30: Kumulierter Niederschlag und Dränagenabfluss in den Bearbeitungsvarianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase im Winterraps 1998

Bis zum zweiten Abflussereignis vergingen ca. 20 Tage in denen knapp 55 mm Niederschlag fielen. Am Ende des zweiten Ereignisses fielen ebenfalls ca. 80 mm Niederschlag, der jedoch nur in der Variante mit Direktsaat größere Abflussmengen (12 mm) aus den Dränagen ergab (s. Abb. 30), während in der Mulchvariante (1 mm) und in der Pflugvariante (3 mm) relativ geringe Mengen berechnet wurden. Aus den Abbildungen 29 und 30 lässt sich ableiten, dass hohe Abflussraten und -mengen an hohe Niederschläge von kurzer Dauer gebunden waren.

6.3.1.1 Austräge des applizierten Herbizides Metazachlor mit dem Dränageabfluss

Zur quantitativen Berechnung von flächenhaften Herbizid- und Nährstoffausträgen mit dem Dränagewasser konnten nach den gewonnenen Abflussdaten keine zuverlässigen Werte angegeben werden. Mit Hilfe der Extrapolationsmethode war es aber durchaus möglich, die absolut ausgetragenen Mengen an Metazachlor sowie gelöstem Stickstoff und Phosphor zu berechnen.

Nach statistischer Prüfung der in Tabelle 40 und Tabelle 41 angegebenen Messwerte von Herbizid- und Nährstoffkonzentrationen gab es hinsichtlich der starken Streuung vom Mittelwert kaum Unterschiede im Vergleich der Messwerte zum Zwischenabfluss. Die Berechnung von Frachtsummen an Herbiziden und Nährstoffen im Dränagewasser ist in Anlehnung an die berechneten Frachten in

Kapitel 6.2.1.1 durchgeführt worden. Zur Berechnung der Frachtsummen an Metazachlor sowie an gelöstem N und P im Dränagewasser (s. Tab. 38 und Tab. 39) wurde keine Varianzanalyse vorgenommen, da die zeitlich kurz hintereinander gewonnenen Abflussproben ($n = 2$) nur sehr geringe Konzentrationsunterschiede aufwiesen. Die Bildung des arithmetischen Mittelwertes aus 2 gewonnenen Proben reichte daher aus, um eine Schätzung der ausgetragenen Stoffmengen vorzunehmen.

In der Tabelle 38 sind die Konzentrationen (Mittelwerte) des applizierten Herbizides Metazachlor im Dränagewasser für die jeweiligen Bearbeitungsvarianten nach erfolgtem Abflussereignis angegeben.

Während des ersten Abflussereignisses halbierten sich in etwa die mittleren Konzentrationen an Metazachlor von 58,4 µg/l (Pflugvariante), 96,6 µg/l (Mulchvariante) und 60,6 µg/l (Direktsaatvariante) am ersten gemessenen Abflusstag (15.09.98) auf 30 µg/l am 17.09.98 in der Pflugvariante. In den Varianten ohne Pflugeinsatz betrugen die Konzentrationen am vorletzten Abflusstag (17.09.98) nur noch ein Drittel der am 15.09.98 gemessenen Werte (s. Tab. 38). Zu Beginn des zweiten Ereignisses ca. 20 Tage später sind, bis auf eine Ausnahme am 08.10.98 in der Pflugvariante (4,0 µg/l), keine Herbizidnachweise im Dränagewasser analysiert worden. Beim Blick auf den Applikationstermin vom 07.09.98 ist anzunehmen, dass ca. 30 Tage nach Herbizidapplikation kein Metazachlor mehr im Boden vorhanden war, welches sich in gelöster Form im Dränagewasser befinden könnte. Hinsichtlich der Konzentrationsunterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten zeigt die Mulchvariante vor allem am ersten Abflusstag eine deutlich höhere Wirkstoffkonzentration als in den übrigen Varianten. Gegen Ende des ersten Ereignisses relativieren sich diese Differenzen.

Tab. 38: Mittlere Konzentrationen ($\mu\text{g/l}$) an Metazachlor im Dränagewasser zwischen dem 15.09. und 13.10.1998 in den Varianten ($n = 1$) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während der Messphase im Winterraps. Applikationstermin: 07.09.98 (BUTISAN TOP = 2 l/ha)

Ereignis- datum	Varianten	Herbizidkonzentration ($\mu\text{g/l}$), Proben ($n = 2$)
		Metazachlor
		$\bar{X}$ *
15.09.98	Pflug	58,4
	Mulch	96,6
	Direktsaat	60,6
16.09.98	Pflug	k. A.*
	Mulch	42,2
	Direktsaat	26,0
17.09.98	Pflug	30,0
	Mulch	31,4
	Direktsaat	23,8
18.09.98	Pflug	k. A.
	Mulch	k. A.
	Direktsaat	< 0,1
08.10.98	Pflug	4,0
	Mulch	< 0,1
	Direktsaat	< 0,1
12.10.98	Pflug	< 0,1
	Mulch	k. A.
	Direktsaat	< 0,1
13.10.98	Pflug	k. A.
	Mulch	k. A.
	Direktsaat	< 0,1

* $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; *k. A. = Kein Abfluss

Die berechneten absoluten Austräge des angewandten Wirkstoffes Metazachlor im Dränagewasser sind in Abbildung 31 dargestellt. Bei Berechnung des Austrages an Metazachlor mit dem Dränagewasser nach einer Konzentrations-Abfluss-Beziehung zeigt sich in Abbildung 31, dass in den pfluglosen Varianten signifikant höhere Frachten des Wirkstoffes gemessen wurden. Der Grund hierfür ist im höheren Gesamtabfluss der Varianten Mulch- und Direktsaat zu sehen, sowie in den deutlich erhöhten Konzentrationen, insbesondere in der Mulchvariante (vgl. Abb. 30 und Tab. 36). Demnach war der Austrag an Metazachlor in der Mulchvariante mit 0,8 g um ca. 150 % und in der Direktsaatvariante mit 0,4 g um ca. 28 % höher als in der Pflugvariante (0,32 g).

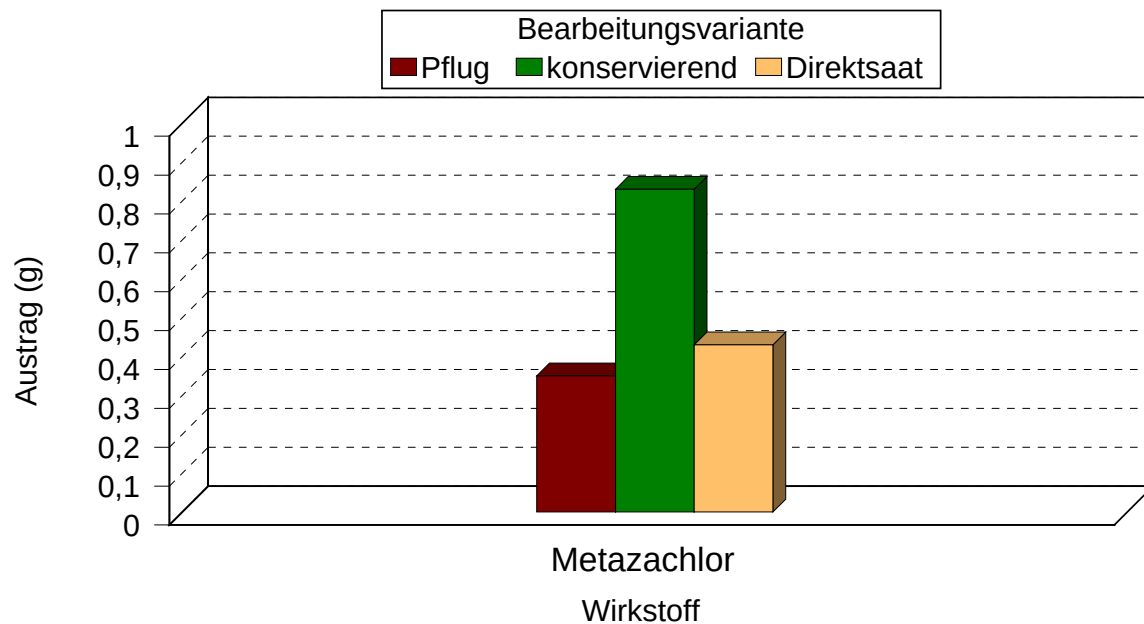


Abb. 31: Wirkstoffaustrag an Metazachlor im Drainageabfluss zwischen dem 15.09. und 13.10.1998 während der Messphase im Winterraps in den Varianten Pflug, konservierend Mulchsaat) und Direktsaat

Aufgrund des zuvor beschriebenen Niederschlags-Abflussgeschehens kann aber nicht von einem vermehrten vertikalen Stofftransport in den pfluglosen Bearbeitungsvarianten ausgegangen werden. Auffällig waren jedoch die Konzentrationsunterschiede zwischen der Pflug- und Mulchvariante am ersten Abflusstag.

6.2.1.2 Austräge von Stickstoff und Phosphor mit dem Drainageabfluss

Die Konzentrationen (Mittelwerte) an gelöstem Stickstoff und Phosphor im Drainagewasser sind in der Tabelle 39 für die jeweiligen Bearbeitungsvarianten nach erfolgtem Abflussereignis angegeben.

Die im Drainagewasser gemessenen $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen lagen alle im Bereich zwischen 6 mg/l und 44 mg/l, wobei in der Direktsaatvariante, bis auf das Ereignis am 17.09.98 die jeweils höheren Konzentrationen gegenüber den beiden anderen Varianten auftraten (s. Tab. 39). Für $\text{NH}_4\text{-N}$ sind Konzentrationen von 0,04 bis 0,4 mg/l aufgetreten. Variantenspezifische Unterschiede traten nur in geringem Maße auf. Bei den Werten für $\text{PO}_4\text{-P}$ waren keine eindeutigen Konzentrationsverläufe zu erkennen, außer die sehr breite Streuung der Werte. Hieraus lässt sich keine Tendenz hinsichtlich Varianten bezogener Konzentrationsunterschiede ableiten.

Tab. 39: Konzentrationen (mg/l) an $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ im Dränagewasser zwischen dem 15.09. und 13.10.1998 während der Messphase im Winterraps in den Varianten (n = 2) Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

Ereignis- datum	Varianten	Nährstoffkonzentrationen (mg/l), n = 2		
		$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$
		$\bar{X}^*$	$\bar{X}$	$\bar{X}$
15.09.98	Pflug	16,0	0,20	0,70
	Mulch	22,0	0,20	0,08
	Direktsaat	35,6	0,33	0,06
16.09.98	Pflug	k. A.*	k. A.	k. A.
	Mulch	20,0	0,16	0,09
	Direktsaat	43,4	0,06	0,06
17.09.98	Pflug	8,2	0,08	0,31
	Mulch	20,7	0,17	2,44
	Direktsaat	6,6	0,15	0,04
18.09.98	Pflug	k. A.	k. A.	k. A.
	Mulch	k. A.	k. A.	k. A.
	Direktsaat	9,8	0,1	0,06
08.10.98	Pflug	27,8	0,11	0,62
	Mulch	21,3	0,19	0,54
	Direktsaat	12,1	0,14	0,03
12.10.98	Pflug	15,8	0,14	0,04
	Mulch	k. A.	k. A.	k. A.
	Direktsaat	37,1	0,13	0,9
13.10.98	Pflug	k. A.	k. A.	k. A.
	Mulch	k. A.	k. A.	k. A.
	Direktsaat	25,5	0,04	0,04

* $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; *k. A. = Kein Abfluss

Die absoluten Austragsmengen an gelöstem Stickstoff sind alle deutlich unter 1 kg berechnet worden. Wie beim Herbizidaustrag sind die höheren Austräge an N in den pfluglosen Bearbeitungsvarianten durch die jeweils größere Gesamtabflussmenge mit erhöhten Konzentrationen zu erklären. Die Variante mit konservierender Bodenbearbeitung wies mit 241 g die ca. 3-fache Menge gegenüber der Pflugvariante (92 g) auf, während in der Variante mit Direkteinsaat (339 g) die fast 4-fache Menge an $\text{NO}_3\text{-N}$ ausgetragen worden ist (s. Abb. 32). Die Frachten an $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ lagen in allen Varianten zwischen 0 - 5 g.

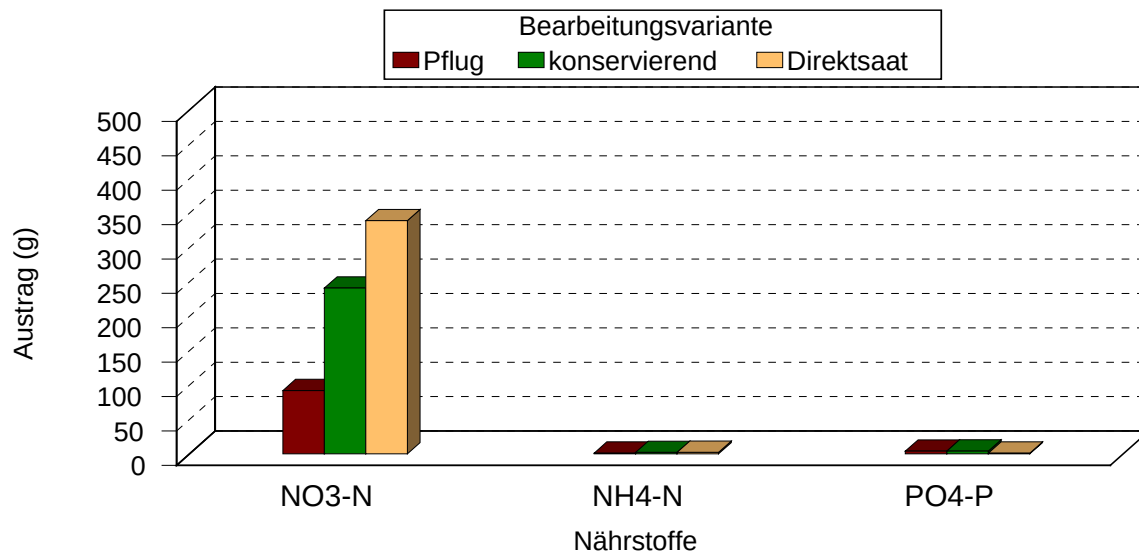


Abb. 32: Nährstoffausträge an gelöstem Stickstoff (NO₃-N, NH₄-N) und Phosphor (PO₄-P) im Dränagewasser während der Messphase 1998 im Winterraps zwischen dem 15.09. und 13.10.1998 in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

6.3.2 Abflussereignisse der Messphasen im Winterweizen 1999/2000

Die Messphase im Winterweizen 1999/2000 erstreckte sich vom 13. Oktober 1999 bis zum 31. März 2000. In dieser Zeit fielen 471 mm Niederschlag. Am 13.10.99 sind die Herbizide "Dicuran" (Aufwandmenge: 1,5 l/ha) mit dem Wirkstoff Chlortoluron (Wirkstoffmenge: 1100 g/ha) und „IPU“ (Aufwandmenge: 3 l/ha) mit dem Wirkstoff Isoproturon (Wirkstoffmenge: 1500 g/ha) appliziert worden. Die Niederschlagstage mit erfassten Dränageabflüssen und den dazugehörigen Abflussraten der Dränageabschnitte für die jeweiligen Varianten sind in der Abbildung 33 dargestellt.

Während des Abflussereignisses vom 09. bis 15. März war eine ähnliche Abflusssequenz in den Bearbeitungsvarianten wie im Versuchsjahr 1998 mit Winterraps zu erkennen. Die höchste Abflussrate (1800 l/h, 09.03.2000) wurde in der Pflugvariante gemessen. In der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung ist der Abfluss mit 720 l/h, sowie in der Direktsaatvariante mit 360 l/h jeweils 09.03.00 bestimmt worden. Auffällig in Abbildung 33 waren die zeitlich wieder sehr eng begrenzten Abflussereignisse mit hohen Abflussraten. Am deutlichsten zeigte sich dies in der Pflugvariante, bei der die Schwankungen wie im Jahr 1998 am stärksten waren.

Auf der Fläche mit konservierender Bodenbearbeitung war die Abflussrate zwar geringer, jedoch wie in der Pflugvariante ebenfalls zeitlich eng begrenzt.

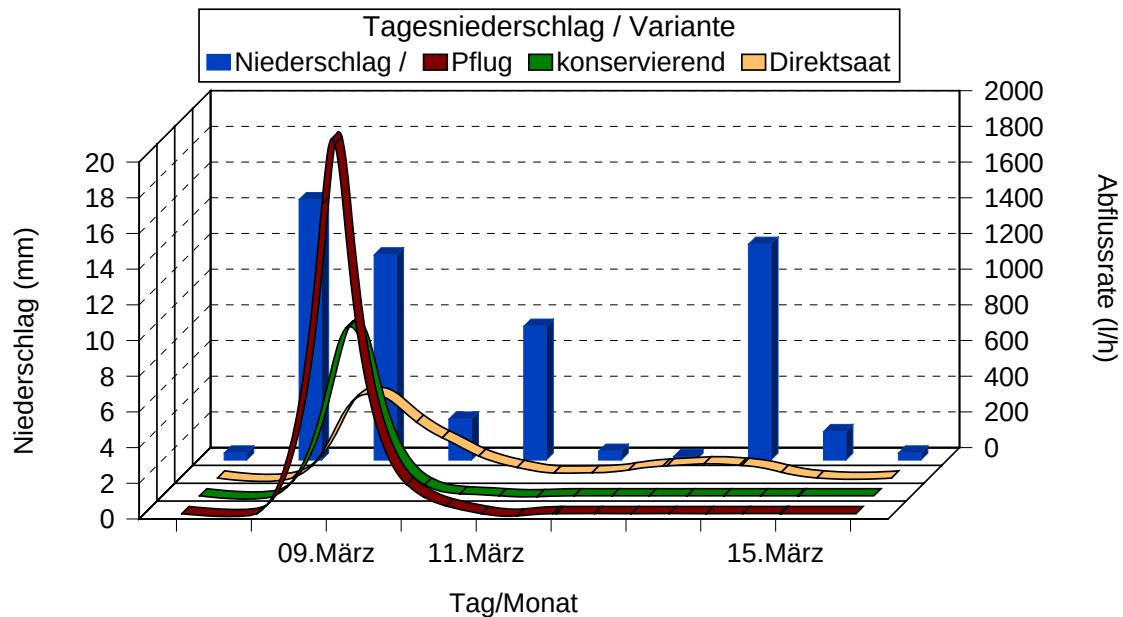


Abb. 33: Tagesniederschläge und Drainageabfluss vom 07.03. bis 16.03.2000 während der Messphase mit Winterweizen 1999/2000 in den Bearbeitungsvarianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

Insgesamt gesehen zeigt das Abflussereignis im Winterweizen zwischen dem 09. bis 15. März die gleiche Charakteristik wie im Versuchsjahr 1998 im Winterraps. In der Pflugvariante waren die Schüttungen der Dränagen meistens von hoher Abflussrate und sehr kurzer Dauer geprägt. In den pfluglosen Bearbeitungsvarianten sind weniger hohe Abflussraten registriert worden, verbunden mit einer deutlich längeren Abflussdauer (vgl. Abb. 33).

Bei der Berechnung der Gesamtabflussmengen ließ sich der umgekehrte Fall im Vergleich zum Versuchsjahr 1998 feststellen. Durch die sehr hohe Abflussrate am ersten Ereignistag hatte die Pflugvariante eine Gesamtabflussmenge von ca. 71 mm. Die Gesamtmenge an Dränagewasser in den beiden pfluglosen Varianten wurde mit 29 mm (Mulchvariante) und 57 mm (Direktsaatvariante) berechnet. Im Zeitraum innerhalb des ersten Abflussereignisses fielen 51 mm Niederschlag. Der gemessene Gesamtabfluss in der Pflugvariante würde, bezogen auf das definierte Einzugsgebiet, ca. 139 % des gefallenen Niederschlages betragen. Das entspräche ca. 112 % des gefallenen Niederschlages in der Direktsaatvariante und 57 % in der Mulchvariante (vgl. Abb. 34). Diese Schüttungsmengen der Dränagen sind als nicht realistisch anzusehen ohne die Annahme eines Zuflusses, der sich periodisch auf den Gesamtabfluss auswirkte.

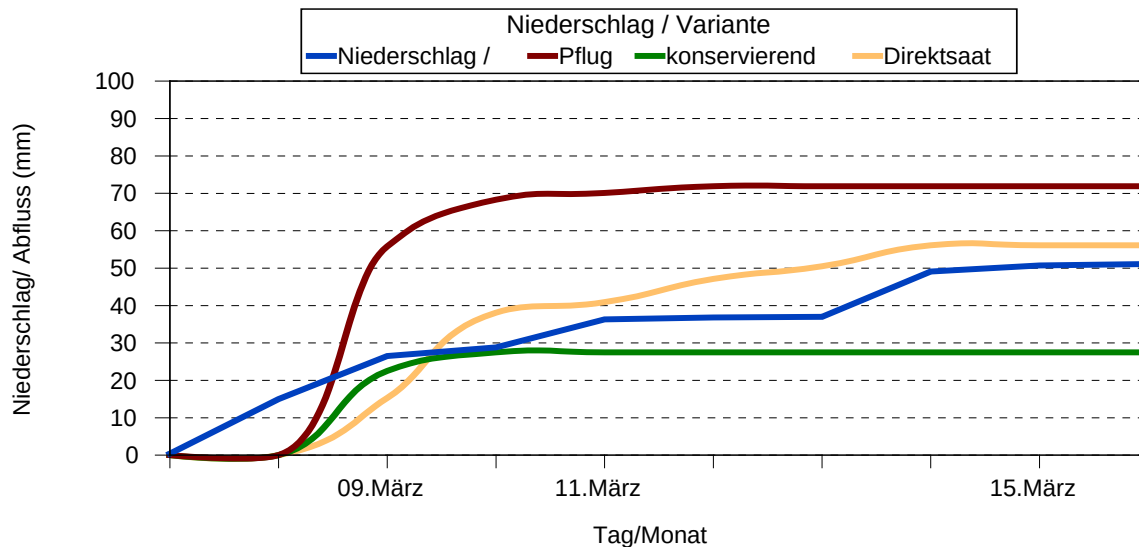


Abb. 34: Kumulierter Niederschlag und Drainageabfluss vom 07.03. bis 16.03.2000 während der Messphase mit Winterweizen 1999/2000 in den Bearbeitungsvarianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

6.3.2.1 Austräge der applizierten Herbizide mit dem Drainageabfluss

Unter Berücksichtigung des gelösten Anteils der Wirkstoffe Chlortoluron und Isoproturon sind die mittleren Herbizidkonzentrationen in der Tabelle 40 während der Messphase Winterweizen 1999/2000 im Drainageabfluss angegeben.

Die analysierten Wirkstoffkonzentrationen an Chlortoluron lagen in der Mulchvariante am höchsten (4,9 - 8,3 µg/l). In der Pflugvariante traten Konzentrationen zwischen 2,1 µg/l und 4,9 µg/l auf (s. Tab. 40). Bei Isoproturon ist in allen Varianten kein Konzentrationsnachweis erbracht worden, da alle Werte unterhalb von 0,1 µg/l lagen. Zieht man den Vergleich zum Zwischenabfluss derselben Messphase, so lassen sich eindeutig Parallelen zu den Konzentrationen der beiden angewandten Wirkstoffe erkennen (vgl. Tab. 36, Kap. 6.2.1.1).

Tab. 40: Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$) an Chlortoluron und Isoproturon im Dränagewasser Zwischen dem 09.03. und 14.03.2000 während der Messphase im Winterweizen in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat. Applikationstermin: 1.10.99; Präparate: DICURAN = 1,5 l/ha, IPU = 3 l/ha

Ereignis- datum	Varianten	Herbizidkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$), n = 2	
		Chlortoluron	Isoproturon
		$\bar{X}$ *	$\bar{X}$
09.03.00	Pflug	5,6	< 0,1
	Mulch	8,3	< 0,1
	Direktsaat	< 0,1	< 0,1
10.03.00	Pflug	2,1	< 0,1
	Mulch	4,9	< 0,1
	Direktsaat	< 0,1	< 0,1
11.03.00	Pflug	< 0,1	< 0,1
	Mulch	k. A.*	< 0,1
	Direktsaat	< 0,1	< 0,1
12.03.00	Pflug	< 0,1	< 0,1
	Mulch	k. A.	< 0,1
	Direktsaat	< 0,1	< 0,1
13.03.00	Pflug	k. A.	< 0,1
	Mulch	k. A.	< 0,1
	Direktsaat	< 0,1	< 0,1
14.03.00	Pflug	k. A.	< 0,1
	Mulch	k. A.	< 0,1
	Direktsaat	< 0,1	< 0,1

* $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; *k. A. = Kein Abfluss

Nach mehr als 140 Tagen Zeitverzug zwischen Herbizidapplikation und Abflussereignis konnte kein nachweisbares Isoproturon gemessen werden. Die Werte für Chlortoluron traten mit leicht höheren Konzentrationen im Dränageabfluss auf. Gleichfalls waren die Konzentrationsunterschiede zwischen Pflug- und der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung etwas größer. Hingegen ist im Vergleich zum Zwischenabfluss in der Direktsaatvariante weder Chlortoluron noch Isoproturon im Dränageabfluss festgestellt worden.

Die berechneten absoluten Austragsmengen der eingesetzten Wirkstoffe nach den in Tabelle 40 dargestellten Konzentrationen konnten aufgrund der geringen Mengen nur für Chlortoluron in den Pflug- und Mulchvarianten bestimmt werden. Dabei handelte es sich insgesamt um sehr geringe Frachten, die mit dem Dränageabfluss transportiert wurden. Die Mengen an Chlortoluron, die mit dem Dränagewasser aus der Pflugvariante ausgetragen wurden, lagen bei 40,7 mg, während sie von der Mulchvariante mit 25,3 mg berechnet wurden. Hinsichtlich der viel höheren Gesamtabflussmengen über die Dränagen lagen die Austragsfrachten für diesen Wirkstoff um ein Vielfaches höher als mit dem Zwischenabfluss. Die Problematik bei der Erfassung von Dränageabflüssen lag in Anlehnung an die Erfassung von Zwischenabflüssen in der schlechten Abgrenzung der Ein-

zugsgebiete zur genaueren Abschätzung der Stofffrachten, was sich in den im Vergleich zum Niederschlag höheren Abflusssummen zeigt. Darauf wird in Kapitel 7 näher eingegangen.

6.3.2.2 Austräge von Stickstoff und Phosphor mit dem Drainageabfluss

Die Konzentrationen von nicht partikulär gebundenen N- und P-Verbindungen im Drainagewasser sind in der Tabelle 41 angegeben.

Tab. 41: Konzentrationen (mg/l) an $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ im Drainagewasser zwischen dem 09.03. und 14.03.2000 während der Messphase im Winterweizen in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

Ereignis- datum	Varianten	Nährstoffkonzentrationen (mg/l), n = 2		
		$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$
		$\bar{X}^*$	$\bar{X}$	$\bar{X}$
09.03.00	Pflug	2,2	0,4	2,5
	Mulch	1,4	0,6	1,2
	Direktsaat	3,3	1,0	0,2
10.03.00	Pflug	2,0	0,7	3,0
	Mulch	1,4	1,5	1,7
	Direktsaat	1,8	0,8	0,1
11.03.00	Pflug	4,1	1,0	1,9
	Mulch	k. A.*	k. A.	k. A.
	Direktsaat	13,1	1,0	0,06
12.03.00	Pflug	2,0	1,0	1,6
	Mulch	k. A.	k. A.	k. A.
	Direktsaat	6,2	1,0	0,06
13.03.00	Pflug	k. A.	k. A.	k. A.
	Mulch	k. A.	k. A.	k. A.
	Direktsaat	1,4	1,0	0,07
14.03.00	Pflug	k. A.	k. A.	k. A.
	Mulch	k. A.	k. A.	k. A.
	Direktsaat	3,9	0,8	0,08

* $\bar{X}$ = Arithmetischer Mittelwert; *k. A. = Kein Abfluss

Die gemessenen Konzentrationen an $\text{NO}_3\text{-N}$ schwankten zwischen 1,4 mg/l und 13,1 mg/l. Sie lagen in der Direktsaatvariante allgemein höher. Ein kontinuierlicher Vergleich zwischen den Varianten fehlt, da in der Mulchvariante schon nach 2 und in der gepflügten Variante nach 4 Tagen kein Drainagenabfluss registriert worden ist. Die mit 0,4 bis 1,0 mg/l ermittelten Konzentrationen an $\text{NH}_4\text{-N}$ zeigen keine auffälligen Differenzen zwischen den Bearbeitungsvarianten. Auffällig hoch waren jedoch die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen in der Pflugvariante (1,6 - 3,0 mg/l) gegenüber den Konzentrationen in den pfluglosen Versuchsflächen (Mulch: 1,2 - 1,7 mg/l, Direktsaat: 0,06 - 0,2 mg/l). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Konzentrationen für $\text{NO}_3\text{-N}$ in der Direkt-

saatvariante höher lagen als in den übrigen Varianten, während in der konventionellen Variante mit Pflugeinsatz die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen höher lagen.

Die berechneten Frachten an $\text{NO}_3\text{-N}$, die mit dem Dränagewasser während der Messphase Winterweizen 1999/2000 zwischen dem 09.03. und 14.03.2000 ausgetragen wurden, sind in Abbildung 35 dargestellt. Sie lagen zwischen 3 g (Mulchvariante) und 24 g (Direktsaatvariante). Für $\text{NH}_4\text{-N}$ sind Frachten von 2 bis ca. 7 g berechnet worden. Aufgrund der höheren Konzentrationen im Dränagewasser der Direktsaatvariante sind hier die höchsten Austräge ermittelt worden, obwohl die Gesamtabflussmenge in der Pflugvariante höher war. In der Bearbeitungsvariante mit Mulchsaat gab es die geringsten Austräge an gelöstem N. Hingegen gab es die höchsten $\text{PO}_4\text{-P}$ -Austräge in der Pflugvariante (22 g) gegenüber knapp 1 g in der Variante mit Direktsaat. Bemerkenswert waren die gegenüber $\text{NO}_3\text{-N}$ höheren Austräge an gelöstem P in der Pflugvariante.

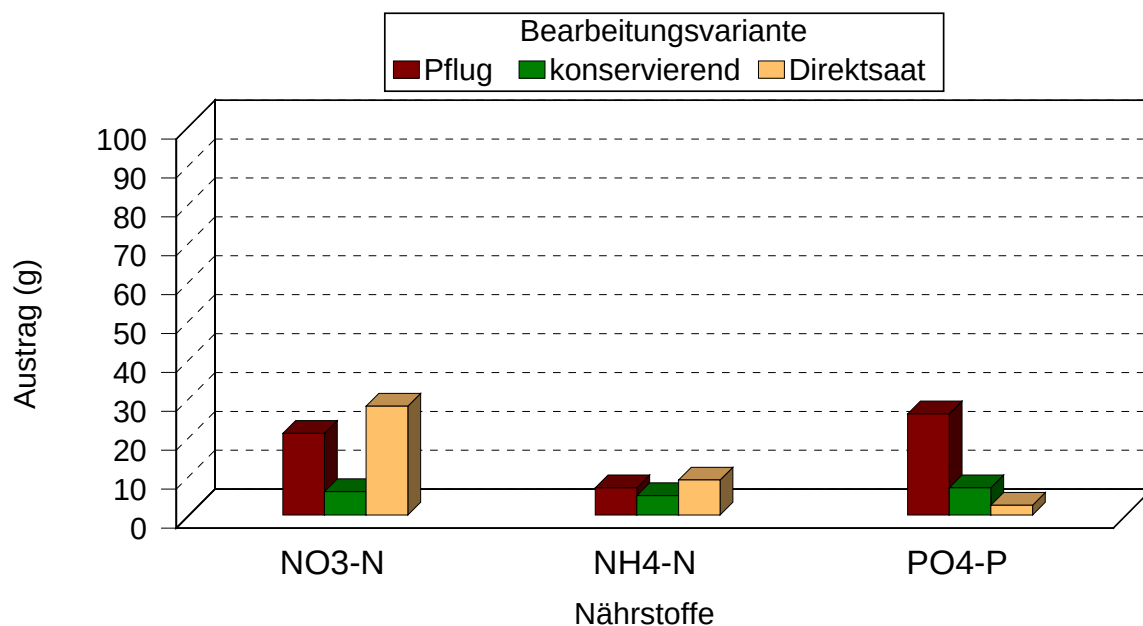


Abb. 35: Nährstoffausträge an gelöstem Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) und Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) im Dränagewasser während der Messphase 1999/2000 im Winterweizen zwischen dem 09.03. und 14.03.2000 in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat

Beim Vergleich der in Kapitel 6.1, 6.2 und 6.3 beschriebenen Eintragspfade für Stoffe in Oberflächengewässer bleibt festzuhalten, dass aufgrund der Problematik von nicht exakt definierten Einzugsgebieten auf der Versuchsfläche die quantitative Erfassung von Zwischenabfluss und Dränageabflüssen nur bedingt erfolgen konnte.

Die Minderungswirkung pflugloser Bestelltechniken hinsichtlich des Austrages von Herbiziden und Nährstoffen von ackerbaulich genutzten Flächen ist für den Pfad des Oberflächenabflusses bei allen 3 Versuchskulturen festgestellt worden (vgl. Kap. 6.1). Im Hinblick auf die Pfade Zwischenabfluss und Dränageabfluss konnten keine eindeutigen Ergebnisse erzielt werden, die auf vermehrte Abflüsse und Stofftransporte über diese Eintragspfade hindeuten (s. Kap. 6.2 und 6.3). Aufgrund des größtenteils fehlenden partikulären Austrages von Stoffen im Zwischen- und Dränageabfluss sind die berechneten absoluten Frachten nur schwer mit dem Pfad des Oberflächenabflusses zu vergleichen. Eine Tendenz oder gar sichere Erkenntnis für einen verstärkten Zwischenabfluss sowie Dränageabfluss, verbunden mit beträchtlichen Herbizid- und Nährstoffausträgen bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat, ist nicht beobachtet worden. Abgesehen von den Schwierigkeiten bei der Erfassung dieser Eintragspfade gab es sowohl Messphasen mit erhöhtem Zwischen- und Dränageabfluss in den pfluglosen Varianten als auch Messphasen mit deutlich geringeren Abflüssen sowie Stoffausträgen über diese Pfade (vgl. Kap. 6.2 und 6.3).

6.4 Ergebnisse zum Bodenbedeckungsgrad in den Bearbeitungsvarianten der untersuchten Anbaukulturen im Hinblick auf den Oberflächenabfluss und Bodenabtrag

Zur Ermittlung aktueller Bodenbedeckungsgrade ist die in Kapitel 5.2.5.1 beschriebene Zählmethode (FRIELINGHAUS et al. 1998) angewandt worden, um zu beobachten, bei welchen Bedeckungsgraden die Anwendung pflugloser Bestelltechniken wie Mulchsaat oder Direktsaat einen wirksameren Schutz vor Oberflächenabfluss, Boden- und Stoffabtrag gegenüber der konventionellen Anbauweise mit dem Pflug bieten kann.

Die Zählmethode ist während der Messphasen der Versuchsjahre 1999 - 2002 im Mais, sowie von 1999 - 2001 im Winterraps und von 1999 - 2001 im Winterweizen durchgeführt worden. Die aktuelle Bodenbedeckung ergab sich aus den bei den Bodenbearbeitungsvarianten verbleibenden Strohresten und der im Wachstumsverlauf des Mais, Rapses und Weizens erfolgten Bedeckung der Bodenoberfläche durch die Blattmasse der genannten Kulturen. Hinzu kam die Bodenbedeckung durch die Blattmasse auskeimender Kräuter und Gräser. Eine mögliche Bedeckung durch Steine an der Bodenoberfläche ist ebenfalls berücksichtigt worden.

6.4.1 Versuchsjahre im Mais 1999 - 2001

Die nachfolgenden Abbildungen 33 und 34 zeigen die aktuelle Bodenbedeckung in den Versuchsjahren 1999 und 2001. In diesen Jahren trat während der Messphasen messbarer Oberflächenabfluss auf. Der erste Zähltermin zur Ermittlung der Bodenbedeckung wurde jeweils am 1. Tag nach Herbizidapplikation durchgeführt, der letzte Termin ca. 10 Tage vor Beendigung der Messphase. Bei Niederschlagsereignissen mit Oberflächenabfluss ist im Anschluss an das Ereignis eine weitere Zählung zur Bestimmung des aktuellen Bodenbedeckungsgrades durchgeführt worden. Für den Verlauf der Bodenbedeckung in den Versuchsjahren 2000 und 2002 ohne Abflussereignis sind im Anhang die Abbildungen 19 - 20 angegeben.

Zu Beginn der Herbizidapplikation (ca. 10 Tage nach Aussaat) auf der Maisfläche im Versuchsjahr 1999 wurde die aktuelle Bodenbedeckung in den Versuchsplots der Pflugvariante erwartungsgemäß zwischen 0 - 1 % ermittelt. In den Versuchsplots der Varianten mit pflugloser Bestelltechnik betrug die aktuelle Bodenbedeckung 30 % auf der Mulchvariante sowie ca. 80 % auf der Variante mit Direktsaat (vgl. Abb. 33). Der Verlauf der Kurve in Abbildung 36 zeigt eine leichte Zunahme der aktuellen Bodenbedeckung (10 - 15 %) in der Pflugvariante bis ca. 40 Tage nach Aussaat. Danach erfolgte ein steiler Anstieg des Bodenbedeckungsgrades auf 70 - 75 % in der Hauptwachstumsphase des Mais bis Mitte Juli 1999. Der Bodenbedeckungsgrad auf den pfluglosen Varianten

war, mit jeweils leichter Zunahme der Bodenbedeckung um ca. 10 %, bis 40 Tage nach der Saat annähernd gleich. Während in der Direktsaatvariante bis zum Ende der Messphase eine weitere Zunahme des Bedeckungsgrades von 10 % auf nahe 100 % zu sehen war, erfolgte in der Mulchvariante ein ähnlicher Anstieg der Bodenbedeckung wie in der Pflugvariante ab Ende Juni, nämlich von ca. 30 - 40 % auf 80 - 90 % gegen Ende der Messphase.

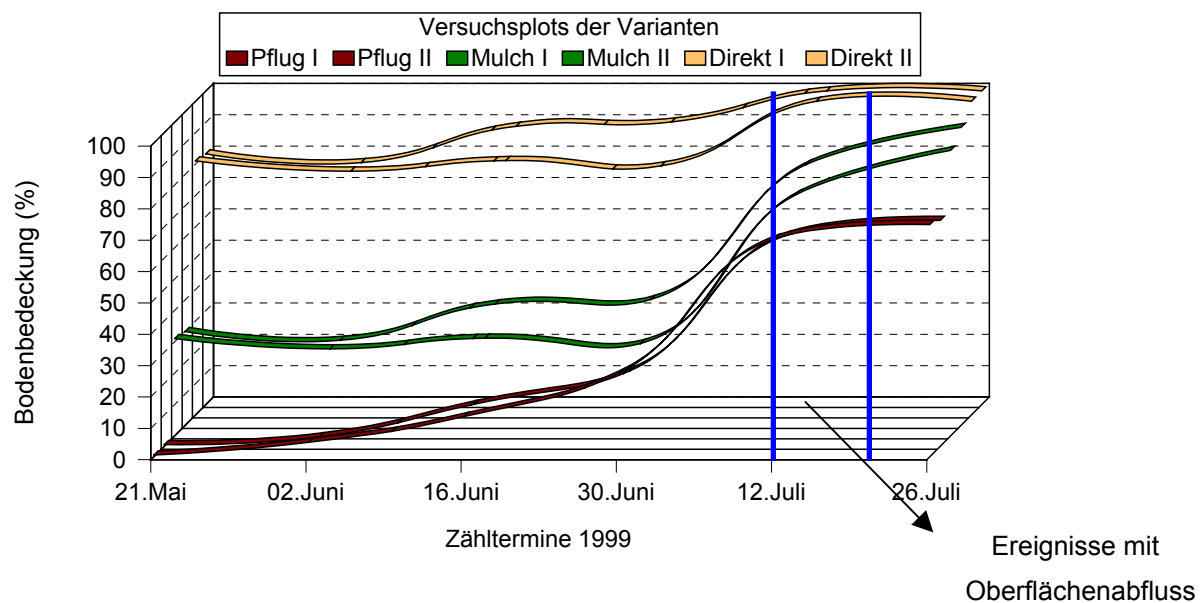


Abb. 36: Entwicklung der Bodenbedeckung in den Versuchplots der Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während des Versuchsjahres 1999 im Mais (Aussaat: 10.05., Herbizidapplikation: 21.05.)

Die blauen Senkrechten in der Abbildung 36 markieren die Ereignisse mit Oberflächenabfluss. Es ist bemerkenswert, dass die beiden Abflussereignisse erst kurz vor Ende der Messphase eintraten, obwohl in der von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag (s. Tab. 41) betroffenen Pflugvariante eine aktuelle Bodenbedeckung von ca. 70 % ermittelt wurde.

Im Versuchsjahr 2001 mit den beiden Oberflächenabflussereignissen vom 30.06. zeigte sich zu Beginn der Messphase in den Versuchplots der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung und der gepflügten Variante ein ähnlicher Verlauf in der aktuellen Bodenbedeckung (s. Abb. 37). Bis ca. 40 Tage nach Saattermin des Mais erfolgte ein leichter Anstieg der Bodenbedeckung in der Pflugvariante von 0 - 7 % sowie in der Mulchvariante von 25 - 45 %. Danach erfolgte in der Variante mit Pflugeinsatz innerhalb von 14 Tagen eine Zunahme der Bodenbedeckung von knapp 7 % auf 25 - 35 %. Im gleichen Zeitraum wurde in der Mulchvariante eine Zunahme des Bedeckungsgrades von ca. 40 % auf 70 % (Mulch I) und bis über 90 % (Mulch II) ermittelt (vgl. Abb. 37). Im Versuchspot II der Direktsaatvariante erbrachte eine mächtige Strohmulchdecke eine Bo-

denbedeckung von nahe 100 %, während in Plot I ca. 80 % Bodenbedeckung erreicht wurde. Ein im Vergleich zur Mulch- und Pflugvariante geringer Saataufgang bei gleichzeitigem Abbau des Strohmulches verhinderte eine weitere Zunahme der Bodenbedeckung bis zum Ende der Messphase wie es im Versuchsjahr 1999 der Fall war. Im Gegenteil, die Bodenbedeckung nahm in der Direktsaatvariante leicht ab und blieb gegen Ende der Messphase bei 80 %.

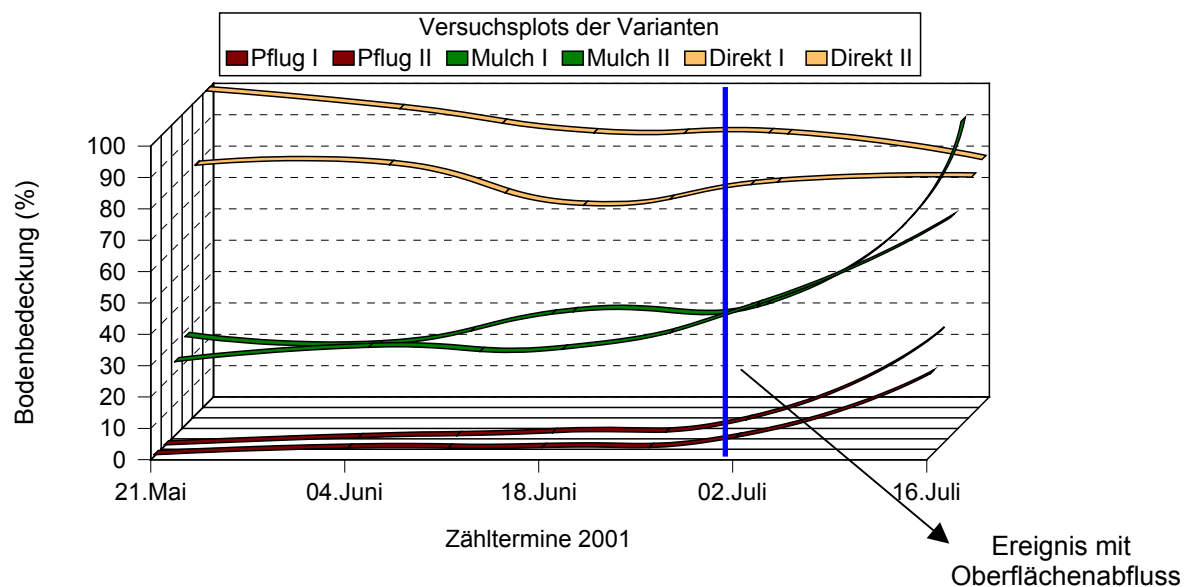


Abb. 37: Entwicklung der Bodenbedeckung in den Versuchplots der Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während des Versuchsjahres 2001 im Mais, mit Angabe von Oberflächenabflussereignissen (Aussaat: 11.05., Herbizidapplikation: 20.05.)

Das markierte Abflussereignis in Abbildung 37 trat ca. 6 Wochen nach Herbizidapplikation auf. In diesem Wachstumsstadium des Mais trat Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in der Variante mit Pflugeinsatz und der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung auf. Der Vergleich zwischen der Bodenbedeckung in den einzelnen Varianten und Oberflächenabfluss mit nachfolgendem Bodenabtrag wird in der Tabelle 42 dargestellt.

Tab. 42: Bodenbedeckung sowie absoluter und relativer Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in den Versuchsplots der Varianten konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat im Vergleich zur Pflugvariante während der Messphasen mit Mais in den Versuchsjahren 1999 und 2001

Ereignis- datum	Plots	Boden- Bedeckung Mittelwert	Oberflächenabfluss, absolut (mm) und relativ (%) zum Niederschlag und der Pflugvariante (= 100 %)			Bodenabtrag, absolut (kg) und relativ (%) zur Pflugvariante (= 100 %)	
		(%)	absolut	rel. (Ni.)*	rel. (P)*	absolut	relativ
12.07.99	Pflug I+II	68	0,15	1,3		0,27	
	Mulch I+II	80	k. A.*	0,0	0,0	0,00	0,0
	Direkt I+II	100	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
19.07.99	Pflug I+II	73	0,13	2,2		0,31	
	Mulch I+II	93	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
	Direkt I+II	100	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
20.07.99	Pflug I+II	73	0,06	1,2		0,08	
	Mulch I+II	93	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
	Direkt I+II	100	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
30.06.01 I	Pflug I+II	7	2,81	15,1	20,3	2097,4	
	Mulch I+II	40	0,57	3,9	26,0	302,9	14,4
	Direkt I+II	80	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0

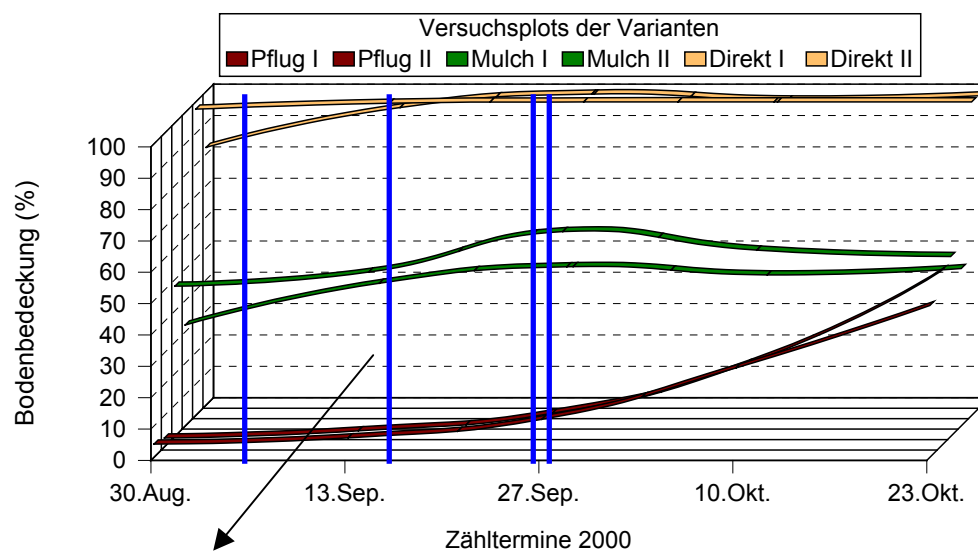
*k. A. = Kein Abfluss; *rel. Ni. = Abfluss relativ zum Niederschlag; *rel. (P) = Abfluss relativ zur Pflugvariante

Im Versuchszeitraum des Jahres 1999 trat weder in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung noch in der Variante mit Direkteinsaat registrierter Oberflächenabfluss auf. In den pfluglosen Varianten ist eine Bodenbedeckung von über 80 % ca. 60 Tagen nach Aussaat des Mais ermittelt worden. In der Pflugvariante mit ca. 70 % Bodenbedeckung trat geringer Oberflächenabfluss auf, der aber mit weit weniger als 1 % des Niederschlages berechnet wurde (s. Tab. 42).

Im Versuchsjahr 2001, mit 2 aufeinander folgenden Niederschlagsereignissen binnen weniger Stunden (vgl. Tab. 11, Kap. 6.1.1), sind in der Pflugvariante beim ersten Ereignis 9 % und während des zweiten Ereignisses ca. 6 % des Niederschlages oberflächlich abgefließen. Gegenüber den Varianten ohne Pflugeinsatz war die Bodenbedeckung mit 7 % um mehr als 30 % bzw. 50 % geringer (s. Tab. 42). Während in der Direktsaatvariante kein Oberflächenabfluss registriert worden ist, trat in der Mulchvariante bei ca. 40 % Bodenbedeckung auch Oberflächenabfluss mit Bodenabtrag auf. In Relation zur Pflugvariante war das allerdings nur 7 % des gemessenen Abflusses bzw. 2 % des abgetragenen Bodens. Anders die Situation beim darauffolgenden zweiten Ereignis am 30.06.2001, hier betrug der Oberflächenabfluss in der Mulchvariante immerhin noch 57 % des in der Pflugvariante gemessenen Abflusses. Etwas niedriger wurde der relative Bodenabtrag (44,5 %) in der Mulchvariante gegenüber der Variante mit Pflugeinsatz berechnet. Trotz gleicher Bodenbedeckung beider Varianten während der Abflussereignisse trat in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung Oberflächenabfluss auf, der jedoch um die Hälfte geringer war als auf der gepflügten Variante.

6.4.2 Versuchsjahre im Winterraps 1999 - 2002

Die aktuelle Bodenbedeckung während der Messphase des Versuchsjahres 2000 im Winterraps zeigt die Abbildung 38. In diesem Jahr trat während des Messzeitraumes Oberflächenabfluss auf. Die Ergebnisse der aktuellen Bodenbedeckung aus den Versuchsjahren 1999 und 2001 ohne Abflussereignis sind in den Abbildungen 21 und 22 im Anhang dargestellt. Die zur Berechnung der Bodenbedeckung gehörenden Zähltermine richteten sich nach Aussaat des Winterrapses sowie nach Applikation der Herbizide in der nach Winterraps folgenden Messphase mit Winterweizen zwischen Mitte bis Ende Oktober. Daher können bei später Rapsaussaat und früher Weizen Aussaat nur 4 statt 5 Zähltermine zustande kommen.



Ereignisse mit Oberflächenabfluss

Abb. 38: Entwicklung der Bodenbedeckung in den Versuchsplots der Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während des Versuchsjahres 2000 im Winterraps, mit Angabe von Oberflächenabflussereignissen (Aussaat: 24.08., Herbizidapplikation: 29.08.)

Zu Beginn der Messphase im Winterraps 2000 ist in den Versuchsplots der Pflugvariante eine Bodenbedeckung von 0 - 5 %, in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung von 30 - 50 % ermittelt worden. In den Versuchsplots der Direktsaatvariante lag der Bedeckungsgrad zwischen 80 und 100 %, was auf die mächtige Strohauflage zurückzuführen war. Bis ca. 34 Tage nach Aussaat (26. Sep.) zeigte sich nur eine leichte Erhöhung der Bodenbedeckung in der Pflugvariante auf ca. 10 %. In der Mulchvariante wurde im gleichen Zeitraum ein Bedeckungsgrad auf etwa 50 - 65 % erreicht (s. Abb. 38), während in den Plots der Direktsaatvariante eine Bodenbedeckung von nahe 100 % berechnet wurde. Ab dem 26. September ist ein interessanter Verlauf der Kurven in Abbildung 38 zu sehen. Innerhalb von weiteren 27 Tagen bis zum Ende der Messphase erreichte

die Bedeckung des Bodens in der Pflugvariante zwischen 50 - 60 %. Hingegen blieb in der Mulchvariante die Bodenbedeckung bei ca. 50 - 60 % konstant, so dass am Ende der Messphase in der konventionellen Bearbeitungsvariante eine annähernd gleiche Bodenbedeckung wie in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung herrschte. Bei knapp 100 % Bedeckungsgrad blieb die Variante mit Direktsaat konstant.

Die 4 markierten Oberflächenabflussereignisse (vgl. Abb. 38) traten alle vor der stärkeren Wachstumsphase des Rapses in der gepflügten Variante ein, wo ein Bedeckungsgrad von nicht mal 10 % vorherrschte. Zur gleichen Zeit lag die Bodenbedeckung in der Mulchvariante bei über 40 %. In der Folge trat Oberflächenabfluss mit nachfolgendem Bodenabtrag nur in der Pflugvariante auf (s. Tab. 22, Kap. 6.1.2). Durch die Konstellation der Niederschlagsereignisse und Bodenbedeckungsgrade in den Versuchsplots (s. Abb. 38) wurde in den pfluglosen Varianten eine Minderung in Bezug auf Oberflächenabfluss und Bodenabtrag von 100 % erreicht.

6.4.3 Versuchsjahre im Winterweizen 1999 - 2002

In der nachfolgenden Abbildung 39 wird die aktuelle Bodenbedeckung während der Messphase Winterweizen im Versuchsjahr 1999/2000, in dem es zu Niederschlägen mit Oberflächenabfluss kam, dargestellt. In den darauf folgenden Versuchsjahren 2000/2001 und 2001/2002 traten keine registrierten Abflussereignisse im Winterweizen auf. In den Abbildungen 23 und 24 im Anhang sind die entsprechenden Bodenbedeckungsgrade dargestellt. Aufgrund der fehlenden Abflussereignisse wird hier nicht näher darauf eingegangen.

Die Bestimmungen des Bodenbedeckungsgrades sind bis 60 Tage nach Herbizidapplikation durchgeführt worden. Von Mitte Dezember an wurde die Zählung bis zum 01.03. (s. Abb. 39) des folgenden Jahres unterbrochen, da eine Schnee- und Eisbedeckung keine eindeutige Zählung mehr zuließ. Bei Niederschlagsereignissen mit Oberflächenabfluss wurde aber die aktuelle Bodenbedeckung zusätzlich bestimmt.

In Abbildung 39 ist zu erkennen, dass mit Beginn der Messphase (14.10.99) im Winterweizen in den Versuchsplots der Pflugvariante eine Bodenbedeckung von 21 - 23 % vorlag. Zwischen 30 und 33 % Bodenbedeckungsgrad wurden in den Versuchsplots mit konservierender Bodenbearbeitung ermittelt. In den Plots der Direktsaatvariante ergaben die gezählten Werte eine Bedeckung bis knapp über 70 %. Es erfolgte ein Rückgang in der Bodenbedeckung, vor allem in Plot I, auf ca. 60 % Ende November mit einer darauf folgenden Erhöhung bis Anfang Dezember. Zwischen Dezember und März sank der Bedeckungsgrad ein weiteres Mal um ca. 10 % ab, um

zember und März sank der Bedeckungsgrad ein weiteres Mal um ca. 10 % ab, um dann von Anfang bis Ende März auf nahe 100 % anzusteigen (vgl. Abb. 36).

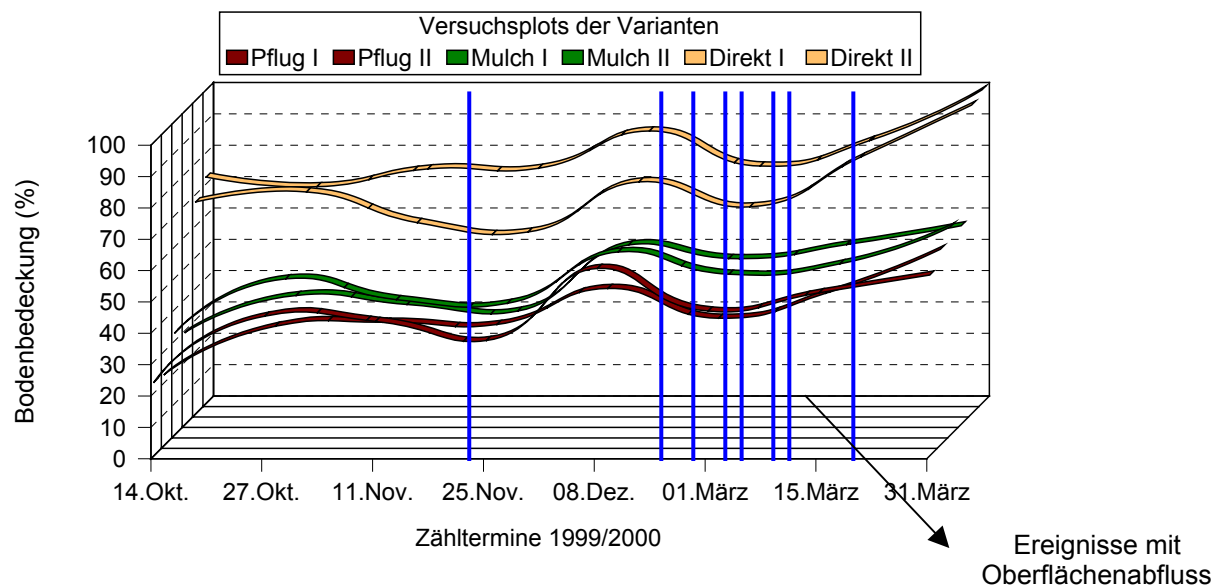


Abb. 39: Entwicklung der Bodenbedeckung in den Versuchsplots der Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat während des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen, mit Angabe von Oberflächenabflussereignissen (Aussaat: 13.09., Herbizidapplikation: 13.10.)

Die Bodenbedeckung in der Mulchvariante war während der gesamten Messphase nur unwesentlich höher als in der Pflugvariante. Der Bedeckungsgrad erhöhte sich von Beginn der Messphase bis Ende Oktober von etwa 20 % auf 40 - 45 % in der Pflugvariante und von ca. 30 % auf 40 - 50 % in der Mulchvariante. Innerhalb von 30 Tagen erfolgte ein Rückgang der Bodenbedeckung von ca. 10 % in beiden Varianten, auf den bis Mitte Dezember ein weiterer Anstieg folgte, so dass in der konventionellen Variante sowie in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung eine Bodenbedeckung zwischen 50 und 60 % ermittelt wurde (s. Abb. 39). Es ist anzunehmen, dass dieser Rückgang auf die Wirkung des angewandten Getreideherbizides zurück zu führen war, welches in diesem Zeitfenster die größte Wirkung entfaltete. Dadurch wurden unerwünschte Kräuter und Gräser dezimiert und deren Blattmasse während der Bestimmung des Bedeckungsgrades nicht miterfasst.

Während der Wintermonate Dezember, Januar und Februar wurde wieder ein Rückgang im Bodenbedeckungsgrad um ca. 10 - 15 % festgestellt. Dieser Rückgang ist ebenfalls in der Direktsaatvariante zu sehen. Mit fortschreitendem Pflanzenwachstum im März erfolgte eine kontinuierliche Erhöhung der Bodenbedeckung bis Ende der Messphase. In der Pflug- und Mulchvariante konnte ein Bedeckungsgrad zwischen 55 - 65 % erreicht werden.

Von den 8 markierten Abflussereignissen in Abbildung 39 traten 6 in der Zeit zwischen Ende Februar und Mitte März auf. Es war der Zeitraum mit deutlich erkennbarer Erniedrigung der Bodenbedeckung vor allem in der Pflugvariante (s. Abb. 39). In der Tabelle 43 wird der Vergleich zwischen der Bodenbedeckung in den einzelnen Varianten und Oberflächenabfluss mit nachfolgendem Bodenabtrag dargestellt.

Tab. 43: Bodenbedeckung sowie absoluter und relativer Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in den Versuchsplots der Varianten konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat im Vergleich zur Pflugvariante während der Messphase mit Winterweizen im Versuchsjahr 1999/2000

Ereignis- datum	Plots	Boden- Bedeckung Mittelwert	Oberflächenabfluss, absolut (mm) und relativ (%) zum Niederschlag und der Pflugvariante (= 100 %)			Bodenabtrag, absolut (kg) und relativ (%) zur Pflugvariante (= 100 %)	
		(%)	absolut	rel. (Ni.)*	rel. (P)*	Absolut	relativ
22.11.99	Pflug I+II	38	0,05	0,54		0,00	
	Mulch I+II	39	k. A.*	0,0	0,0	0,00	
	Direkt I+II	67	k. A.	0,0	0,0	0,00	
29.01.00	Pflug I+II	48	0,03	0,45		0,00	
	Mulch I+II	55	0,03	0,45	100	0,00	
	Direkt I+II	75	k. A.	0,0	0,0	0,00	
24.02.00	Pflug I+II	45	0,09	0,47		2,0	
	Mulch I+II	52	0,06	0,36	67	0,00	0,0
	Direkt I+II	72	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
01.03.00	Pflug I+II	42	0,09	0,72		3,0	
	Mulch I+II	51	0,03	0,24	33	0,00	0,0
	Direkt I+II	70	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
03.03.00	Pflug I+II	43	0,07	0,68		4,2	
	Mulch I+II	51	0,03	0,39	43	0,00	0,0
	Direkt I+II	71	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
08.03.00	Pflug I+II	44	0,12	0,48		2,3	
	Mulch I+II	52	0,09	0,36	75	0,70	30
	Direkt I+II	75	k. A.	0,0	0,0	0,00	0,0
10.03.00	Pflug I+II	47	0,03	0,45		0,00	
	Mulch I+II	53	0,03	0,45	100	0,00	
	Direkt I+II	78	k. A.	0,0	0,0	0,00	
17.03.00	Pflug I+II	51	0,06	0,54		0,00	
	Mulch I+II	58	0,02	0,18	33	0,00	
	Direkt I+II	86	k. A.	0,0	0,0	0,00	

*k. A. = Kein Abfluss; *rel. Ni. = Abfluss relativ zum Niederschlag; *rel. (P) = Abfluss relativ zur Pflugvariante

Während der gesamten Messphase des Versuchsjahres mit Winterweizen lag die aktuelle Bodenbedeckung in der Direktsaatvariante bei knapp 70 % und höher. Dort ist kein Oberflächenabfluss aufgetreten. In der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung trat bei 7 der 8 registrierten Ereignisse ebenfalls Oberflächenabfluss auf. Die Differenzen im Bedeckungsgrad zwischen Pflug- und Mulchvariante waren mit 1 - 9 % sehr gering. Daher gab es bei den Ereignissen vom 29.01.00 und 10.03.00 keine Minderungswirkung für Oberflächenabfluss auf der Mulchvariante (vgl. Tab.

42). Bei allen anderen Abflussereignissen ist auf der Mulchvariante eine Reduzierung des Oberflächenabflusses von 25 % bis 67 % erreicht worden. Nur am 08.03.00 ist in den Versuchsplots der Mulchvariante ein geringer Sedimentanteil im Oberflächenabfluss bestimmt worden (s. Tab. 42). Die Gesamtmenge des dabei verlagerten Bodens betrug jedoch nur ein Drittel der Sedimentmenge in der Pflugvariante.

Insgesamt betrachtet sind die Abflussereignisse relativ spät nach der Aussaat (70 - 175 Tage) aufgetreten, so dass bei fortschreitendem Pflanzenwachstum ein erhöhter Bedeckungsgrad des Bodens von mindestens 38 % (Pflugvariante) vorgefunden wurde, der einen ausreichenden Schutz vor größeren Abflussereignissen bot.

In Kapitel 6.1.3 ist bereits erwähnt worden, dass die Minderungswirkung bei konservierender Bodenbearbeitung gegenüber der konventionellen mit Pflug während der Messphase mit Winterweizen eher geringer war als in den Messphasen mit Mais und Winterraps. Bei der Auswertung der Bodenbedeckung in Kapitel 6.4.3 konnten nur minimale Unterschiede (s. Tab. 42) zwischen der Pflug- und Mulchvariante berechnet werden. Trotz der nur 1 - 9 % erhöhten Bodenbedeckung in der Mulchvariante konnte bei einigen Abflussereignissen der Oberflächenabfluss mehr als 50 % gegenüber der Variante mit Pflugeinsatz gemindert werden.

Aus den erhobenen Werten der Bodenbedeckung in Verbindung mit den registrierten Abflüssen für alle Versuchsjahre und Anbaukulturen ließen sich Trends ermitteln, für welche Zeiträume nach Aussaat der Kulturen Mais, Winterraps und Winterweizen die größten Gefahren für Oberflächenabfluss und Bodenabtrag ausgingen. In der Tabelle 44 wurde der Versuch unternommen, die kritischen Zeitpunkte der Erosions- und Abschwemmungsgefährdung zwischen Aussaat und einer Bodenbedeckung von mindestens 30 % in den jeweiligen Kulturen zu definieren. Daraus ließ sich für jede untersuchte Anbaukultur der jeweils kritische Zeitpunkt in Tagen nach der Aussaat bestimmen.

Tab. 44: Tage nach Aussaat von Mais, Winterraps und Winterweizen mit hoher Erosionsgefahr (Bodenbedeckung $\leq 30\%$) auf der Versuchsfläche

Kultur	Varianten	Tage (Mittelwerte, n = 3) nach Aussaat mit hoher Gefährdung durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag
Mais	Pflug	56
	Konservierend (Mulchsaat)	29
	Direktsaat	0
Winterraps	Pflug	46
	Konservierend (Mulchsaat)	15
	Direktsaat	0
Winterweizen	Pflug	57
	Konservierend (Mulchsaat)	29
	Direktsaat	0

Für die am Versuchsstandort verwendeten Anbaukulturen Mais und Winterweizen ist bei Anwendung der konventionellen Bestelltechnik mit einer hohen Gefahr durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag bis ca. 56 bzw. 57 Tage nach der Aussaat zu rechnen. Bei Winterraps reduzieren sich die Tage mit hoher Erosionsgefährdung in der Pflugvariante auf 46 (s. Tab. 44). Bei konservierender Bodenbearbeitung im Mais und Winterweizen halbieren sich die kritischen Tage für Oberflächenabfluss auf 29. Im Winterraps sind es nur ca. 2 Wochen nach Saattermin, in denen bei Mulchsaat mit erhöhter Gefahr von niederschlagsbedingtem Oberflächenabfluss zu rechnen ist. Für die Bestelltechnik mit Direkteinsaat gibt es von Beginn der Aussaat an kein kritisches Zeitfenster mit höherer Erosionsgefahr.

Unter Berücksichtigung der verwendeten Anbaukulturen ist auf dem Versuchsstandort von Mai bis November ein erhöhtes Risiko von Oberflächenabfluss, Bodenabtrag und Stoffverlagerung gegeben. In den Monaten Dezember bis April besteht dagegen in allen Varianten eine potenziell geringe Neigung zu Oberflächenabflüssen.

6.5 Ergebnisse zum Abbau der applizierten Herbizide

Im Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse zum Herbizidabbau im Feldversuch sei vorausgeschickt, dass es sich nicht um Ergebnisse über Abbau- und Verlagerungsprozesse im Boden handelt. Die vielfältigen Einflussfaktoren des Herbizidabbaues unter Freilandbedingungen wie Wasser- und Stofftransporte im Boden sowie Sorptionsmechanismen jedes einzelnen Wirkstoffes sind nicht vollständig erfasst bzw. kontrolliert worden (GEISELHART 1994, DÜRING 1996). Vielmehr ist der Versuch unternommen worden, die Rückstandsgehalte der sich überwiegend in der oberen Bodenkreme (0 - 5 cm) befindenden Herbizide (HAIDER 1997, DÜRING u. HUMMEL 1994, DÜRING 1996, ZANDER et al. 1996) während der Messphasen der jeweiligen Versuchsjahre im Mais, Winterraps und Winterweizen nach der in Kapitel 5.2.2, 5.2.5 und 5.3.3 angewandten Methodik zu bestimmen. Die Ergebnisse der gewonnenen Daten sollen aufzeigen, ob verringerte Eingriffsintensitäten in den Boden durch pfluglose Bestelltechnik sich tendenziell in unterschiedlichen Herbizidgehalten in der Bodenkreme niederschlagen.

6.5.1 Rückstandskonzentrationen im humosen Oberboden

Die Verweildauer (Persistenz) eines Stoffes oder seiner Umwandlungsprodukte im Boden wird in der Literatur mit den sogenannten DT_{50} und DT_{90} -Werten angegeben. Diese Werte geben die Zeitspanne an, in der die Hälfte ($DT_{50} = 50\%$) bzw. 90 % des jeweiligen Ausgangsstoffes analytisch nicht mehr nachzuweisen ist (HUBER 1998).

Aufgrund der Beschränkung der Untersuchungen während des Freilandversuches auf die Rückstandsgehalte von Herbiziden in der oberen Bodenkreme bis 5 cm Tiefe wurden keine Angaben zu den DT_{50} und DT_{90} -Werten gemacht. Die Bestimmung der Herbizidgehalte zielte auf den Vergleich zwischen den Bearbeitungsvarianten ab, um eventuelle Tendenzen eines verstärkten oder gehemmten Wirkstoffabbaues zu erkennen.

Im folgenden werden alle Ergebnisse in den Grafiken anhand von Mittelwerten dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten sind im Anhang in den Tabellen 24 - 27 angegeben.

6.5.1.1 Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin

Zu Beginn der Messphasen im Mais sind die eingesetzten Herbizide mit den Aufwandmengen 1450 g/ha Metolachlor, 990 g/ha Pendimethalin und 750 g/ha Terbutylazin für jedes Versuchsjahr appliziert worden. In der Abbildung 40 sind die Rückstandsgehalte in der oberen Bodenkrume (0 - 5 cm) der 3 untersuchten Varianten dargestellt. Der Probennahmezeitraum erstreckte sich zwischen einem und 56 Tagen nach der Herbizidapplikation.

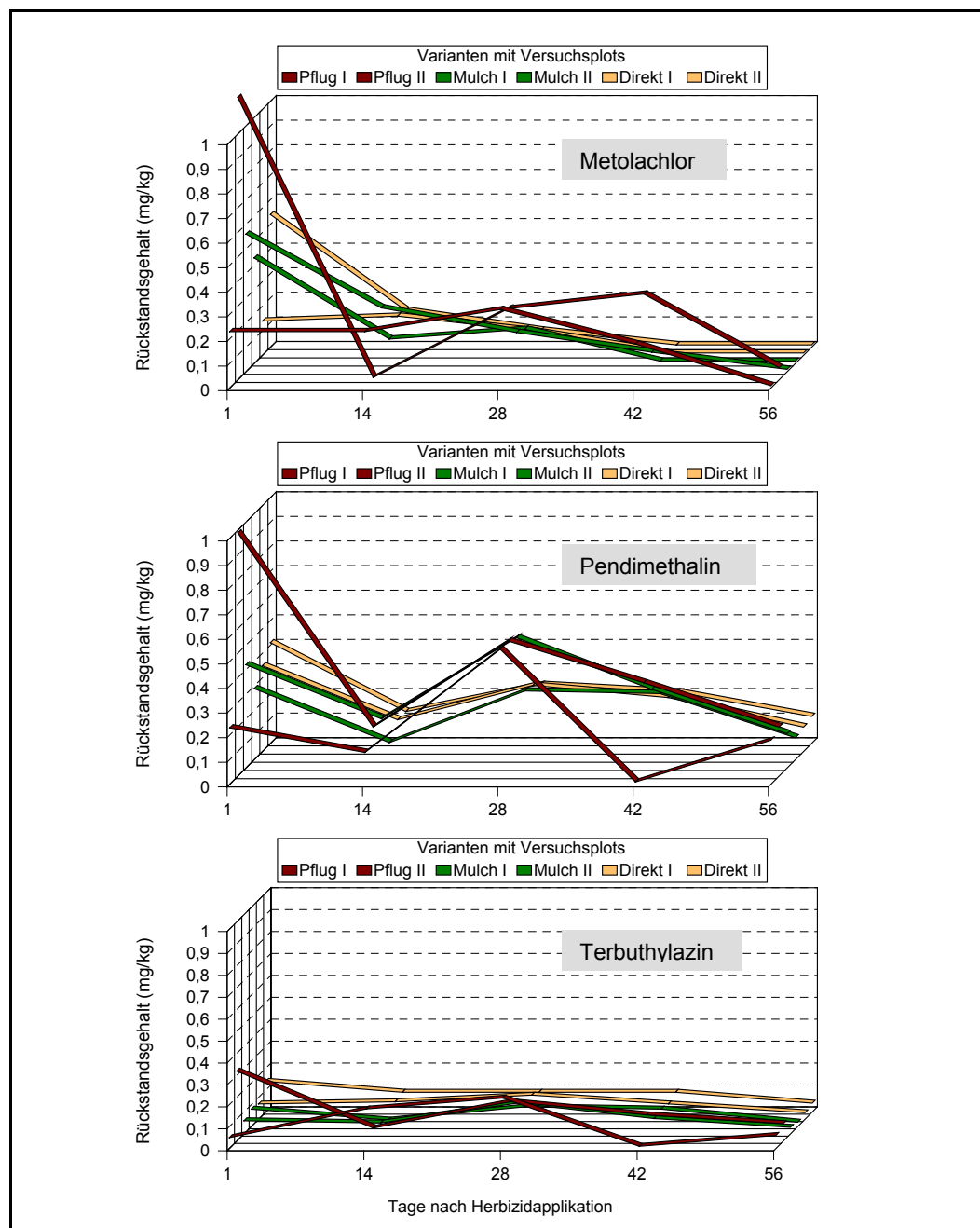


Abb. 40: Vorkommen von Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin in 0 - 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphase mit Mais im Versuchsjahr 1998

Bei der Darstellung in Abbildung 40 geht es nicht um die absoluten Werte der Herbizidkonzentrationen im Oberboden. Vielmehr geht es um den Mengenvergleich zwischen den Varianten bis zum Ende der Messphase 56 Tage nach Applikation.

Die Rückstandsgehalte an Metolachlor in Abbildung 40 liegen zwischen 0,2 - 1,2 mg/kg Boden, wobei im Versuchsplot Pflug II mit 1,2 mg/kg die höchsten Gehalte analysiert wurden. Nach 56 Tagen sanken die Konzentrationen in der Pflugvariante auf 0 - 0,1 mg/kg ab, während sie in den Varianten mit pflugloser Bestelltechnik schon nach ca. 40 Tagen gegen Null sanken (s. Abb. 37). Zwischen 0,2 - 0,4 mg/kg für Pendimethalin lagen die Konzentrationen zu Beginn der Messphase und zwischen 0,1 - 0,3 für Terbutylazin. Auch hier waren die Gehalte in Pflug II am höchsten. Bis zum Ende des Messzeitraumes sanken die Gehalte an Pendimethalin in allen Varianten auf 0,1 - 0,2 mg/kg ab. Bei Terbutylazin lagen die Gehalte zwischen 0 - 0,1 mg/kg Boden nur knapp über der Nachweisgrenze von 0,01 µg/kg untersuchtem Boden (vgl. Abb. 40).

In allen Varianten sind die höchsten Restkonzentrationen nach 56 Tagen bei Pendimethalin festgestellt worden. Nur geringfügig über der Nachweisgrenze lagen die Rückstandsgehalte für die Herbizide Metolachlor und Terbutylazin im Versuchsjahr 1998. In Abbildung 40 fällt auf, dass bei allen 3 Wirkstoffen die Gehalte in der Pflugvariante stets höher lagen als in den pfluglosen Varianten, insbesondere der Variante mit Direkteinsaat. Dort sind die jeweils niedrigsten Konzentrationen gemessen worden.

Die Rückstandsgehalte der eingesetzten Herbizide im Mais für die Messphase des Versuchsjahres 1999 sind in Abbildung 41 dargestellt.

Hinsichtlich der Ausgangskonzentrationen der Herbizide direkt nach Applikation gab es für das Versuchsjahr keine bedeutenden Unterschiede. Wie im Jahr zuvor lagen die gemessenen Werte an Metolachlor zwischen 0,2 - 2 mg/kg Boden sowie für die beiden anderen Herbizide zwischen 0,1 - 1 mg/kg. Noch deutlicher zu erkennen waren die gegenüber der Pflug- und Mulchvariante niedrigeren Anfangskonzentrationen aller 3 Wirkstoffe in der Direktsaatvariante (vgl. Abb. 41).

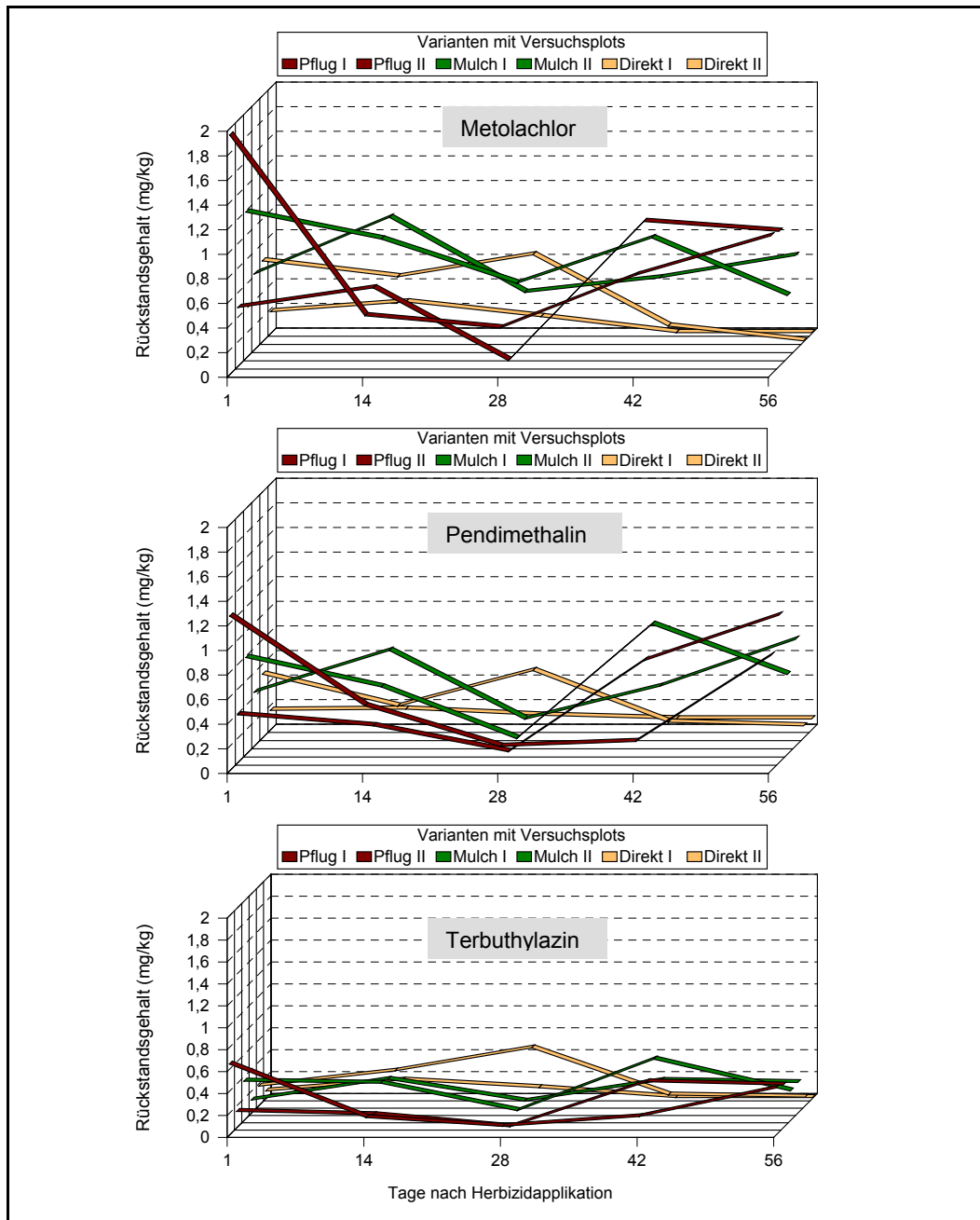


Abb. 41: Vorkommen von Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin in 0 – 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphase mit Mais im Versuchsjahr 1999

Während in den Bearbeitungsvarianten Pflug und konservierend (Mulchsaat) nach 56 Tagen noch immer hohe Rückstandsgehalte analysiert wurden, sanken sie in der Variante mit Direktsaat bis nahe der Nachweisgrenze ab (vgl. Abb. 41). Die an den Probennahmeterminen auftretenden Konzentrationsschwankungen waren in der Direktsaatvariante weniger ausgeprägt als in der Pflugvariante und der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. Wie für das Versuchsjahr 1998 war auch hier die Beobachtung zu niedrigeren Rückstandsgehalten der Herbizide in der Variante mit Direktsaat zu erkennen.

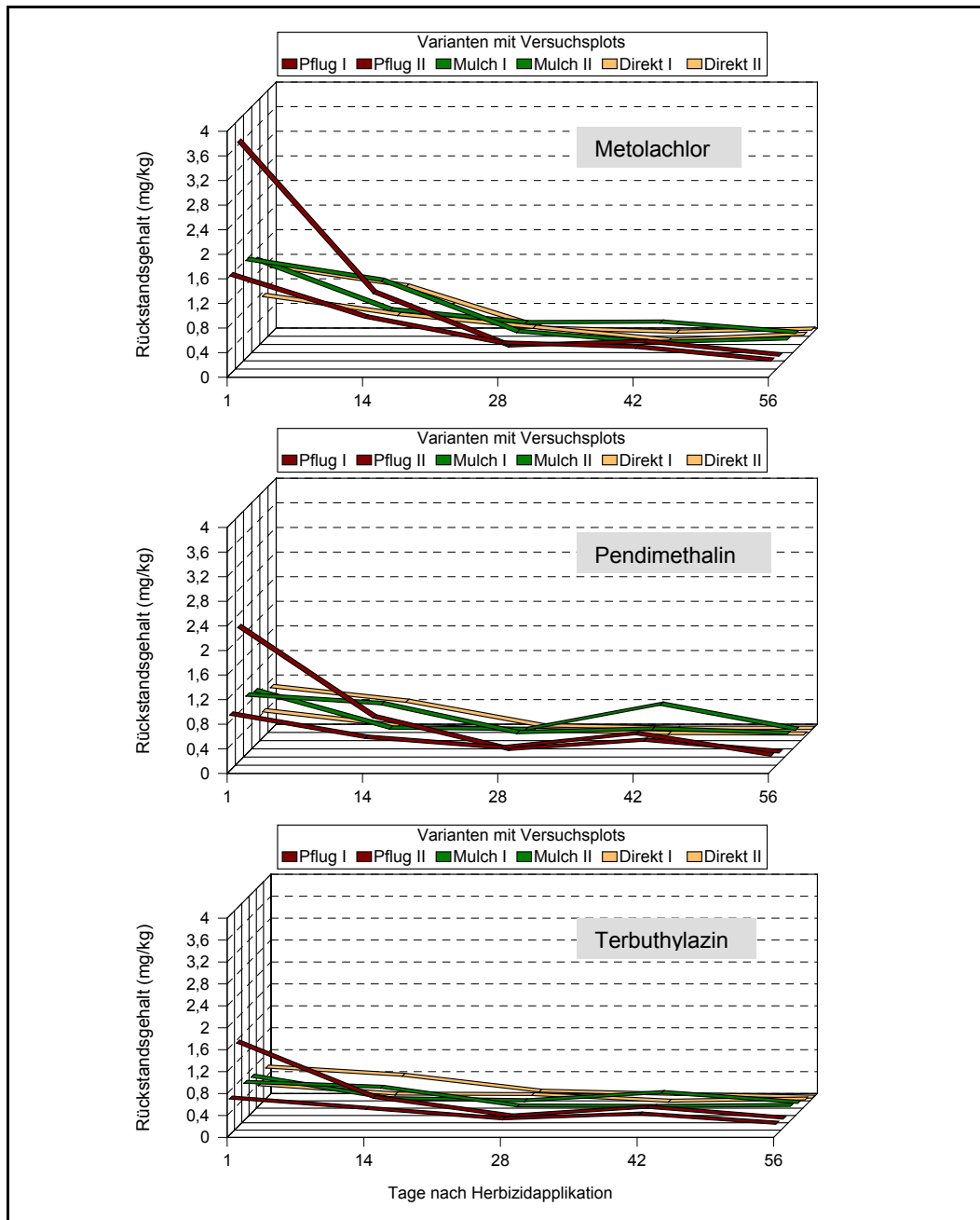


Abb. 42: Vorkommen von Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin in 0 – 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphase mit Mais im Versuchsjahr 2001

Die Wirkstoffkonzentrationen für das Versuchsjahr 2001 lagen in allen Varianten zu Beginn der Messphase fast doppelt so hoch wie in den Jahren 1998 und 1999. Der Linienvverlauf in Abbildung 42 zeigt einen Rückgang der Gehalte an Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin nahe Null zwischen dem 28. und 56. Tag nach Applikation (s. Abb. 42). Dagegen waren die Gehalte, sowohl in der gepflügten Variante als auch in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung, mit 0,2 - 0,4 mg/kg Boden relativ hoch. Es zeigte sich in den 3 Versuchsjahren eine Tendenz zu schnelle-

rem Herbizidabbau in der Direktsaatvariante. Unterschiede zwischen der Variante mit Pflugeinsatz und der mit konservierender Bodenbearbeitung sind nicht eindeutig zu sehen. Eine statistische Absicherung ist sehr schwierig, da eine hohe Variationsbreite der Herbizidgehalte zwischen den jeweiligen Versuchsplots gegeben war.

6.5.1.2 Metazachlor

In den Messphasen mit Winterraps ist das Herbizid Metazachlor mit einer Aufwandmenge von 750 g/ha in jedem Versuchsjahr appliziert worden. Die Abbildung 43 zeigt das Vorkommen des Wirkstoffes in der oberen Bodenkrume (0 - 5 cm) der 3 untersuchten Varianten.

In den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2000 mit Winterraps sanken die Gehalte an Metazachlor im Oberboden 14 Tage nach Applikation bis nahe der Nachweisgrenze ab. Dies entsprach weniger als 90 % der jeweils 1 Tag nach Applikation erhaltenen Menge (s. Abb. 43). Eine Ausnahme gab es im Jahr 2000 in der Pflugvariante. Hier tendierten die Rückstandsgehalte erst am 28. Tag nach Applikation gegen Null.

In der Abbildung 43 ist eine auffallende Dreiteilung der absolut gemessenen Werte an Metazachlor zu erkennen. In der Pflugvariante wurden häufig die höchsten Anfangsgehalte im Boden festgestellt, während die Variante mit Direkteinsaat jeweils die niedrigsten Werte hatte. Dazwischen verlaufen die Linien für die Variante mit konservierender Bodenbearbeitung (vgl. Abb. 43). Abgesehen von der insgesamt schnelleren Abbaugeschwindigkeit des Metazachlors im Vergleich zu den im Mais eingesetzten Wirkstoffen Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin, waren die Gehalte an Metazachlor in der Direktsaatvariante von Beginn an geringer. Hier sind Parallelen zu den Versuchsergebnissen im Mais zu erkennen.

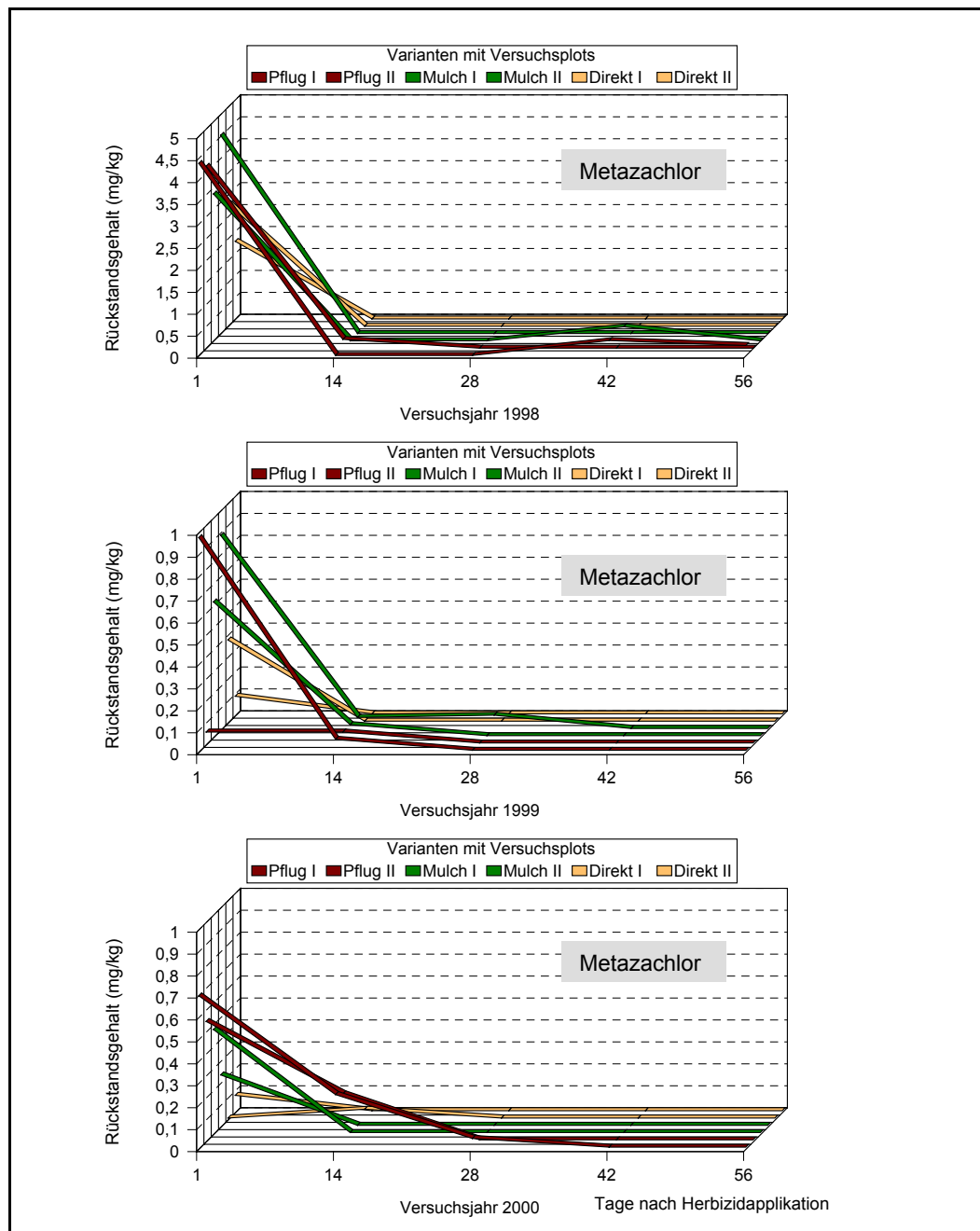


Abb. 43: Vorkommen von Metazachlor in 0 - 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphasen mit Winterraps in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2000

6.5.1.3 Chlortoluron und Isoproturon

Zu Beginn der Messphasen im Winterweizen sind Herbizide mit den Aufwandsmengen 1100 g/ha Chlortoluron und 1500 g/ha Isoproturon für das Versuchsjahr 1999/2000 appliziert worden. In der Abbildung 44 sind die Rückstandsgehalte der Wirkstoffe der 3 untersuchten Variante dargestellt.

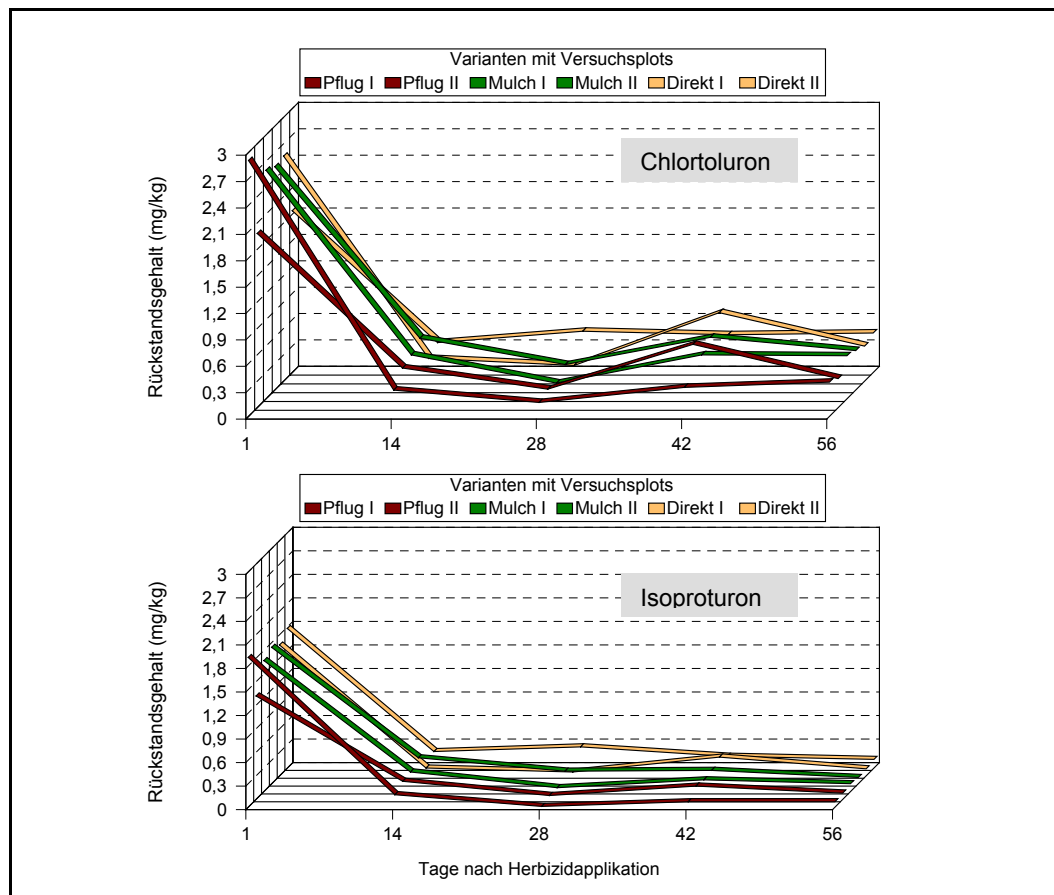


Abb. 44: Vorkommen von Chlortoluron und Isoproturon in 0 - 5 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug, Mulch- und Direktsaat) während der Messphasen mit Winterweizen im Versuchsjahr 1999/2000

Auffällig waren die schon nach ca. 14 Tagen stark gesunkenen Gehalte an Chlortoluron und Isoproturon in allen Varianten. Hier sind Parallelen zu Metazachlor im Winterraps zu erkennen. Anders jedoch als bei Metazachlor sind nach 56 Tagen immer noch Rückstandsgelhalte an Chlortoluron und Isoproturon festgestellt worden (vgl. Abb. 44).

Die Tendenz zu anfangs niedrigeren und schneller sinkenden Rückstandsgelhalten der Herbizide Chlortoluron und Isoproturon in der Direktsaatvariante ist in Abbildung 44 nicht zu sehen. Mit Anfangsgelhalten von 1,8 - ca. 3 mg/kg Boden sank nach 56 Tagen der Wert an Chlortoluron auf ca. 0,3 - 0,5 mg/kg in den 3 Varianten. Auf 0,1 mg/kg sanken die Gehalte an Isoproturon in allen Varianten gegen Ende der Messphase.

Es bleibt abschließend festzuhalten, dass die im Sommerhalbjahr angewandten Herbizide für Mais und Raps in der Variante mit Direkteinsaat niedrigere Konzentrationen als in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung und der Pflugvariante aufwiesen. Es ist ebenfalls eine vermutlich

schnellere Abbaugeschwindigkeit in der Direktsaatvariante anzunehmen, da besonders die im Mais eingesetzten Herbizide, aber auch das Herbizid Metazachlor im Winterraps, gegen Ende der Messphasen nicht mehr nachzuweisen war. In der Direktsaatvariante ist auch ein geringerer Bodenkontakt der Herbizide durch die vermehrte Mulchauflage denkbar, so dass das Eindringen von Wirkstoffen in den Boden verringert wird.

Mit Beginn des Winterhalbjahres während der Messphase mit Winterweizen scheint sich der schnellere Abbau zu relativieren. Für die im Winterweizen eingesetzten Herbizide Chlortoluron und Isoproturon ergab sich keine spezifisch niedrigere Konzentration in der Variante ohne Bodenbearbeitung. Die gleich hohen Rückstandsgehalte in allen Varianten im Verlauf der 56 Untersuchungstage deuteten nicht auf eine beschleunigte Abbaugeschwindigkeit in der Direktsaatvariante hin. Hier fehlt allerdings der Vergleich eines weiteren Versuchsjahres. Aus produktionstechnischen Gründen wurde in den beiden letzten Versuchsjahren auf eine Direktaussaat im Winterweizen verzichtet. Aufgrund des ähnlichen Linienvlaufes im Rückstandsgehalt (vgl. Abb. 44) für die Wirkstoffe Chlortoluron und Isoproturon ist die im Versuchsjahr 1999/2000 beobachtete Tendenz zu gleich schnellem Abbau der Herbizide im Zeitraum bis zu 14 Tage nach Applikation in allen Varianten als wahrscheinlich anzusehen. Gegenüber Isoproturon verlangsamte sich jedoch die Geschwindigkeit des Abbaues bei Chlortoluron im weiteren Verlauf der Messphase.

7 Diskussion

Die Arbeit hatte zum Ziel, die in Kapitel 2 angeführten Fragen zur Wirksamkeit pflugloser Bestelltechniken im Hinblick auf die Minderung von Oberflächenabfluss, Bodenabtrag und den damit verbundenen Austrag von Herbiziden und Nährstoffen auf ackerbaulich genutzten Flächen unter praktischen Bedingungen zu überprüfen. Hierbei sollte untersucht werden, wie viel Wasser und Boden in einer Ackerkultur bei verschiedenen Bestelltechniken nach Niederschlagsereignissen oberflächlich abfließt und welche Konzentrationen sowie Austragsmengen an Herbiziden und Nährstoffen dabei im Abflusswasser auftreten. Zusätzlich sollte geklärt werden, wie das Gefährdungspotential für Austräge von Herbiziden und Nährstoffen ist, die mit dem Zwischen- und Drainageabfluss verlagert werden können.

7.1 Quantifizierung von Boden- und Stoffausträgen über die Eintragspfade Oberflächen-, Zwischen- und Drainageabfluss nach Niederschlagsereignissen

Die Ergebnisse des Oberflächenabflusses nach Niederschlagsereignissen belegen (s. Kap. 6) den erheblichen Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Austragsmengen an Bodenmaterial, Herbiziden und Nährstoffen. Insbesondere die annähernd 100 %ige Reduzierung der Boden- und Stoffausträge bei Anwendung von Direktsaat ist nicht erwartet worden. Die während der 5 jährigen Feldstudie erhobenen Abtragsmessungen zeigen weiterhin, dass das Ausmaß an erosionsbedingten Boden- und Stoffausträgen bei Mais, Winterraps und Winterweizen durch konservierende Bodenbearbeitung mit Mulchsaat am ausgewählten Versuchsstandort im Schnitt zwischen 60 und 90 % gegenüber der konventionellen Bestelltechnik mit dem Pflug verringert werden konnte. In einigen Fällen, wie in den Versuchsjahren 2000 und 2002 im Mais und im Versuchsjahr 2000 im Winterraps, konnte auch bei Anwendung von Mulchsaat ein nahezu 100 %iger Schutz vor Oberflächenabfluss und Bodenabtrag gegenüber der Pflugvariante erzielt werden. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen von SCHMIDT et al. (1997), die Bodenabtragsmessungen zwischen konventionellem und pfluglosem Ackerbau unter natürlichen Bedingungen im mittelsächsischen Hügelland vornahmen.

Der Vorteil dieser Bewirtschaftungssysteme zeigte sich am Versuchsstandort besonders bei Niederschlägen des Horton-Typs, welche in Kapitel 6 als Niederschlagstyp 1 bezeichnet wurden. Diese Beobachtung machten auch MÜLLER u. LÜTKE ENTRUP (2001) während ihrer Runoff-Versuche auf Großparzellen in Nordrhein-Westfalen. Das bedeutet, dass gerade bei Mais oder früh gesätem Winterraps in der Zeit zwischen Mai und September ein wirksamer Schutz vor Was-

sererosion und damit einhergehendem Austrag von Herbiziden und Nährstoffen erzielt werden kann. In den einzelnen Versuchsjahren mit Mais betrug der Oberflächenabfluss während der Messphasen in der konventionellen Variante mit Pflugeinsatz zwischen 0,15 und 1,5 mm (= 0,05 – 0,6 %) des gefallen Niederschlages. Bei Einzelereignissen nach Starkniederschlägen sind wesentlich höhere Mengen oberflächlich abgeflossen. So betrug der registrierte Oberflächenabfluss am 30.06.2001 (s. Tab. 12) in der Pflugvariante ca. 8 % der Niederschlagssumme. In der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung hingegen reduzierte sich die oberflächlich abfließende Menge an Wasser auf 0,0 (1999) und 0,285 mm (2001). Das ergab einen relativen Oberflächenabfluss in der Mulchvariante von 0 - 0,18 % des gefallen Niederschlages innerhalb der Messphasen. Bei Einzelereignissen sind Abflüsse bis zu 2 % der Regensumme berechnet worden. Für die Dauer einer Messphase konnte auf der Mulchvariante eine Reduzierung des Oberflächenabflusses von 87 - 100 % erreicht werden und bei Einzelereignissen zwischen 75 und 100 %.

Hinsichtlich des Bodenabtrages während der Messphasen in der erosionsanfälligen Reihenkultur Mais deuten die fast durchweg geringeren Sedimentgehalte (s. Tab. 13 b) in den Abflussproben der Mulchvariante auf die schützende Wirkung dieser Bearbeitungsvariante gegenüber der Pflugvariante hin. Die berechneten Bodenabträge in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung reduzieren sich um mehr als 80 % im Vergleich zur konventionell bearbeiteten Variante. Die in den Versuchsjahren mit Oberflächenabfluss (1998, 1999, 2001) im Mais berechneten Bodenverluste auf der Pflugvariante liegen mit weniger als 1,5 t/ha (s. Abb. 20) unterhalb der nach der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) errechneten Toleranzgrenze für den Versuchsstandort. Der Begriff des tolerierbaren Bodenabtrages muss aber skeptisch beurteilt werden (BOTSCHEK et al. 1997). Die Berechnungen von Toleranzgrenzen nach der ABAG beruhen auf Beobachtungen, die eine gleichmäßige Bodenbildungsrate durch Verwitterungsprozesse annehmen. Dabei entspräche die Geschwindigkeit einer Bodenneubildung dem „natürlichen“ Bodenabtrag unter mitteleuropäischen Klimabedingungen. Voraussetzung für eine Bodenneubildung ist neben der Mächtigkeit der Verwitterungsdecke die vorherrschende Textur im Solum. Ab einer bestimmten Unterschreitung der Mächtigkeit des Solums nimmt die Verwitterungsrate stark ab (BOTSCHEK et al. 1997). In Beziehung zur Bodentiefe und -textur sprechen AUERSWALD et al. (1991) von erneuerbaren und nicht erneuerbaren Böden.

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich keine lineare Beziehung zwischen tolerierbaren Bodenabträgen und einer Neubildung von Bodenmaterial erkennen. Befindet sich ein Boden im Klimaxstadium seiner Entwicklung (MÜCKENHAUSEN 1985; SEMMEL 1983), so kommt die Bodenbildung zum Stillstand. BORK (1989) und SEMMEL (1995) halten eine Bodenneubildung bei konventionellem Ackerbau unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen für unwahrscheinlich, so dass mögliche Bodenverluste an erosionsgefährdeten Standorten nicht kompensiert werden können.

Da die Mächtigkeit des verwitterten Bodenmaterials am Versuchsstandort zum Teil geringer als 0,5 m ist, kann von einer sehr geringen Bodenbildungsrate ausgegangen werden, die zeitlich einen erosiven Bodenverlust nicht kompensieren wird. In Anlehnung an BORK (1989) und SEMMEL (1995) kann deshalb am Versuchsstandort nicht von einem tolerablen Bodenabtrag ausgegangen werden.

Im Hinblick auf die kaltzeitliche Genese der Lössdecken in Mitteleuropa und den sich daraus im nachfolgend wärmeren Klima des Holozäns entwickelten fruchtbaren Ackerböden, kann bei Bodenabtrag durch Oberflächenabfluss und Windeinwirkung auf Erosionsstandorten von einem irreversiblen Vorgang gesprochen werden. Es bedürfte einer weiteren Kaltzeit, um den Verlust des durch physikalische Verwitterung aufbereiteten Ausgangssubstrates Löss, aus dem sich viele der heutigen Ackerböden entwickelt haben, kompensieren zu können. Angesichts der Endlichkeit dieser Bodenressource ist der Begriff der Toleranzgrenze für Bodenabträge, zumindest auf potenziell hoch erosionsgefährdeten Ackerstandorten, als nicht tolerabel anzusehen.

Demnach sind die Bodenabtragssummen in der Feldstudie mit Mais auf der konventionell bearbeiteten Variante mit Pflugeinsatz als nicht gering zu betrachten. Zudem sind 5 Versuchsjahre eine eher geringe Zeitspanne, um verlässliche Aussagen über die tatsächlichen Verluste des Bodens durch Oberflächenabfluss zu machen. Dies gilt im Übrigen auch für die pfluglosen Varianten.

Bei Betrachtung der Herbizidausträge in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2001 im Mais sind keine Verluste an Einzelwirkstoffen höher als 0,15 % (1,4 g/ha) der Applikationsmenge. Dieser Menge entspricht der Austrag an Terbutylazin in der Pflugvariante, während der Wirkstoff Metolachlor mit 0,97 g/ha etwa 0,08 % der applizierten Menge entspricht. Die geringsten absoluten Austragsmengen in der Pflugvariante konnten für Pendimethalin (0,7 g/ha) analysiert werden. Dies entspricht, wie bei Metolachlor, einem relativen Austrag von 0,08 %. Abgesehen von nicht nachgewiesenen Herbizidverlusten auf der Variante mit Direktsaat, verringerten sich die Austräge an Terbutylazin in der Mulchvariante gegenüber der Pflugvariante von 1,4 auf 0,15 g/ha. Im Gegensatz zur Pflugvariante wurden in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung die höchsten Herbizidausträge bei Metolachlor (0,23 g/ha) festgestellt. Wie auch in der Pflugvariante hatte Pendimethalin mit 0,12 g/ha die niedrigsten Austragsmengen in der Mulchvariante.

Bei Betrachtung der relativen Herbizidanteile im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment sind ihre physiko-chemischen Eigenschaften von größerer Bedeutung. Mit einem mittleren K_{oc} -Wert von 250 L/kg⁻¹ (UBA 2000), aber einer hohen Sorptionsfähigkeit an Humus- und Tonbestandteilen (s. Tab. 5), müsste Metolachlor sowohl im Runoff-Wasser als auch Runoff-Sediment zu finden sein. Bei einem K_{oc} -Wert von > 16000 L/kg⁻¹ (UBA 2000) und sehr hoher Sorptionsfähigkeit müsste Pendi-

methalin fast ausschließlich im Erosionssediment auftreten, während Terbutylazin einen K_{oc} -Wert von 250 L/kg^{-1} besitzt und daher wie Metolachlor in beiden Phasen des Oberflächenabflusses zu finden sein müsste (s. auch HAIDER 1994; LANG u. HURLE 1997; HAIDER u. AUERSWALD 1997; KLEIN 2001).

Das aus den Eigenschaften angenommene Verhalten der Maisherbizide traf vor allem auf Pendimethalin zu. Es wurde mit Anteilen zwischen 96 - > 99 % mit dem Runoff-Sediment ausgetragen, unabhängig von den betrachteten Bearbeitungsvarianten. Metolachlor und Terbutylazin verhielten sich ihren K_{oc} -Werten entsprechend indifferent, wobei die Anteile im Runoff-Wasser zwischen 59 und 96 % schwankten. Im Versuchsjahr 1998 überwogen die Wasseranteile bei Metolachlor mit durchschnittlich 73 % in der Pflugvariante und 84 % in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. Terbutylazin hatte mit 90 % in der Pflugvariante sowie 96 % in der Mulchvariante die höchsten Wasseranteile am Gesamtabfluss. In den Versuchsjahren 1999 und 2001 wurden die durchschnittlichen Anteile von Metolachlor und Terbutylazin zu etwa 2 Drittel im Wasser und 1 Drittel im Boden berechnet. Es fiel jedoch auf, dass die Wasseranteile in der Mulchvariante, mit Ausnahme des Jahres 1999 in dem kein Abfluss auf der Mulchvariante registriert worden ist, in allen Versuchsjahren höher waren als in der Variante mit konventioneller Bestelltechnik. Insgesamt gesehen ist der Herbizidaustrag über das Erosionssediment nur bei Pendimethalin von größerer Bedeutung. Bei Metolachlor und Terbutylazin erhöht sich der sedimentgebundene Austrag nur bei stark ansteigendem Bodenabtrag.

Was die gemessenen Konzentrationen der Herbizide Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin im Oberflächenabfluss betrifft, so traten während der Einzelereignisse kurzfristig hohe Konzentrationen im Runoff-Wasser und Runoff-Sediment auf. Dabei wurden Spitzenwerte bei Metolachlor im Wasser mit $84 \mu\text{g/l}$ und bei Terbutylazin mit $98 \mu\text{g/l}$ auf der Pflugvariante gemessen. Das stark sorbierte Pendimethalin wies Spitzenkonzentrationen im Runoff-Wasser von bis zu $1,3 \mu\text{g/l}$ auf. Im Runoff-Sediment sind Herbizidgehalte bis ca. $950 \mu\text{g/kg}$ Boden (Pendimethalin) analysiert worden. In allen Varianten traten Höchstgehalte im Runoff-Sediment immer beim stark gebundenen Pendimethalin auf. Mit etwa $500 \mu\text{g/kg}$ Boden sind die Höchstgehalte an Metolachlor gemessen worden. Die im Durchschnitt geringsten Gehalte im Erosionssediment hatte Terbutylazin mit ca. $330 \mu\text{g/kg}$ Boden. Signifikante Konzentrationsunterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten waren in beiden Phasen des Oberflächenabflusses nicht zu sehen. Gleichwohl gab es aber in einzelnen Abflussproben geringe Konzentrationsunterschiede (s. Tab. 13 a u. 13 b, Tab. 12 – 17 im Anhang).

Im Verlauf einer Messphase nahmen die Konzentrationen im Runoff-Wasser mehr oder weniger stark ab, während sie im Runoff-Sediment auch über 60 Tage nach Applikationstermin zum Teil noch gleich hoch waren. Das zeigte sich vor allem im ersten Versuchsjahr 1998 und zwar ohne

variantenspezifische Unterschiede. Ein typischer Konzentrationsverlauf der Herbizide während aktuell auftretendem Abflussgeschehen mit zunächst hohen Konzentrationen, die gegen Ende des Ereignisses abnehmen (s. HAIDER 1994 und 1997; HAIDER u. AUERSWALD 1997), konnte nicht beobachtet werden. Die meisten Abflussereignisse waren geprägt von relativ kurzer Dauer, so dass ein möglicher Verdünnungseffekt gegen Ende eines Ereignisses praktisch nicht auftrat. Zudem sind die um den Mittelwert streuenden Konzentrationen mit Standardabweichungen von $> 10 \mu\text{g/l}$ bzw. $> 200 \mu\text{g/kg}$ extrem hoch.

KLEIN et al. (2001) kamen bei ihren Feldversuchen mit Oberflächenabflussmessungen im Mais unter konventioneller Bewirtschaftung für die gleichen Wirkstoffe und derselben Aufwandmenge des Präparates von 6 l/ha auf relative Herbizidausträge, die ähnlich hoch zwischen $0 - 1 \%$ der applizierten Wirkstoffmenge lagen. Dabei hatte Terbutylazin mit $0,9 \%$ im ersten Versuchsjahr die höchste relative Austragsmenge und Pendimethalin ($0,57 \%$) zusammen mit Metolachlor ($0,58 \%$) die niedrigste. Im zweiten Versuchsjahr wurde mit $0,32 \%$ der Applikationsmenge Metolachlor am stärksten im Oberflächenabfluss gefunden. Pendimethalin hingegen mit $0,09 \%$ wurde am geringsten ausgetragen. Zu wesentlich höheren Austragsmengen an Herbiziden kamen ROSNER und KLIK (2001) in ihren Feldversuchen mit Mais, Zuckerrüben und Sonnenblumen bei unterschiedlicher Bestelltechnik. Sie berechneten relative Austragsmengen an Wirkstoffen im Durchschnitt von 1 bis 6% im Jahr. Dabei verringerte sich der Herbizidaustrag in der Mulchvariante um ca. 70% , während er sich in der Direktsaatvariante nur um ca. 54% reduzierte. In diesen Versuchen konnte nicht geklärt werden, warum die Variante ohne Bodenbearbeitung schlechteren Schutz vor Oberflächenabfluss und Stoffaustrag bot. Allerdings handelte es sich bis auf Pendimethalin um die Wirkstoffe Rimusulfuron, Bromoxynil, Metamitron und Ethofumesat mit jeweils unterschiedlichen Aufwandmengen und Eigenschaften. REDDY et al. (2001) untersuchten Austräge an Metolachlor bei differenzierter Bodenbearbeitung. Bei Anwendung von Direktsaat war nur noch 20% des Austrages an Metolachlor gegenüber der konventionellen Anbauweise zu verzeichnen. Die relativen Austräge waren jedoch mit bis zu knapp 9% der Applikationsmenge ungleich höher. Bei Feldversuchen mit konventionellem Anbauverfahren in Kanada berechneten NG und CLEGG (1997) einen Metolachlorverlust von nur $0,03 \%$ der Applikationsmenge durch Oberflächenabfluss.

LANG und HURLE (1997) maßen weit weniger hohe Spitzenkonzentrationen ($30 \mu\text{g/l}$) bei Terbutylazin im Runoff-Wasser als in den eigenen Feldversuchen vorlagen. Dagegen erhielten sie deutlich höhere Spitzenkonzentrationen an Terbutylazin und Pendimethalin im Runoff-Sediment. In Freilandversuchen in Bayern kamen SCHÜLEIN et al. (1996) zu ähnlich hohen Wirkstoffkonzentrationen an Terbutylazin im Runoff-Wasser wie in der eigenen Feldstudie im Mais. Sie wiesen jedoch nach, dass Terbutylazin nur mit einem geringen Anteil der Applikationsmenge in ein Fließgewässer gelangte. Alle Versuche zeigen aber - die Eigenen mit eingeschlossen - dass trotz

relativ geringer Herbizidausträge von ackerbaulich genutzten Flächen hohe Spitzenkonzentrationen im Oberflächenabfluss auftreten und durch vermehrten Austrag auf konventionell bearbeiteten Ackerflächen zur Gewässerbeeinträchtigung führen können.

In den Versuchsjahren mit Winterraps von 1998 - 2002 und dem Raps herbizid Metazachlor gab es nur 2 Messphasen mit Oberflächenabflussereignissen. Nach einer Havarie der Messsysteme 1998 konnten die angefallenen Abflussproben nicht ausgewertet werden. Bei Betrachtung der Ergebnisse aus dem Versuchsjahr 2000 kam es nur auf der Variante mit konventioneller Bestelltechnik zu Oberflächenabfluss und Stoffabträgen. Innerhalb der Messphase flossen auf der Pflugvariante 2,2 mm an Niederschlag oberflächlich ab, was einer relativen Menge von 1,6 % des in der Messphase gefallenen Niederschlages entsprach (s. Tab. 22 und Tab. 23). Während der Einzelniederschläge sind bis zu 8 % der Niederschlagssumme auf der Bodenoberfläche abgeflossen. Dies entsprach etwa den relativen Maximalmengen an Oberflächenabfluss der Versuchsjahre im Mais. Die berechneten Bodenabträge während der Messphase im Versuchsjahr 2000 beliefen sich auf 3 t/ha. Damit wäre in der Pflugvariante der nach der ABAG errechnete tolerable Bodenabtrag erreicht. Im Vergleich zum nicht aufgetretenen Bodenabtrag in den pfluglosen Varianten zeigte sich ein deutlich fehlender Schutz vor Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in der konventionell bearbeiteten Variante. Alle Abflussereignisse traten im Monat September auf, der für diesen Standort als ein Monat mit der höchsten Erosionsgefahr anzusehen ist (KNAPPE 1997; SAUERBORN und ERDMANN 1993). Die für den Haarstrang flächenmäßig herausragende Getreide- und Rapsernte beginnt je nach Höhenlage, Exposition und jährlich wechselnden Witterungsbedingungen meistens Anfang bis Mitte Juli mit der Wintergerste und endet im August mit der Weizen- und Haferernte. Die abgeernteten Felder werden unverzüglich bearbeitet und bald danach wieder bestellt. In diesem Zeitraum sind die Ackerflächen für mehrere Wochen ohne schützende Pflanzendecke und sind so potenziell stark erosionsgefährdet. Die Eintrittswahrscheinlichkeit erodierender Niederschläge während dieses Zeitfensters ist relativ hoch. Dies belegen auch die Aufzählungen zum Teil katastrophaler Oberflächenabflussereignisse in der Vergangenheit am Haarstrang (JAGOW 1959; GLATTHAAR und SCHREIBER 1988; MÜLLER 1993; ERLACH 1995; ILLNER 2003). Im Gegensatz zum Mais, der als Reihenkultur für das Untersuchungsgebiet des Haarstranges im Ackerbau eine untergeordnete Rolle spielt, geht vom konventionellen Anbau von Winterraps je nach Witterungsverhältnissen zwischen Saatbettbereitung und eintretender Winterruhe im November eine erhöhte Gefahr von niederschlagsbedingtem Oberflächenabfluss und Bodenabtrag aus. Dieses Zeitfenster konnte durch die erzielten Ergebnisse der Boden- und Stoffabträge während der 5 jährigen Feldstudie bestätigt werden.

Die berechneten Frachtsummen an Metazachlor von der Pflugvariante betrugen 1,15 g/ha. Das entsprach einer Austragsmenge von 0,115 % der applizierten Ausgangsmenge. Es überwogen die

gelösten Anteile an Metazachlor im Runoff-Wasser mit ca. 80 % und 20 % Anteilen im Runoff-Sediment. Spitzenkonzentrationen an Metazachlor von 81 µg/l traten bei Einzelereignissen in der Wasserphase auf. In der Sedimentphase liegen die Höchstgehalte an Metazachlor bei 270 µg/kg Boden (vgl. Tab. 24 a u. 24 b, Tab. 18 - 19 im Anhang). Abgesehen von den starken Abweichungen der Konzentrationen einzelner Abflussproben während eines Abflussereignisses ist im Gegensatz zu den Maisherbiziden Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin eine kontinuierliche Abnahme der Konzentrationen an Metazachlor im Verlauf der etwa 60 Tage dauernden Messphase festgestellt worden. Vier Wochen nach Applikationstermin konnte daher im Runoff-Sediment kein Metazachlor nachgewiesen werden (s. Tab. 24 b). Der nach UBA (2000) angegebene K_{oc} -Wert von 80 L/kg⁻¹ ist der niedrigste aller 6 untersuchten Wirkstoffe und deutet auf ein geringes Sorptionsvermögen hin. Aufgrund des hohen Sedimentaustrages im Versuchsjahr 2000 sind dennoch ca. 20 % Wirkstoffanteile mit dem Boden ausgetragen worden.

Vergleichbare Feldstudien beim Rapsherbizid Metazachlor sind bisher in der einschlägigen Literatur nicht beschrieben worden. Eine Bewertung der ausgetragenen Frachtsummen kann sich daher nur am berechneten relativen Austrag des Wirkstoffes und den dazugehörigen Konzentrationen im Runoff-Wasser beziehen.

Für die Versuchsjahre mit Winterweizen zwischen Oktober und März traten ausschließlich Niederschlagsereignisse des Typs 2 (Dunne-Typ) auf (s. Tab. 30 und Kap. 3.1.1.1), wobei nur im Jahr 1999/2000 Oberflächenabfluss registriert wurde. Es trat sowohl in der Pflugvariante als auch in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung Oberflächenabfluss auf, nicht aber in der Variante mit Direktsaat. Dabei flossen in der konventionell bestellten Variante ca. 0,3 mm Niederschlag oberflächlich ab, was ca. 0,05 % des in der Messphase gefallenen Niederschlages (471 mm) bedeutete. Mit ca. 0,03 % des gefallenen Niederschlages in der Mulchvariante verringerte sich das oberflächlich abfließende Wasser um 46 %. In beiden Varianten (Pflug, Mulch) ist im Versuchsjahr 1999/2000 ein kaum messbarer Bodenabtrag von weniger als 0,01 t/ha berechnet worden. Nach 5 Jahren Feldstudie im Winterweizen wurde bis auf die ausgewerteten „Kleinereignisse“ kein weiterer Bodenabtrag registriert. Bodenerosive Prozesse im Winterhalbjahr bei eintretender Schneeschmelze konnten nicht beobachtet werden. Andere Autoren (HAIDER 1994; ILLNER 2003) weisen jedoch auf die im Winterhalbjahr auftretenden Abflussereignisse bei Niederschlägen auf Wasser gesättigte Oberböden und bei gleichzeitiger Schneeschmelze hin. Aus eigenen Beobachtungen am Haarstrang sind winterliche Abflussereignisse auf Getreideflächen im Bereich von Schlepperspuren zu erkennen. Das höhere Bodenabtragspotenzial haben nach den vorliegenden Versuchsergebnissen die Sommermonate Mai bis September mit ihren häufiger auftretenden Starkniederschlägen.

Die Austräge an Chlortoluron und Isoproturon liegen in der Pflugvariante bei 0,01 g/ha bzw. 0,0005 g/ha. Bezogen auf die applizierte Wirkstoffmenge entspricht dies einem relativen Chlortoluron-Austrag von 0,001 % sowie einem Isoproturon-Austrag von < 0,001 %. Auf der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung reduzierte sich der Austrag an Chlortoluron um 50 % (0,005 g/ha) gegenüber der Pflugvariante. Dagegen erhöhte sich der Austrag an Isoproturon in der Mulchvariante um 50 % (0,001 g/ha). Diese Werte beziehen sich aber ausnahmslos auf die Herbizidgehalte im Runoff-Wasser. Trotz der erhöhten Austräge in der Mulchvariante betrugen die auf die Applikationsmenge bezogenen Isoproturon-Austräge in beiden Varianten < 1 ‰. Bei einem mittleren K_{oc} -Wert von 210 L/kg⁻¹ (UBA 2000) ist der Wirkstoff Chlortoluron mit höheren Konzentrationen (0,1 - 7,4 µg/l) als Isoproturon (0 - 1 µg/l) im Runoff-Wasser beider Varianten vermehrt ausgetragen worden. Gab es für den Wirkstoff Chlortoluron nur minimale Konzentrationsunterschiede zwischen den Varianten, so waren die Konzentrationen bei Isoproturon in der Mulchvariante deutlich höher (s. Tab. 31). Das bestätigen die in der Pflugvariante oft nicht mehr nachweisbaren Konzentrationen an Isoproturon. Von allen 6 untersuchten Wirkstoffen ist Isoproturon der einzige Wirkstoff mit eindeutig höheren Konzentrationen in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. Es ist erstaunlich, dass Isoproturon mit einem K_{oc} -Wert von 85 L/kg⁻¹ nach mehr als 140 Tagen nach Applikation im Runoff-Wasser nachzuweisen war, obwohl in einigen Forschungsarbeiten die Halbwertszeiten (Dt_{50} -Wert) für Isoproturon mit 20 (KLIMSA 1996; UBA 2000) bis 50 Tagen (GEISELHART 1994) angegeben werden. SCHÜLEIN et al. (1996) gaben sogar Dt_{50} -Werte für Isoproturon und Terbutylazin an, die unter 20 Tagen liegen. Bei ihren Herbizidversuchen handelte es sich jedoch um Frühjahrsapplikationen bei steigenden Bodentemperaturen. Bei Applikationen im Herbst unter Freilandbedingungen ist durch niedrige Temperaturen mit einer höheren Persistenz von Isoproturon zu rechnen. Ein weiteres Versuchsjahr mit Oberflächenabflussereignissen stand nicht zur Verfügung, um diese Tendenz bestätigen zu können.

Wie für Metazachlor fehlen bei Chlortoluron Freilandversuche zum Austragspotenzial des Wirkstoffes. Für Isoproturon hingegen sind in einigen Feldstudien sowie bei Regensimulationsversuchen Ergebnisse zum Austrag mit dem Oberflächenabfluss erzielt worden. Während der Feldversuche von LANG und HURLE (1997) zu Herbizidausträgen unter Sommerweizen mit einer Frühjahrsapplikation von Isoproturon im Mai traten bis 14 Tage nach Applikation Wirkstoffkonzentrationen im Runoff-Wasser zwischen 0,1 und 1,4 µg/l auf. Die Herbizidanteile im Oberflächenabfluss wurden zu 100 % in der wässrigen Phase gemessen. Wesentlich höhere Konzentrationen im Runoff-Wasser erhielten KORSAETH et al. (1997), KÖRDEL und KLÖPPEL (1997) sowie HAIDER und AUERSWALD (1997) bei Regensimulationsversuchen mit Isoproturon. Sie erhielten Spitzenkonzentrationen von mehreren 100 bis 1000 µg/l in der Wasser- und Sedimentphase des Oberflächenabflusses. Beide gingen vom „Worst-Case-Ansatz“ aus, bei dem hohe bis sehr hohe Niederschlagsintensitäten simuliert wurden, mit maximaler Aufwandmenge an Herbiziden und nur 1 bis 2

Stunden einsetzender Beregnung nach erfolgter Applikation. Dabei kamen KORSAETH et al. (1997) auf laterale Wirkstoffausträge, die zwischen 3 und 17 % der applizierten Wirkstoffmenge lagen. Dem K_{oc} -Wert von Isoproturon entsprechend fanden KORSAETH et al. (1997) höhere Anteile des Wirkstoffes im Runoff-Wasser.

Zur Erweiterung des Wissens über das Verhalten von stark oder weniger stark sorbierten Stoffen sind solche Versuche hilfreich. Die Übertragbarkeit dieser Simulationen auf die Vorgänge bei natürlichen Niederschlagsereignissen ist aber in Frage zu stellen. Der „Worst-Case-Ansatz“ ist nicht der Kritikpunkt, da erosive Niederschläge durchaus nur wenige Stunden nach einer Herbizidanwendung eintreten können. Vielmehr kann die Methode der Regensimulation selbst als nicht besonders wirklichkeitsnah angesehen werden. Es ist bekannt, dass Starkniederschläge, so unterschiedlich die Niederschlagsdauer auch sein möge, in ihren Intensitäten einen sehr oszillierenden Verlauf (s. auch HAIDER 1997; MÜLLER und LÜTKE ENTRUP 2001) annehmen. Das heißt, dass sehr hohe Intensitäten von > 60 mm/h meistens nur wenige Minuten andauern und nicht über mehr als eine halbe Stunde wie es bei Regensimulatoren der Fall ist. Diese Oszillation im Niederschlag wird demnach bei künstlichen Regenversuchen nicht simuliert, sondern es handelt sich um gleichbleibende Intensitäten, die nur durch eine gesamte Beregnungsunterbrechung verändert werden können (EVERDING et al. 1994; KROMER et al. 1996). Das muss Konsequenzen für mögliche Abflussereignisse am Boden haben. Mit Hilfe der Regensimulatoren wird meistens 80 – 90 % (EVERDING et al. 1994, 1996) der Energie eines vergleichbaren natürlichen Niederschlages erzielt. Daher wird allgemein eine höhere Erosivkraft von natürlichen Niederschlägen angenommen und somit auch ein höherer Oberflächenabfluss, Boden- und Stoffabtrag. Aufgrund der beschriebenen Technik stellt sich aber die Frage ob es bei der Übertragbarkeit der Regensimulation auf natürliche Niederschläge nicht zu einer Überschätzung der dabei gewonnen Austräge an Herbiziden und Nährstoffen kommt.

Zum Austrag von Nährstoffen (N, P) mit dem Oberflächenabfluss (s. Tab. 18 – 20) ergaben sich im Mais Fruchtsummen an gelöstem und sedimentgebundenem N in der Pflugvariante von 0,075 kg/ha (1999) bis zu 0,39 kg/ha (1998). Die Austragsmengen an P in der konventionellen Variante sind zwischen 0,005 kg/ha (1999) und 0,1 kg/ha (1998) berechnet worden. In der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung verringerte sich der Nährstoffaustrag bei N um 70 % (0,05 g/ha 2001) bis 100 % (1999). Für den P-Austrag konnte eine Reduzierung in der Mulchvariante gegenüber der Pflugvariante von ca. 60 % (2001) bis zu 100 % (1999) erreicht werden. Während der Versuchsjahre im Winterraps wurden Austräge an N ebenfalls mit weit unter 1 kg/ha in der Pflugvariante berechnet. Ein Vergleich mit den beiden pfluglosen Varianten erübrigt sich, da dort kein Oberflächenabfluss in den Versuchsjahren registriert worden ist. Beim Feldversuch mit Winterweizen konnten nur die N- und P-Austräge mit dem Runoff-Wasser bestimmt werden. Dabei sind die

berechneten Verluste auf den Varianten Pflug und Mulchsaat mit < 1 g/ha vernachlässigbar gering. Es konnte jedoch auf der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung eine ca. 70 %ige Verringerung des N-Austrages festgestellt werden. In der Direktsaatvariante trat kein messbarer Oberflächenabfluss auf. Damit liegen die Nährstoffausträge für gelöstes und sedimentgebundenes N und P in allen Versuchsjahren unter 1 kg/ha. Zu sehr viel höheren Frachtsummen an N und P im Oberflächenabfluss kommen ERPENBECK (1987), HAIDER (1997), WILLIS et al. (1997), JORDAN und MÜLLER (1997), KLIK et al. (2001) und REDDY et al. (2001). Sie errechneten flächenbezogene Nährstoffausträge an N, ausgelöst durch Oberflächenabfluss, von mehreren kg/ha, wobei Frachtsummen von über 40 kg/ha berechnet wurden (WILLIS et al. 1997). Für P sind zum Teil Frachtsummen von über 20 kg/ha (KLIK et al. 2001) berechnet worden. In den Feldversuchen von KLIK et al. (2001) und REDDY et al. (2001) mit 3 verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten konnte eine Minderung der N-Austräge durch Oberflächenabfluss bei pflugloser Bearbeitung zwischen 48 % (Mulchsaat) und 71 % (Direktsaat) bzw. zwischen 45 % (Mulchsaat) und 61 % (Direktsaat) erreicht werden. Während in den Versuchen von KLIK et al. (2001) der P-Austrag unter pflugloser Bestelltechnik sich ebenfalls zwischen 59 und 76 % verringerte, errechneten REDDY et al. (2001) sogar höhere P-Austräge bei Anwendung von Direktsaat gegenüber der konventionellen Bearbeitung. Näher begründen konnten sie das jedoch nicht.

Die gemessenen Konzentrationen an gelöstem N ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) und P ($\text{PO}_4\text{-P}$) unter Mais und Winterraps schwankten zwischen 0 – 37 mg/l ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) bzw. 0 – 1,2 mg/l ($\text{PO}_4\text{-P}$). Bei Abflussereignissen auf beiden Varianten gab es keine auffälligen Konzentrationsunterschiede. In den Versuchsjahren mit Winterweizen lagen die Konzentrationen im Runoff-Wasser wesentlich geringer als im Mais und Raps. Sie lagen zwischen 0 – 13 mg/l, wobei die variantenbezogenen Konzentrationsunterschiede sehr gering waren (s. Tab. 33 u. Tab. 20 – 24 im Anhang).

In den Versuchsjahren mit Mais sind im Runoff-Sediment höhere N- (1,8 – 2,8 g/kg) und P-Gehalte (0,5 – 0,7g/kg) in der Mulchvariante gemessen worden. Die Gehaltsunterschiede waren zwar gering, sie traten aber kontinuierlich auf (vgl. Tab. 17 b, Tab. 13, 15, 17 im Anh.). Die P-Gehalte im Runoff-Sediment unter Winterraps liegen in der Pflugvariante zwischen 0,5 – 0,6 g/kg Boden.

Die während der 5 jährigen Feldstudie gemessenen Konzentrationen an gelöstem $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ liegen im Bereich der Werte von HAIDER (1997) sowie JORDAN und MÜLLER (1997), die Nährstoffausträge von Ackerflächen bei konventioneller Bodenbearbeitung quantifizierten. NITZSCHE et al. (2000) stellten höhere Gehalte an gelöstem sowie sedimentgebundenem P in pfluglosen Bestelltechniken fest. Diese Beobachtung konnte während des eigenen Feldversuches nur im Runoff-Sediment der Varianten mit konservierender Bodenbearbeitung bestätigt werden (vgl. Tab. 17 b).

Was die Nährstoffanteile im Runoff angeht, so wurde P wie erwartet in allen untersuchten Kulturen und Varianten fast ausschließlich (> 99 %) mit dem Runoff-Sediment ausgetragen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch ERPENBECK (1987); HAIDER (1997); JORDAN und MÜLLER; RÖMER (1997); NITZSCHE (2000). In den Versuchsjahren mit Mais wurde ein höherer N-Anteil im Runoff-Sediment (88 – 97 %) errechnet. Das entspricht nicht den Ergebnissen der zitierten Autoren. Bis auf die Ergebnisse von REDDY et al. (2001) bei Runoff-Versuchen in den USA, die ebenfalls einen wesentlich höheren N-Anteil im Erosionssediment gemessen haben, ist bei allen anderen Autoren der N-Anteil im Runoff-Wasser höher. Möglicherweise hat für die Festlegung von N im Boden der Tongehalt eine größere Bedeutung. Genauso wie in den eigenen Feldversuchen (s. Tab. 5) war bei REDDY et al. (2001) ein toniger Boden vorhanden, während es sich in den anderen Versuchen um Schluffböden handelte. Zur Klärung wären allerdings weitere Versuchsjahre notwendig.

In Kapitel 6.2 über Boden-, Herbizid- und Nährstoffausträge mit dem Zwischenabfluss wurde auf die methodische Schwierigkeit bei der Erfassung hingewiesen. Aus den Messphasen mit Winterfrucht und Winterweizen liegen nur für das Versuchsjahr 1999/2000 im Winterweizen Ergebnisse zum Austrag von Stoffen über diesen Eintragspfad vor. Von den gefallen 471 mm Niederschlag während der Messphase 1999/2000 sind ca. 1,1 % in den Varianten Pflug und Mulchsaat über den Zwischenabfluss abgefließen. In der Variante mit Direktsaat waren es 0,6 % vom Niederschlag. Dem gegenüber sind auf der Pflugvariante nur 0,1 % oberflächlich abgefließen sowie 0,02 % in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. Die Annahme eines erhöhten Zwischenabflusses durch präferenzielle Fließwege in den pfluglos bestellten Bearbeitungsvarianten konnte nicht beobachtet werden. Zur Klärung des Problems waren jedoch nicht genug Abflussdaten vorhanden. Die Berechnungen für den Zwischenabfluss beziehen sich auf ein nicht definiertes Einzugsgebiet, dass entsprechend der Fläche einer Bearbeitungsvariante mit 520 m² angenommen wurde. Daraus lässt sich jedoch keine Flächenbeziehung herstellen. Die gewonnenen Frachtsummen an Herbiziden (Chlortoluron, Isoproturon) und Nährstoffen (N, P) mit Hilfe des in Kapitel 5.2.4.2 beschriebenen Dränvlieses sind daher als absolute Austräge berechnet worden. Der registrierte Stoffaustrag erfolgte ausschließlich in gelöster Form. Die gemessenen Konzentrationen an Chlortoluron mit mittlerem K_{oc}-Wert im Zwischenabfluss der Variante mit konventioneller Einsaat lagen bei 1,2 – 7,2 µg/l, wobei Spitzenkonzentrationen von knapp 8 µg/l gemessen wurden. In den Varianten mit pflugloser Einsaat sind mittlere Konzentrationen zwischen 1 - 3 µg/l (Mulchsaat) und zwischen 1 – 4 µg/l (Direktsaat) analysiert worden. Für das schwach sorbierte Isoproturon lagen die Konzentrationen in der Pflugvariante zwischen 0 – 1,0 µg/l (s. Tab. 36). Die höchsten Konzentrationen traten aber in der Variante mit konservierender Bearbeitung auf. Hier lagen die Werte zwischen 0 – 2 µg/l, während sie in der Variante mit Direktsaat zwischen 0,8 – 1,1 µg/l lagen. Aufgrund der höheren Konzentrationen in der Pflugvariante waren daher die Austräge an Chlortoluron

gegenüber den pfluglosen Varianten um 67 bzw. 77 % erhöht. Die berechneten Isoproturon-Frachten im Zwischenabfluss waren hingegen in den Varianten mit pflugloser Bestelltechnik um 50 – 80 % höher als in der Pflugvariante.

KLEIN et al. (2001) konnten bei ihren Feldstudien mit Mais fast gleich hohe Herbizid-Konzentrationen (Terbuthylazin) von 270 µg/l zwischen Oberflächen- und Zwischenabfluss nach einem Starkregenereignis feststellen. Dies spricht für einen verstärkten Makroporenfluss im Boden. Ihre Versuche liefen aber ausnahmslos auf Ackerflächen mit konventioneller Bodenbearbeitung. Auch NORDMEYER und ADERHOLD konnten nach Beregnungsversuchen Durchbruchkurven von Herbiziden in Makroporen schon nach knapp 20 Min. beobachten. Dabei traten sehr hohe Konzentrationen an Chlortoluron und Isoproturon von mehr als 4000 µg/l auf. Beim Regensimulationsversuch von OLSON et al. (1997) über den Austrag von Metolachlor mit dem Zwischenabfluss wurden Konzentrationen des vom K_{oc} -Wert her dem Chlortoluron vergleichbaren Herbizides von 0 - 3,5 µg/l gemessen. Chlortoluron-Konzentrationen bis über 40 µg/l fanden STANGE et al. (1997) im Zwischenabfluss bei Simulationsversuchen über Makroporenfluss.

Bei der Betrachtung des Austrages von gelöstem N ($\text{NO}_3\text{-N}$), $\text{NH}_4\text{-N}$) und P ($\text{PO}_4\text{-P}$) mit dem Zwischenabfluss sind in der Pflugvariante Konzentrationen an $\text{NO}_3\text{-N}$ zwischen 2 und 15 mg/l und an $\text{NH}_4\text{-N}$ zwischen 0,5 und 4 mg/l gemessen worden. Für $\text{PO}_4\text{-P}$ lagen die Werte zwischen 0 und 0,4 mg/l. Die durchschnittlichen Konzentrationen ($\text{NO}_3\text{-N}$) waren in der Direktsaatvariante am niedrigsten, während sie in den beiden anderen Varianten gleich hoch waren. Bei $\text{NH}_4\text{-N}$ sind die durchschnittlich höheren Konzentrationen der Variante ohne Bodenbearbeitung gemessen worden. Ebenfalls höher lagen die durchschnittlichen Konzentrationen an $\text{PO}_4\text{-P}$ in der Direktsaatvariante. Aus den berechneten Frachtsummen der Nährstoffausträge in gelöster Form ist keine Tendenz zu höheren Mengen in den pfluglosen Varianten zu erkennen (vgl. Tab. 28). Für die Varianten Pflug und Mulchsaat sind gleich hohe Austragsmengen an $\text{NO}_3\text{-N}$ (0,15 g) ermittelt worden. Dagegen waren sie auf der Direktsaatvariante um ca. 58 % verringert.

Aus der Literatur ist zu entnehmen (s. Kap. 3.1.1.2), dass über den Austragspfad des Zwischenabflusses unterschiedlich hohe Mengen an Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen transportiert werden können. Es treten dabei zum Teil Konzentrationen im Abfluss auf, die denen im Oberflächenabfluss entsprechen (s. KLEIN et al. 2001). Bestimmte Bedingungen müssen aber für einen bevorzugten Zwischenabfluss über Makroporen erfüllt sein. Zum Beispiel trägt die vorherrschende Textur in bindigen Böden (Tonböden) zur Beständigkeit von Makroporen bei (BECHER 1985; LAMMEL 1990). Die hydraulische Wirksamkeit von Makroporen wird aber nur über Porenkontinuität zwischen unterschiedlichen Tiefen im Boden und der Bodenoberfläche gewährleistet (BEISECKER 1994; NORDMEYER und ADERHOLD 1995). Mitentscheidend für das Ausmaß des Zwischenab-

flusses über biogene und geogene Makroporen und dem damit einhergehenden Stofftransport ist die kinetische Energie der auf den Boden treffenden Regentropfen. Durch die Aufprallwirkung der Tropfen kann es zur Verstopfung der Makroporen kommen, die zu einer Verzögerung des Wasser- und Stofftransportes führen kann (TERRY 1998). Es wird zudem ein schnellerer Abbau von Stoffen im Makroporenraum angenommen, die dann für einen zusätzlichen Transport durch weiteren Makroporenfluss nicht mehr zur Verfügung stehen (LE BAYON und BINET 1998).

Trotz der Schwierigkeiten hinsichtlich der methodischen Erfassung von Zwischenabflüssen in den eigenen Feldversuchen ist ersichtlich, dass ein Austragspotential an Herbiziden und Nährstoffen über diesen Pfad besteht. Zudem ist eine schnelle Tiefenverlagerung (bis 0,8 m) von Herbiziden und Nährstoffen in allen Varianten nachgewiesen worden. Es konnte aber nicht eindeutig geklärt werden, ob ein gegenüber der Variante mit konventioneller Bestelltechnik erhöhter Zwischenabfluss in den pfluglosen Varianten besteht. Zur klaren Abgrenzung des Einzugsgebietes von Zwischenabflüssen für die jeweiligen Bearbeitungsvarianten wären zum Beispiel Lysimeterversuche notwendig. Der hohe Aufwand bei Lysimeterversuchen steht oft nicht im Verhältnis zu den gewonnenen Erkenntnissen über den Pfad des Zwischenabflusses (BISCHOFF et al. 1999). Das liegt vor allem an den komplexen Vorgängen und Prozessen in der Bodenmatrix, welche nur schwer zu erfassen sind. Daher reichen auch Stichproben für eine genauere Bewertung der Stofffrachten nicht aus, um zu einer Klärung des diffusen Eintrages von Herbiziden und Nährstoffen in Oberflächengewässer über diesen Pfad zu kommen (FLÜHLER et al. 2001).

Zur Bedeutung des Drainageabflusses im Feldversuch sind Erkenntnisse zur hydrogeologischen Situation des Versuchsstandortes gewonnen worden, die bei einer Bewertung der methodischen Vorgehensweise für weitere Versuche dieser Art verwendet werden können. Zunächst einmal sind Ergebnisse von Herbizid- und Nährstofffrachten sowie Konzentrationen der untersuchten Stoffe über diesen Austragspfad gewonnen worden, die wie am Beispiel des Zwischenabflusses keine Schlüsse über einen bevorzugten Drainagefluss bei pflugloser Bodenbearbeitung zuließen.

Im Gegensatz zu den Feldstudien über Zwischenabfluss konnten Einzugsgebiete der auf den Bodenbearbeitungsvarianten sich befindenden Drainageausläufe näher definiert werden. In 2 Versuchsjahren (1998, 1999/2000) sind dabei die Abflüsse in der Parzelle mit Winterraps (1998) und mit Winterweizen (1999/2000) erfasst worden. Es stellte sich heraus, dass die registrierten Abflusssummen im Jahr 1998 in den Varianten mit pflugloser Bodenbearbeitung gegenüber der Variante mit konventioneller Bestelltechnik deutlich höher waren (s. Abb. 30). Jedoch waren sie im Jahr 1999/2000 wesentlich geringer (vgl. 34). In beiden Versuchsjahren sind dabei phasenweise höhere Abflussraten in der Pflugvariante gemessen worden (s. Abb. 29 und Abb. 33). Im Versuchsjahr 1998 dagegen, in dem die anfallenden Wassermengen unter den definierten Flächen

zum Teil höher berechnet wurden als der gefallene Niederschlag, musste ein Fremdwassereinfluss gegeben sein. Dieser Einfluss war auf schnell ansteigendes Grundwasser zurück zu führen, das als Kluftwasser des verkarsteten Untergrundes bei stärkeren Niederschlägen an die Erdoberfläche gelangte (FEIGE 1983; FISCHBACH 1983). Wie beim lateralen Zwischenabflusses vom oberen zum unteren Hangbereich, bewegt sich das Kluftwasser ebenfalls in den geneigten Schichten des Kalksteins hangabwärts. Im erwähnten Kalksteinuntergrund herrscht ein verzweigtes Kluftsystem aus unzähligen Hohlräumen, die sich bei Niederschlägen schnell mit Wasser füllen können. Sind die Hohlräume gänzlich gefüllt, dann tritt das angefallene Karstwasser entgegen der Schwerkraft, bevorzugt bei hängigem Gelände, über größere Klüfte im Kalkstein aus und führt zur Übersättigung des oberflächennahen Bodens (RITZEL 1972; SAUERLAND 1969). Auf den dränierten Ackerflächen kam es dann zu verstärktem Dränagenfluss. Trotz der in Kapitel 5.2.4.3 beschriebenen Eingrenzung des Einzugsgebietes der Dränagen wirkt sich der Einfluss der hydrologischen Verhältnisse, bedingt durch den geologischen Untergrund, relativ stark aus. Aus diesen Gründen ergibt sich bei der Berechnung von Abfluss- und Frachtsummen von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen kein eindeutiger Flächenbezug. Dennoch sind die Dränagenflüsse als Teil der realen Entwässerung der Feldversuchsfläche anzusehen. Daraus ergab sich eine Betrachtung der im Dränagenfluss auftretenden Stoffkonzentrationen und mit Einschränkung auch der absolut ausgetragenen Mengen an Herbiziden und Nährstoffen.

Hinsichtlich des Austragspotenzials für den schwach sorbierten Wirkstoff Metazachlor unter Winterraps ist ein jeweils höherer Austrag in den pfluglos bestellten Varianten berechnet worden (s. Abb. 31). Die dabei gemessenen Konzentrationen lagen in der Pflugvariante zum Teil höher als die Wirkstoff-Konzentrationen im Oberflächenabfluss. Während jedoch im Oberflächenabfluss noch nach mehr als 30 Tagen nach Applikation Konzentrationen von über 20 µg/l gemessen wurden, konnte im Dränagewasser kein Metazachlor festgestellt werden (vgl. Tab. 24 a und Tab. 38). Bei den aufgetretenen Dränageabflüssen im Winterweizen lagen die Konzentrationen des schwach sorbierten Isoproturons mehr als 140 Tage nach Applikation in allen Varianten unterhalb der Nachweisgrenze im Labor. Hingegen sind nach gleichem Zeitraum noch Isoproturon-Konzentrationen von bis zu 0,9 µg/l im Oberflächenabfluss aufgetreten und zwar vor allem in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. Das mittel bis stark sorbierte Chlortoluron ist im Oberflächenabfluss bis 150 Tage nach Applikation in den Varianten Pflug und Mulchsaat mit kaum veränderten Konzentrationen gemessen worden. Dagegen war nach mehr als 120 Tagen nach Applikationstermin im Dränagenabfluss kein Chlortoluron festgestellt worden. Dies würde bedeuten, dass der Eintragspfad des Oberflächenabflusses gegenüber dem Dränagenabfluss, sowohl für die stark sorbierten als auch für die schwächer sorbierten Wirkstoffe, ein höheres Austragspotenzial hat, unabhängig von den Bearbeitungsvarianten. Aufgrund des viel höheren Abflussvolumens beim Dränagefluss sind die berechneten Frachtsummen an Chlortoluron und Isoproturon wesent-

lich größer im Vergleich zum Austrag mit dem Oberflächenabfluss. Dies gilt aber nicht bei Oberflächenabflussereignissen mit ebenfalls hohem Abflussvolumen bei gleichzeitigem Bodenabtrag, wie es beim Wirkstoff Metazachlor für die Versuchsjahre mit Winterraps der Fall war. Insgesamt gesehen unterschieden sich die analysierten Chlortoluron-Konzentrationen zwischen Oberflächen-, Zwischen- und Drainageabfluss nicht. Ebenso gab es im Gegensatz zu Isoproturon keine Varianten spezifischen Konzentrationsdifferenzen.

Bei der Betrachtung der ausgetragenen Nährstoffe N und P mit dem Drainagewasser zeigte sich im Versuchsjahr 1998 ein höheres Austragspotenzial an gelöstem $\text{NO}_3\text{-N}$ in den Varianten mit pflugloser Bestelltechnik. Im Versuchsjahr 1999/2000 konnte dies nicht beobachtet werden (s. Abb. 32 und Abb. 35). Vor allem im Versuchsjahr mit Winterweizen sind keine Hinweise auf einen deutlich höheren Nährstoffaustrag in den pfluglosen Varianten zu erkennen. Die ermittelten Konzentrationen an $\text{NO}_3\text{-N}$ waren im Vergleich zu denen im Oberflächenabfluss nicht geringer. Der absolute Austrag an $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ war in beiden Versuchsjahren gering, wobei hier die Konzentrationen niedriger im Vergleich zu den Konzentrationen im Oberflächenabfluss waren. Der N-Austrag mit dem Drainagewasser ist höher als der P-Austrag, da P überwiegend partikulär ausgetragen wird (LAMMEL 1990) und daher vermehrt im Oberflächenabfluss und Bodenabtrag gemessen worden ist.

Die Feldversuchsreihe mit den erfassten Drainageabflüssen hat gezeigt, dass der Austrag an Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen über dränierete Ackerflächen von Bedeutung ist. Aus der hydrogeologischen Besonderheit der Versuchsfläche war aber nur mit sehr kurzfristig hohen Drainageabflüssen zu rechnen, die aber oft nach wenigen Tagen und Stunden unterbrochen bzw. gänzlich aufhörten. Die dabei aufgetretenen Herbizid- und Nährstoffkonzentrationen waren zum Teil höher als die im Oberflächenabfluss gemessenen Konzentrationen. Diese Beobachtung deutet auf eine rasche Tiefenverlagerung von Stoffen hin, die in Verbindung mit Starkniederschlägen von einigen Autoren als Hinweis für verstärkten Makroporenfluss gilt (BEISECKER 1994; LENNARTZ und WIDMOSER 1994; KÖRDEL et al. 1997; KANWAR und BAKHSH 2001; JAYNES et al. 2001). Eine solche Tiefenverlagerung von Stoffen ist im Feldversuch in allen Prüfvarianten festgestellt worden.

Die methodischen Schwierigkeiten bei der Festlegung von definierten Einzugsgebieten für dränierete Ackerflächen ließ die Bedeutung dieses Belastungspfades für Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffeinträge in die Oberflächengewässer nicht exakt bemessen. Insbesondere konnte die Bedeutung des Stoffaustrages bei unterschiedlicher Bestelltechnik im Zusammenhang mit verstärktem Makroporenfluss unter pfluglosem Anbau von Feldfrüchten nicht geklärt werden. MICHAELSEN und REXILIUS (1995) halten daher Feldstudien für eine sehr begrenzte Möglichkeit, Stoffausträge

von dränierten Ackerflächen zu quantifizieren. Für den Anspruch einer exakten Quantifizierung der Stoffausträge mit dem Dränagewasser trifft dies wohl zu. Im Hinblick auf die Frage nach auftretenden Stofffrachten und vor allem den dabei gemessenen Konzentrationen können die gewonnenen Daten zumindest Tendenzen über das Verhalten von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen im Dränagewasser von dränierten Ackerflächen aufzeigen.

7.2 Die Bodenbedeckung als entscheidender Faktor für die erosionshemmende Wirksamkeit einer reduzierten Bodenbearbeitung

Der C-Faktor in der nach SCHWERTMANN et al. (1990) auf deutsche Klimaverhältnisse übertragenen Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG), ist insofern von Bedeutung, als dass er durch die Bodenbearbeitungsintensität und die Wahl der Feldfrüchte verändert werden kann. Er kann dabei als verkleinerter Multiplikator in die Abtragungsgleichung eingehen. Zusammen mit dem P-Faktor und mit Einschränkung auch dem L-Faktor kann nur der C-Faktor durch eine bestimmte Bewirtschaftung des Bodens verändert werden kann. Der Nachteil des C-Faktors in der ABAG liegt in der Heranziehung sogenannter Teil-C-Faktoren für bestimmte Kulturen und Fruchtfolgen eines Ackerbaubetriebes. Solchen Teil-C-Faktoren fehlt die Flexibilität hinsichtlich der Bodenbearbeitung in den verschiedenen Kulturen. Zum Beispiel kann ein potenziell hoher C-Faktor einer bestimmten Anbaukultur durch eine bodenschonende Bearbeitung prinzipiell erniedrigt werden. Zur Vermeidung von „On-Site“- und „Off-Site-Schäden“ (s. 3.1.1.1) in der Feldflur durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag bietet ein hoher C-Faktor mit einer möglichst geschlossenen Vegetationsdecke den besten Schutz.

In der eigenen Feldstudie zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades für 3 untersuchte Bearbeitungsvarianten wurde der Versuch unternommen, Ansätze zur Empfehlung des vorsorgenden Bodenschutzes im Hinblick auf Oberflächenabfluss und Bodenabtrag zu finden. Dabei ging es um die Frage des Ausmaßes an realisierter Bodenbedeckung in den Bearbeitungsvarianten und bei welcher prozentualen Bodenbedeckung in den Varianten Pflug, konservierend (Mulchsaat) und Direktsaat registrierte Oberflächenabflüsse auftreten.

Die im Feldversuch bestimmtem Bodenbedeckungsgrade während der Messphasen im Mais, Winterraps und Winterweizen wurden nach der Methode von WINNIGE und FRIELINGHAUS (1998) ermittelt. Es zeigte sich, dass zu Beginn der Messphasen bei allen Kulturen auf der Variante mit Direktsaat die Bodenbedeckung bei 70 % oder höher lag. Auf den beiden anderen Varianten gab es in den Versuchsjahren sehr unterschiedliche Bedeckungsgrade zu Beginn der Messphasen.

Auf der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung konnten Bedeckungsgrade im Mais zwischen 25 und 45 % errechnet werden, während sie im Winterraps zwischen 25 und 60 % schwankten. Beim Winterweizen wurden Bedeckungsgrade von 20 bis etwa 30 % in der Variante mit Mulchsaat ermittelt. Auf der konventionell bearbeiteten Variante hingegen ist im Mais zu Beginn der Messphasen eine Bodenbedeckung von meistens 0 - 2 % erreicht worden. Die Bedeckung lag im Winterraps höher (3 – 10 %) genauso wie im Winterweizen mit 7 bis knapp über 20 % Bedeckungsgrad. Daraus ergab sich die jeweils unterschiedliche Schutzwirkung der Bestelltechniken vor Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. Mit einer Bodenbedeckung von > 70 % während der gesamten Versuchsjahre konnte in allen Kulturen kein registrierter Oberflächenabfluss festgestellt werden, so dass ein 100 %iger Schutz erzielt wurde. Bei konservierender Bodenbearbeitung verringerten sich Oberflächenabfluss und Bodenabtrag zwischen 76 und 100 % im Mais sowie im Winterraps bei einer Bodenbedeckung, die von Beginn der Messphase an bis zum Eintreten des ersten Abflussereignisses zwischen 25 und 60 % lag. Im Winterweizen sind die Verhältnisse etwas anders zu bewerten. Es traten zum Teil Abflussereignisse gleichen Ausmaßes (s. Tab. 42) auf, trotz hoher Bodenbedeckungsgrade auf den Varianten Pflug und Mulchsaat. Sie waren jedoch von sehr geringer Intensität und traten nicht verbunden mit Bodenabtrag auf. Solche „Minimalereignisse“ konnten nur sehr kleinräumig und unmittelbar vor der Ablaufvorrichtung der Versuchsplots auftreten, da ein längerer Transportweg für abgetragenes Bodenmaterial fehlte. Dabei wurde das von der Pflanzendecke ablaufende Niederschlagswasser miterfasst, so dass teilweise die Unterschiede beim registrierten Oberflächenabfluss zwischen der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung und der Pflugvariante sehr gering waren.

Auf die Relief- und Witterungsbedingungen der Versuchsfläche bezogen kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Bodenbedeckung von > 30 % unter Anwendung pflugloser Bestelltechniken mit einem Rückgang von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag von mehr als 70 % auszugehen ist. Die gewonnenen Ergebnisse gleichen denen von FRIELINGHAUS und BORK (1999) nach langjährigen Feldversuchen über das Ausmaß von Oberflächenabflüssen und Bodenabtrag bei unterschiedlicher Bodenbedeckung. Sie schlussfolgerten, dass bei einer Bodenbedeckung zwischen 30 – 50 % eine Reduzierung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag zwischen 70 und 90 % gegeben ist. Sie zeigten weiterhin, dass bei einer Bodenbedeckung > 70 % der Bodenabtrag gegen 0 % tendiert. Ähnliche Ergebnisse erhielten NITZSCHE et al. (2000) bei ihren Feldversuchen mit pflugloser Bestelltechnik. Dagegen behaupten KORSAETH et al. (1997), dass nicht die Bodenbedeckung bei pfluglosem Anbau die entscheidende Schutzwirkung erbringen würde, sondern es käme auf die Mulchauflage selbst an. Daher hätte neben der eigentlichen Anbaukultur auch die Vorfrucht für die Minderung von Oberflächenabfluss, Boden- und Stoffabtrag eine wichtige Funktion. Diese Unterschiede sind während der eigenen Versuche am Haarstrang in Nordrhein-Westfalen nicht beobachtet worden.

Nach der Auswertung von Bodenbedeckungsgraden auf den Bearbeitungsvarianten in Verbindung mit Oberflächenabflussereignissen wurde daher der Versuch unternommen, die bei jeweiliger Anbaukultur und Bestelltechnik erhaltenen Zeiträume mit einer erhöhten Gefahr des Auftretens von niederschlagsbedingtem Oberflächenabfluss auf der Versuchsfläche und damit einhergehenden Austrägen von Bodenmaterial, Herbiziden und Nährstoffen zu ermitteln (vgl. Tab. 43). Bei der Betrachtung des Zeitraumes (Anzahl der Tage) mit hoher Erosionsgefährdung zwischen Aussaat und dem Erreichen eines mittleren Bodenbedeckungsgrades von mindestens 30 % in allen Kulturen, reduzierte sich auf der Feldversuchsfläche die Anzahl der Tage mit hoher potenzieller Gefährdung durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf der Direktsaatvariante gegen 0 Tage. Bei konservierender Bodenbearbeitung musste im Mais und Winterraps mit ca. 30 Tagen hoher Erosionsgefährdung nach Aussaat gerechnet werden. Im Winterraps betrug schon nach ca. 15 Tagen in allen Versuchsjahren die Bodenbedeckung 30 % und mehr, so dass sich der Gefährdungszeitraum auf ca. 2 Wochen reduzierte. Für die Variante mit konventionellem Anbau konnte im Mais und Winterweizen der doppelte Zeitraum gegenüber der Mulchvariante ermittelt werden. Mit 46 Tagen erhöhter Erosionsgefahr im Winterraps war dagegen der dreifache Zeitraum bei konventionellem Anbau zu beachten. Hinsichtlich des in Kapitel 7.1 beschriebenen Zeitfensters häufig auftretender erosiver Starkregen und dem Zeitraum der Aussaat von Winterraps, ist gegenüber der Pflugvariante eine deutlich höhere Schutzwirkung vor Erosionsereignissen bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat zu erreichen.

7.3 Standortspezifisches Verhalten der angewandten Wirkstoffe im Boden

Die Abbaugeschwindigkeit von Herbiziden im Boden wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Hierzu zählen vor allem die physiko-chemischen Eigenschaften der Wirkstoffe und der Verlauf von Temperatur und Feuchte des Bodens (HÄUßLER 1992; HERZEL und SCHMIDT 1988) im Zusammenhang mit der mikrobiellen Aktivität (GEISELHART 1994). Bei verringerter Aktivität der Mikroorganismen erfolgt ein langsamerer Abbau. Im humosen Oberboden ist die Aktivität von Bodenorganismen am größten. Im mineralischen Unterboden schwächt sich diese Aktivität stark ab, so dass der Herbizidabbau ebenfalls abgeschwächt bzw. verlangsamt wird. Der beschleunigte oder verlangsamte Abbau eines Wirkstoffes bestimmt die Persistenz im Boden (KLIMSA 1996; UBA 2000). Mit Hilfe von mathematischen Funktionen (s. auch Kap. 5.2.2) werden Abbaukurven zur Wirkstoff-Persistenz, unter meistens vorgegebenen Bedingungen, entworfen. Die Rückstandsgehalte eines Wirkstoffes im Boden werden dabei bis auf 10 % seiner Ausgangskonzentration bestimmt. Die so erhaltene Persistenz eines Wirkstoffes wird in Tagen nach erfolgter Herbizidapplikation angegeben (HUBER 1998).

Da bei reduzierter Bodenbearbeitung durch pfluglose Bestelltechniken andere Abbaubedingungen wie Bodentemperatur, -feuchte, -luft und organische Substanz im Boden vorherrschen liegt die Vermutung nahe, dass bei gleicher Bodentextur und gleichem Wirkstoff der mikrobielle Abbau sich verändert. Es wird vermutet, dass durch die verringerte Eingriffsintensität bei pflugloser Bestelltechnik wie Mulchsaat oder Direktsaat der Gehalt an organischer Substanz im Boden steigt. Die Aktivität von Mikroorganismen wird dadurch stark erhöht. In Folge dieser Aktivität beschleunigt sich der Herbizidabbau, was die Persistenz der im Boden sich befindenden Wirkstoffe verkürzt (BERGER et al. 1996; DÜRING und HUMMEL 1994). Die erhöhte mikrobielle Aktivität in der oberen Bodenkrume von konservierend bearbeiteten Ackerflächen, insbesondere der Flächen unter Direktsaat, deutet auf günstige Lebensbedingungen im Boden hin. Aufgrund der Bodenruhe unter Direktsaat findet eine ungestörte Vermehrung der Regenwurmpopulationen statt, die eine natürliche Bodenlockerung zur Verbesserung der Bodenstruktur, des Wasser- und Lufthaushaltes und damit der Verfügbarkeit von Nährstoffen bewirken. Innerhalb der Regenwurmgänge herrschen gegenüber der umgebenen Bodenmatrix sehr unterschiedliche Bedingungen vor wie zum Beispiel eine erhöhte Bodentemperatur, eine höhere Konzentration an Nährstoffen und in Folge dessen, eine stark erhöhte biologische Aktivität. Neben den geogenen Makroporen werden solche biogenen Makroporen von BUNDT et al. (2001) als biologische „Hot Spots“ bezeichnet, in denen ein verstärkter Stoffabbau durch die vermehrte Aktivität von Bodenorganismen stattfindet. In den Makroporen durch Sickerwasser eingedrungene Pflanzenschutzmittel unterliegen daher einem verstärkten Abbau und stehen bei vermehrtem Makroporenfluss im Boden größtenteils nicht mehr zur Verfügung.

PÄTZOLD und BRÜMMER (2003) untersuchten den Einfluss mikrobieller Aktivität und Bodenfeuchte auf die Festlegung (Immobilisierung) von Herbiziden in unterschiedlichen Böden. Sie stellten 3 Phasen der Herbizid-Immobilisierung fest und kamen zu dem Schluss, dass bei verringerter mikrobieller Aktivität die Rückstandsgehalte der angewandten Wirkstoffe im Boden sowie ihre Mobilität langsamer abnahmen.

Die Rückstandsgehalte an Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin während der eigenen Untersuchungen im Mais zeigen einen differenzierten Verlauf. In allen Bearbeitungsvarianten liegen die Rückstandsgehalte an Terbuthylazin zu Beginn der Messphasen (1. Tag n. Applikation) niedriger im Vergleich zu Metolachlor und Pendimethalin. Die Begründung liegt in der jeweils höheren Aufwandmenge der beiden Wirkstoffe Metolachlor und Pendimethalin (s. Kap. 6.5.1.1). Innerhalb des 56 Tage dauernden Messzeitraumes wurde in allen Varianten keine lineare Abnahme der 3 Wirkstoffe beobachtet. In den Versuchsjahren 1998 und 1999 erfolgte, auf eine zum Teil mehr als 50 %ige Abnahme des Gehaltes an Metolachlor und Pendimethalin 14 Tage nach Applikationstermin, eine ebenso hohe Zunahme weitere 14 Tage später (vgl. Abb. 40 und Abb. 41). Im Jahr

2001 sind diese Schwankungen etwas weniger stark (s. Abb. 42). Zudem waren die Rückstandsgehalte aller 3 Wirkstoffe im Versuchsjahr 2001 nach 56 Tagen sehr gering im Gegensatz zu den Jahren 1998 und 1999. Es besteht Grund zur Annahme, dass unter den wechselfeuchten Bedingungen im Boden während des Untersuchungszeitraumes zuvor nicht erfasste Wirkstoffrückstände zum späteren Zeitpunkt eindeutig analysiert wurden. In ihren Untersuchungen für die gleichen Wirkstoffe schrieben PÄTZOLD und BRÜMMER (2003) über nicht zu extrahierende Rückstände im Boden bei Trockenheit, die bis zu 40 % der Ausgangsmenge entsprachen. Bei zunehmender Bodenfeuchte gingen die Wirkstoffe wieder in eine extrahierbare Form über und konnten daher stärker analytisch erfasst werden. Die ungleichmäßige Extrahierbarkeit bei wechselfeuchten Bedingungen im Boden scheint bei Metolachlor und Pendimethalin stärker ausgeprägt zu sein als bei Terbutylazin.

Was die variantenspezifischen Unterschiede des Vorkommens an Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin anging, so wurde in der Direktsaatvariante immer eine geringere Anfangskonzentration festgestellt. Weiterhin konnte 56 Tage nach Herbizidapplikation unter Direktsaat ein meistens geringerer Rückstandsgehalt gegenüber den Varianten mit konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung ermittelt werden. Die geringeren Anfangsgehalte der Wirkstoffe im Oberboden (0 – 5 cm) der Variante mit Direktsaat sind höchstwahrscheinlich auf den erhöhten Rückhalt der Wirkstoffe an der Oberfläche der Mulchauflage mit Weizenstroh zurück zu führen. Nach Niederschlägen werden sie aber von der Mulchauflage abgespült und gelangen über das Sickerwasser in den Boden. Dennoch schien der Wirkstoffabbau unter der Direktsaatvariante beschleunigt gewesen zu sein, was DÜRING und HUMMEL (1994) ebenfalls beobachteten.

Das Rapsherbizid Metazachlor schien in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2000 schon ca. 14 Tage nach erfolgter Herbizidanwendung fast vollständig abgebaut zu sein. Auch hier sind die jeweils geringeren Anfangsgehalte in der Direktsaatvariante zu erkennen (s. Abb. 43). Im Jahr 2000 wurden in der Pflugvariante und der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung 28 Tage nach Applikation noch geringe Vorkommen an Metazachlor nachgewiesen. Dieser Nachweis wurde aber in der Pflugvariante mit weniger als 50 % und in der Mulchvariante mit weniger als 90 % der Ausgangsmenge berechnet. Der niedrige K_{oc} -Wert (80 L/kg^{-1}) sowie der geringe Sorptionskoeffizient (UBA 2000) des Metazachlors bewirkte in Verbindung mit günstigen Abbaubedingungen die sehr geringe Persistenz im humosen Oberboden in allen Bearbeitungsvarianten.

Das Vorkommen der Getreideherbizide Chlortoluron und Isoproturon im Versuchsjahr 1999/2000 mit Winterweizen zeigte keine geringeren Anfangskonzentrationen auf der Direktsaatvariante. Die Vorfrucht Winterraps bot eine weniger dichte Mulchauflage zu Beginn der Messphase, so dass nach der Herbizidapplikation eine gleichmäßige Verteilung der Wirkstoffe am Boden erreicht wur-

de. Wie bei Metazachlor nahmen die Rückstandsgehalte bis 14 Tage nach Applikation in allen Varianten stark ab. Dagegen waren auch nach 56 Tagen beim mittelstark sorbierten Chlortoluron noch Rückstandsgehalte in allen Varianten vorhanden. Bei Isoproturon tendierten die Gehalte gegen 0 mg/kg Boden (s. Abb. 44). Der Anstieg der Rückstandskonzentrationen an Chlortoluron am 42. Tag nach erfolgter Herbizidapplikation hängt vermutlich mit der besseren Extrahierbarkeit von mobilem Chlortoluron bei feuchteren Bedingungen im Boden zusammen.

Es bleibt festzuhalten, dass mit Hilfe der untersuchten Bodenproben bis in den oberen 5 cm des Bodens die Tendenz zu einem schnellerem Wirkstoffabbau in der Direktsaatvariante bei den untersuchten Wirkstoffen Metazachlor, Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin festzustellen war. Für die Getreideherbizide Chlortoluron und Isoproturon trifft dies zumindest bei Herbstapplikation nicht zu. Möglicherweise sind bei Frühjahrsapplikation von Chlortoluron und Isoproturon höhere Bodentemperaturen für einen beschleunigten Abbau unter Ackerflächen mit Direktsaat günstiger. Unter wechselfeuchten Bedingungen im Boden können vor allem die stärker sorbierten Stoffe unterschiedlich stark extrahierbar sein (s. PÄTZOLD und BRÜMMER 2003), so dass sie während des eigenen Feldversuches auch bei mehr als 50 Tagen nach Applikation im Oberflächenabfluss mit teilweise hohen Konzentrationen zu finden waren. Das schwach sorbierte Herbizid Isoproturon (HAIDER und AUERSWALD 1997) konnte jedoch auch nach mehr als 150 Tagen im Oberflächenabfluss nachgewiesen werden. Metazachlor verhielt sich dem K_{oc} -Wert entsprechend und wies eine geringe Persistenz im Boden auf. Die Wirkstoffanteile im Runoff-Sediment für Metolachlor und Terbutylazin stiegen gegen Ende der Messphasen deutlich an, was auf die im Verlauf des Abbaues stärkere abiotische Festlegung an Bodenkolloide zurück zu führen war (PÄTZOLD und BRÜMMER 2003).

Die eigene Untersuchung zur Persistenz der eingesetzten Wirkstoffe zeigte ähnliche Tendenzen wie in den umfangreicheren Versuchen von HÄUßLER (1992), BERGER et al. (1996), DÜRING (1996) sowie PÄTZOLD und BRÜMMER (2003). Das heißt, dass in Böden unter Anwendung von Bestelltechniken ohne Bodenbearbeitung die Persistenz von Herbiziden verkürzt wird. Stellten DÜRING und HUMMEL (1994) auch in konservierend bearbeiteten Ackerflächen die Tendenz zu schnellerem Herbizidabbau fest, so sind während der eigenen Feldversuche kaum Unterschiede in den Rückstandsgehalten von Wirkstoffen zwischen der konventionellen Variante und der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung festgestellt worden. Nur in der Direktsaatvariante wurde ein deutlich schnellerer Rückgang beobachtet, mit Ausnahme des Abbaues von Chlortoluron und Isoproturon während der Versuche mit Winterweizen nach Herbstapplikation.

7.4 Abschließende Betrachtung und Ausblick

Nach 5 jähriger Feldstudie über das Ausmaß von Oberflächenabflussereignissen bei 3 verschiedenen Bestelltechniken kann insgesamt festgehalten werden, dass die Herbizid- und Nährstoffausträge einzelner Versuchsjahre sich in allen Varianten auf niedrigem Niveau bewegten. Auf den pfluglosen Bearbeitungsvarianten konnte das Ausmaß an Oberflächenabflüssen, Boden- und Stoffausträgen insgesamt und während Einzelereignissen zwischen 60 und 100 % reduziert werden. Trotz des im Vergleich zu anderen Feldstudien eher geringen Verlustes an Herbiziden und Nährstoffen, traten bei der Betrachtung von einzelnen Ereignissen hohe Konzentrationen im Abflusswasser auf. Dabei gab es zwischen der konventionellen Bearbeitungsvariante und der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung keine signifikanten Konzentrationsunterschiede. Ohne registrierten Oberflächenabfluss in 5 Jahren blieb die Variante mit Direktsaat, was hinsichtlich der Minderungswirkung von Boden- und Stoffaustrag nicht weiter kommentiert werden muss.

Das Austragsniveau von Bodenmaterial durch Oberflächenabfluss auf der konventionell bearbeiteten Variante muss hingegen in den Anbaukulturen Mais und Winterraps als nicht tolerabel bezeichnet werden. Die ohnehin schon kritisch zu bewertenden Toleranzgrenzen nach der ABAG wurden mit 3,1 t/ha/a (Winterraps) knapp überschritten. Die hohen Tongehalte im Oberboden des auf der Feldversuchsfläche vorherrschenden Bodentyps hatten keine deutlich mindernde Wirkung gegen Verschlammung und Bodenabtrag auf der Pflugvariante. Möglicherweise bedürfen die K-Faktoren für tonige Böden einer Korrektur. Es gilt den Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffaustrag durch pfluglose Bestelltechniken zu verringern. Nicht minder wichtig aber ist der Schutz der Böden vor Abtrag durch Wasser und Wind, da der Vorgang der Bodenerosion irreversibel ist und im Extremfall zum Totalverlust fruchtbarer Ackerböden führen kann. Auf lange Sicht wird der wirtschaftliche Schaden des Bodenabtrages größer sein als ein relativer Austrag von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen, der weniger als 1 % der applizierten Mengen betragen hat. Bei mittleren Hangneigungsverhältnissen, wie sie auf der Feldversuchsfläche vorzufinden waren, kann von einem geringen Gesamtverlust an Herbiziden und Nährstoffen gesprochen werden. Wichtiger erscheint die Betrachtung der Stoffkonzentrationen im Abflusswasser und -sediment während eines Abflussereignisses. Hier besteht die Gefahr einer Belastung der Oberflächengewässer, wenn bis zum erfolgten Gewässereintrag von Stoffen keine Verdünnungseffekte eintreten. Vor diesem Hintergrund kommt der konservierenden Bodenbearbeitung sowie der Direktsaat aufgrund ihrer gegenüber konventionell bearbeiteten Ackerflächen hohen Minderungswirkung vor Boden- und Stoffaustrag eine große Bedeutung zu. Die Feldstudie hat gezeigt, dass pfluglose Bestelltechniken im Ackerbau durch ihren flächenhaften Strategieansatz das Ausmaß an sogenannten „On-Site“-Schäden auf ein Minimum reduzieren können. Infolgedessen können „Off-Site“-Schäden gänzlich verhindert werden bzw. reduzieren sich auf ein sehr geringes Maß.

In der vorliegenden Untersuchung konnte die Bedeutung der diffusen Eintragspfade Zwischenabfluss und Dränageabfluss für den Gewässereintrag von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen von ackerbaulich genutzten Flächen bei unterschiedlicher Bestelltechnik nicht vollständig geklärt werden. Neben den Ergebnissen zum Oberflächenabfluss erlauben die gewonnenen Ergebnisse zum Zwischenabfluss und Dränageabfluss dennoch einige Schlussfolgerungen für die Forschungsarbeit.

Die Frage, ob sich auf pfluglos bearbeiteten Ackerflächen das Problem des Stoffaustrages auf die Pfade des Zwischenabflusses und Dränageabflusses verlagert, kann weder ganz verneint noch bejaht werden. Die Ergebnisse des Feldversuches hinsichtlich der Bedeutung dieser beiden Austragspfade lassen keine eindeutigen Schlüsse zu. Während der Versuchsjahre traten sowohl höhere Abfluss- und Stoffmengen in der Pflugvariante als auch in den Varianten ohne Pflugeinsatz auf. Die Voraussetzungen für zeitweise verstärkten Makroporenfluss, nämlich das Vorhandensein hydraulisch wirksamer geogener sowie biogener Makroporen im Boden, war in allen Varianten der untersuchten Anbaukulturen gegeben. Das zeigen die bei Niederschlagsereignissen kurzfristig hohen Herbizid- und Nährstoffkonzentrationen im Zwischenabfluss und Dränagewasser in allen Varianten. Zur Klärung des Problems fehlten weitere Versuchsjahre zur Registrierung von unterirdischen Abflüssen des Niederschlagswassers. Als kritisch für eine Beantwortung dieser Frage zu bewerten ist der methodische Ansatz des Erfassens von Zwischenabflüssen und Dränageabflüssen im Feldmaßstab. Es galt eine Balance zwischen Materialaufwand und Nutzen der Erfassung solcher Eintragspfade für Stoffe in Oberflächengewässer zu finden. Dabei musste festgestellt werden, dass eine solche Balance nur mit Einschränkung möglich ist. Eine flächenhafte Quantifizierung von Stoffen über den Pfad des Zwischenabflusses lässt sich nur mit genau definierten Einzugsgebieten von im Boden freibeweglichem Wasser vornehmen. Dazu wären aufwendige Lysimeteranlagen oder zahlreiche Messungen von Sickerwasserbewegungen im Boden mittels TDR-Sonden notwendig, um gesicherte Aussagen über das Verhalten von unterirdischen Abflüssen und damit einhergehenden Stoffausträgen zu erhalten. Ähnliches gilt für dränierter Ackerflächen, für die kein gesichertes Wassereinzugsgebiet bestimmt werden kann. Hier bedarf es weiterer Feldstudien unter natürlichen Witterungsbedingungen oder einer analytischen Herangehensweise mit Hilfe von Laborversuchen und nachfolgender Modellberechnung für Gewässereinzugsgebiete.

Die auf den unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten in jeder Anbaukultur ermittelten aktuellen Bodenbedeckungsgrade ermöglichten die Erkennung kritischer Zeitfenster für erhöhten Oberflächenabfluss in jeder Kultur nach erfolgter Aussaat. Die Zeitfenster ergaben sich nach der Festlegung, dass in jeder Bearbeitungsvariante mindestens 30 % Bodenbedeckung nach der Aussaat vorhanden sein sollten. Nach den erzielten Ergebnissen war mit potenziell hohen Abflüssen, ver-

bunden mit Boden- und Stoffausträgen, vor allem im Sommerhalbjahr zur Aussaat von Mais und Winterraps zu rechnen. Die Ergebnisse führten zu dem Schluss, dass sich die erwähnten Zeitfenster (Tage nach Aussaat) erhöhter Erosionsgefahr nach der Aussaat auf der Pflugvariante durch konservierende Bodenbearbeitung halbieren ließen. Auf der Variante mit Direktsaat gab es keinen Tag nach Aussaat von Mais, Winterraps oder Winterweizen mit erhöhter Erosionsgefahr.

Bei Betrachtung der Persistenz von im Feldversuch eingesetzten Herbiziden im humosen Oberboden der 3 untersuchten Bearbeitungsvarianten zeigte sich in den Rückstandsgehalten auf der Direktsaatvariante für die im Mais und Winterraps applizierten Wirkstoffe Metazachlor, Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin ein schnellerer Rückgang als in den Varianten mit Mulchsaat oder Pflugeinsatz. Der Grund für einen schnelleren Wirkstoffabbau liegt in der erhöhten biologischen Aktivität von Bodenorganismen unter Direktsaat. Die Organismen werden durch die geringere Eingriffsintensität nicht dezimiert und beschleunigen den biologischen Abbau von Pflanzenschutzmitteln im Boden. Aufgrund dieses verstärkten Abbaues im Boden werden Herbizide einem vermehrten Zwischenabfluss über schnell dränende Makroporen in pfluglosen Bestelltechniken nicht mehr oder nur in geringen Konzentrationen zu Verfügung stehen. In der Direktsaatvariante waren die Rückstandsgehalte am 1. Tag nach Applikation stets geringer als in den beiden anderen Varianten. Das ist vermutlich auf den Verbleib der Wirkstoffsubstanzen an der Blatt- und Halmoberfläche des Weizenstrohmulches zurück zu führen.

Auf ackerbaulich genutzten Flächen vermindern pfluglose Bestelltechniken wie die konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat die Boden- und Stoffausträge bei Oberflächenabflussereignissen um 60 % bis annähernd 100 % gegenüber der konventionellen Bestelltechnik mit dem Pflug. Konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat führt weder zu erhöhten Stoffkonzentrationen im Oberflächen-, Zwischen- und Dränageabfluss noch zu generell vermehrten Stoffausträgen über die Pfade des Zwischen- und Dränageabflusses. Des Weiteren ist unter Ackerflächen mit Direktsaat eine geringere Persistenz von angewandten Wirkstoffen im Boden zu erwarten. Pfluglose Bestelltechniken leisten einen Beitrag zur Erhaltung und Verbesserung der Gewässerqualität und zum Bodenschutz in Gebieten mit potenziell erhöhter Belastung durch landwirtschaftlich eingesetzte Pflanzenschutz- und Düngemittel.

8 Zusammenfassung

Um die Entwicklung von Strategien zur Minderung von Stoffeinträgen in die Oberflächengewässer voranzutreiben, ist es notwendig, die Eintragspfade zu lokalisieren und zu quantifizieren (BACH u. FREDE 2003). Vor allem bei den nur schwer zu erfassenden diffusen Quellen von ackerbaulich genutzten Flächen geben Feldversuchsreihen unter natürlichen Bedingungen Aufschluss über die tatsächliche Bedeutung dieser Belastungspfade. Insbesondere pfluglose Bestelltechniken wie die konservierende Bodenbearbeitung oder das Direktsaatverfahren lassen Effekte zur Minimierung des Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffeintrages in die Oberflächengewässer erwarten. In den Jahren 1997 bis 2002 wurde dazu auf einem erosionsgefährdeten Ackerstandort in Nordrhein-Westfalen eine Feldstudie zum Austrag von Herbiziden und Nährstoffen durch Oberflächenabfluss (Runoff), Zwischenabfluss und Dränageabfluss mit 3 Bodenbearbeitungsvarianten (Pflug, Mulch, Direktsaat) in 3 verschiedenen Kulturen (Mais, Winterraps, Winterweizen) unter natürlichen Niederschlagsbedingungen durchgeführt. Die dabei ausgetragenen Mengen an Bodenmaterial, Herbiziden und Nährstoffen wurden quantifiziert und eine Bewertung der Bearbeitungsvarianten hinsichtlich ihrer Anfälligkeit für Oberflächenabfluss und Stoffverlagerung vorgenommen.

Die Ergebnisse der mehrjährigen Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Die Oberflächenabflüsse betrugen auf der Pflugvariante im Mais, Winterraps und Winterweizen zwischen $0,15 - 2,5 \text{ mm/m}^2$, entsprechend $0,05 - 1,6 \%$ des gefallenen Niederschlages während der Messphasen in den untersuchten Kulturen. Bei Einzelereignissen sind bis zu 8% des gefallenen Niederschlages auf der Pflugvariante abgeflossen.
- ▶ Durch die konservierende Bodenbearbeitung (Mulchsaat) konnte sowohl eine Reduzierung des Oberflächenabflusses als auch des Boden- und Stoffabtrages um 60 und 100% erreicht werden.
- ▶ Auf der Prüfvariante „Direktsaat“ trat in allen fünf Versuchsjahren kein nachgewiesener Oberflächenabfluss auf.
- ▶ Auf der Pflugvariante betrug der maximale Bodenabtrag bis zu 3 t/ha/a im Winterraps (Jahr 2000) und bis zu $1,3 \text{ t/ha/a}$ (Jahr 2001) im Mais. Auf der Parzelle mit Winterraps im Versuchsjahr 2000 wurde der tolerable Bodenabtrag nach der „Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung“ knapp überschritten. Der Bodenabtrag im Winterweizen betrug dagegen im gleichen Versuchsjahr weniger als $0,01 \text{ t/ha/a}$.

- ▶ Im Zwischen- und Dränageabfluss konnten keine Sedimentfrachten während aller fünf Versuchsjahre nachgewiesen werden.
- ▶ In der Pflugvariante wurden im Mais Austräge der herbiziden Wirkstoffe Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin im Runoff bis zu 0,15 % (Terbutylazin) der applizierten Ausgangsmenge ermittelt, entsprechend einer Frachtsumme von ca. 1,5 g/ha/a. Der Runoff-Austrag des Rapsherbizides Metazachlor betrug bis zu 1,15 g/ha/a (= 0,15 % der Applikationsmenge). Die Getreideherbizide Chlortoluron und Isoproturon wurden im Runoff-Austrag bis zu 0,01 g/ha/a ermittelt, entsprechend < 0,001 bis 0,001 % der applizierten Wirkstoffmenge.
- ▶ Die maximalen Herbizidkonzentrationen im Runoff-Wasser der Maisparzelle lagen bei 98 µg/l (Terbutylazin) und im Runoff-Sediment bei 950 µg/kg (Pendimethalin). Ähnlich hohe Konzentrationen (96 µg/l) traten beim Rapsherbizid Metazachlor im Dränagewasser auf. Maximale Chlortoluron- und Isoproturon-Konzentrationen im Zwischen- und Dränageabfluss lagen bei 1 – 8 µg/l.
- ▶ Die Herbizidanteile im Runoff-Wasser schwankten bei den Maisherbiziden zwischen 4 % (Pendimethalin) und 96 % (Terbutylazin). Im Winterraps wurden durchschnittlich 80 % der Herbizidanteile im Runoff-Wasser gefunden.
- ▶ Die Austräge an N und P im Oberflächenabfluss betrugen zwischen 0,005 bis 0,4 kg/ha/a.
- ▶ Die absoluten N- und P-Frachten betrugen im Zwischen- und Dränageabfluss zwischen 0 – 30 g.
- ▶ Die Konzentrationen an gelöstem N und P lagen in allen Abflusspfaden (Oberflächen-, Zwischen- und Dränageabfluss zwischen 0 – 37 mg/l.
- ▶ Auf der Direktsaatvariante mit hoher Bodenbedeckung verringerte sich im Zeitraum von 60 Tagen nach der Applikation die Persistenz der in den Feldstudien eingesetzten Herbizide im Oberboden. Persistenzunterschiede zwischen Pflug- und Mulchsaatvariante konnten nicht festgestellt werden.
- ▶ Im Oberflächenabfluss wurden Konzentrationen an sedimentgebundenem N und P zwischen 0,5 und 3 g/kg Sediment festgestellt.

- ▶ Zwischen den Bearbeitungsvarianten Pflug, Mulch und Direktsaat bestanden keine signifikanten Konzentrationsunterschiede der eingesetzten Herbizide und Nährstoffe im Oberflächen-, Zwischen- und Drainageabfluss.
- ▶ Auf der Direktsaatvariante konnte in keinem Versuchsjahr eine erhöhte Erosionsgefährdung nach der Aussaat von Mais, Winterraps und Winterweizen festgestellt werden. Der Bodenbedeckungsgrad lag immer > 70 %.
- ▶ Bei der Verfahrensweise der konservierenden Bodenbearbeitung (Mulchsaat) ergaben sich bis ca. 30 Tage nach der Aussaat von Mais, Winterraps und Winterweizen erhöhte potenzielle Erosionsgefahren.
- ▶ Bei der Verfahrensweise der konventionellen Bestelltechnik mit dem Pflug ergaben sich bis ca. 60 Tage nach Aussaat von Mais, Winterraps und Winterweizen hohe potenzielle Erosionsgefährdungen.

9 Literatur

- ABDANK, H.; ZIMMERLING, B.; STEINIGER, M. u. R. MEIßNER (1999): Präferentielle Fließwege - Ursache für schnellen Stoffeintrag im Festgesteinsbereich der Unterharz-Plateauflächen. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 91, Heft 2, S. 731 - 734.
- AKKAN, Z., FLAIG, H. und BALLSCHMITER, K.-H. (2003): Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel in der Umwelt. Emissionen, Immissionen und ihre human- und ökotoxikologische Bewertung. Berlin.
- ANDREINI, M. S. and STEENHUIS, T. S. (1990): Preferential paths of flow under conventional and conservation tillage. In: Geoderma, Vol. 46, p. 85 - 102.
- ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE, (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). Hannover.
- ARNOLD, H. (1965): Einige gesteinsphysikalische Daten vom Hottenstein. In: Decheniana, Bd. 118, Heft 1.
- AUERSWALD, K., NILL, E. und U. SCHWERTMANN (1991): Verwitterung und Bodenbildung als Kriterien des tolerierbaren Bodenabtrages. In: Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch, Nr. 68, S. 609 - 627.
- AUERSWALD, K. (1993): Realisierung durch die Landwirtschaft - Gewässerschutz durch Bodenschutz. = Schriftenreihe Agrarspectrum, Bd. 21, S. 150 - 160.
- AUERSWALD, K. & J. HAIDER (1992): Eintrag von Agrochemikalien in Oberflächengewässer durch Bodenerosion. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, Nr. 33, S. 222 - 229.
- BACH, M. (1996): Diffuse Stoffeinträge in Fließgewässer in Deutschland. In: Vom Wasser, Nr. 87, S. 1 - 13.
- BACH, M. (1997): PSM-Emissionen aus Hofabläufen - Größenordnung und Einflussfaktoren. = UBA-Texte, Nr. 87, S. 55 - 64.
- BACH, M. u. FREDE, H.-G. (2003): Pflanzenschutzmittel in Gewässern - Ansätze zur Feststellung signifikanter Belastungen nach WRRL. In: Wasser & Boden, Nr. 55/1 + 2, S. 36 - 42.
- BAKHSH, A.; KANWAR, R. S.; JAYNES, D. B.; COLVIN, T. S. a. L. R. AHUJA (2001): Preferential flow effects on NO₃-N losses with tile flow. In: American Society of Agrcultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 41 - 44.
- BARTH, H.-K. (1992): Bodenerosion im Bereich der Paderborner Hochfläche. Universität zu Paderborn, FB 1-Geographie.
- BARTH, H.-K. u. SCHWARZE, H. (1999): Winterregen und Bodenerosion - Dokumentation eines Extrem-Ereignisses im Herbst 1998 im Paderborner Land. In: Die Warte, Nr. 102, S. 9 - 13.
- BECHER, H.-H. (1985): Mögliche Auswirkungen einer schnellen Wasserbewegung in Böden mit Makroporen auf den Stofftransport. In: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 136, S. 303 - 309.

- BEISECKER, R. (1994): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löss- und eines Sandbodens. = Bodenökologie und Bodengenese, Bd. 12.
- BENGTSON, R. L.; CARTER, C. E.; MORRIS, H. F. u. S. A. BARTKIEWICZ (1988): The influence of subsurface drainage practices on nitrogen and phosphorus losses in a warm, humid climate. In: Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 31, p. 729 - 734.
- BERGER, B. u. HEITEFUß (1990): Abbauverhalten von Isoproturon im Boden unter den Bedingungen einer Nachauflauf-Winter-Behandlung von Getreide. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XII, S. 399 - 407.
- BERGER, B.; BERND, T.; MENNE, H. J.; HACKFELD, U. a. C. SIEBERT (1996): Effects of crop management on the fate of three herbicides in soil. In: Journal of Agriculture and Food Chemistry, Vol. 44 (7), p. 1900 - 1905.
- BERGSTROM, L.; JARVIS, N.; LARSSON, M.; DJODJIC, F. a. A. SHIRMOHAMMADI (2001): Factors affecting the significance of macropore flow for leaching of agrochemicals. In: American Society of Agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 25 - 28.
- BEVEN, K. u. GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. In: Water Resources Research, Vol. 18, p. 1311 - 1325.
- BISCHOFF, W.-A. und KAUPENJOHANN, M. (1998): Passivsammler als neue Methode zur in situ Bestimmung von Pestizidversickerung. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, S. 779 - 786.
- BISCHOFF, W.-A.; SIEMENS, J. u. M. KAUPENJOHANN (1999): Stoffeintrag ins Grundwasser - Feldmethodenvergleich unter Berücksichtigung von preferential flow. In: Wasser & Boden, Nr. 51/12, S. 37 - 42.
- BLAIR, A. M.; MARTIN, T. D.; WALKER, A. u. S. J. WELCH (1990): Measurement and prediction of isoproturon movement and persistence in three soils. In: Crop Protection, Vol. 9, p. 289 - 294.
- BMU (2002): s. BUNDESUMWELTMINISTERIUM
- BMVEL (2001): SIEHE BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ
- BÖRGER, R. M. u. POLL, K. G. (1998): Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel in Grund- und Quellwässern eines verkarsteten Kluftaquifers. In: Grundwasser, Nr. 1, S. 14 - 21.
- BORK, H. R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. = Landschafts-genese und Landschaftsökologie, Heft 13.
- BORK, H. R. (1989): Does soil formation compensate soil erosion? In: Landschafts-genese und Landschaftsökologie, Nr. 16, S. 165 - 168.
- BOTSCHEK, J., GRUNERT, J., SKOWRONEK, A. (1994): Bodenerosion in Nordrhein-Westfalen - Voraussetzungen, Prozesse und Schutzmaßnahmen. In: Berichte zur deutschen Landeskunde, Nr. 68, S. 33 - 56.

- BOTSCHKE, J.; SAUERBORN, P.; SKOWRONEK, A. u. R. WOLFF (1997): Tolerierbarer Bodenabtrag und Bodenneubildung -Konzepte und Perspektiven-. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 83, S. 87 - 90.
- BOTSCHKE, J. (1999): Zum Bodenerosionspotential von Oberflächen- und Zwischenabfluss. = Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Bd. 29. Institut für Bodenkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- BOUMA, J. (1991): Influence of soil macroporosity on environmental quality. In: Advances in Agronomy, Vol. 46, p. 1 - 37.
- BRUNOTTE, J.; WINNIGE, B.; FRIELINGHAUS, M. u. C. SOMMER (1999): Der Bodenbedeckungsgrad - Schlüssel für gute fachliche Praxis im Hinblick auf das Problem Bodenabtrag in der pflanzlichen Produktion. In: Bodenschutz, Nr. 2/1999, S. 57 - 61.
- BUCHNER, W. (1994): Pflügen, Begrünen, Mulchen. In: Landwirtschaftliche Zeitschrift Rheinland, Nr. 26, S. 8 - 9.
- BUCHNER, W. (2000): Erosion dauerhaft abwehren. In: Mais, Nr. 4, S. 144 - 148.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL, Hrsg.) 2001: Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion.
- BUNDESUMWELTMINISTERIUM (BMU, Hrsg.) 2002: Trinkwasserverordnung in Deutschland. Berlin.
- BUNDT, M.; WIDMER, F.; PESARO, M.; ZEYER, J. a. P. BLASER (2001): Preferential flow-paths: Biological 'Hot Spots' in soils. In: American Society of Agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 33 - 36.
- BURGOA, B. u. WAUCHOPE, R. D. (1995): Pesticides in runoff and surface waters. In: ROBERTS, T. R. u. KEARNEY, P. C (Hrsg.) 1995: Environmental behaviour of agrochemicals, p. 221 - 255.
- DARBOUX, F. and HUANG, C. (2001): Contrasting effects of surface roughness on erosion and runoff. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p.143 - 146.
- DE MOL, F. (1996): Bodenwasserbewegung und Bodenstruktur im Makroporenbereich. Dissertation an der Georg-August-Universität zu Göttingen.
- DE MOL, F., STEINMANN, H.-H. u. B. GEROWITT (2000): Verfahren der Risikoabschätzung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes und ihre Anwendung - I. Die Verfahren EEP und IPEST.
- DEUMLICH, D.; THIÈRE, J. u. L. VÖLKER (1997): Vergleich zweier Methoden zur Beurteilung der Wassererosionsgefährdung von Wassereinzugsgebieten. In: Wasser & Boden, Nr. 5, S. 46 - 51.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD, Hrsg.) 1989: Klimaatlas von Nordrhein-Westfalen.

- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD, Hrsg.) 1997: Niederschlagsdaten für die Klimastation Rütten in Nordrhein-Westfalen. Wetteramt Essen.
- DIXON, R. M. and CARR, A. B. (2001): Preferential flow control: Key to sustainable land-management. In: American Society of Agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 287 - 289.
- DJODJIC, F.; BERGSTRÖM, L. a. B. ULÉN (2001): Are tillage practices and incorporation of phosphorous fertilizers ways to reduce phosphorous losses caused by preferential flow ? In: American Society of Agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 161 - 164.
- DOMROESE, J.; MICHALSKI, B.; MARKARD, C. u. G. KLETT (2001): Pflanzenschutzmittel im Grundwasser. In: Wasser & Boden, Bd. 53/10, S. 35 - 38.
- DOMSCH, K. -H. (1992): Pestizide im Boden - Mikrobieller Abbau und Nebenwirkungen auf Mikroorganismen. Weinheim.
- DUNNE, T. (1978): Field studies of hillslope flow processes. In: Kirkby, M. -J. (Hrsg.) 1978: Hill-slope Hydrology, p. 227 - 293. Chichester, U.K.
- DÜRING, R. A. u. HUMMEL, H. E. (1994): Der Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf das Verhalten ausgewählter Herbizide im Boden. In: TEBRÜGGE . F. und DREIER, M. (Hrsg.) 1994: Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristigen Auswirkungen auf den Boden, S. 65 - 79.
- DÜRING, R. A. u. HUMMEL, H. E. (1995): Zur Dynamik von Herbiziden in differenziert bearbeiteten Böden. Abschlussbericht zum EU-Forschungsprojekt "Soil and Water Quality as Affected by Agrochemicals Under Different Tillage Systems". Justus-Liebig-Universität zu Gießen.
- DÜRING, R. A. (1996): Beiträge zum Verhalten ausgewählter Herbizide und einiger ihrer Metaboliten in differenziert bearbeiteten Böden. = Boden und Landschaft, Bd. 9. Justus-Liebig-Universität zu Gießen.
- ECAF (1999): Siehe EUROPEAN CONSERVATION AGRICULTURE FEDERATION
- EDWARDS, W. M.; SHIPITALO, M. J.; DICK, W. A. a. L. B. OWENS (1992): Rainfall intensity affects transport of water and chemicals through macropores in no-till soil. In: Soil Science Society American Journal, Vol. 56, p. 52 - 58.
- ELHAUS, D. (2001): Abschätzung der Erosions- und Verschlammungsgefährdung von landwirtschaftlichen Flächen in Nordrhein-Westfalen. Vortragsskript des Workshops 1: "Modelle der Nah- und Fernfassung" am 12. März 2001. Veranstaltung des Landesamtes f. Wasserwirtschaft Rheinland Pfalz im Rahmen d. Projektes IRMA II: "Schonende Bewirtschaftung von sensiblen Niederschlagsflächen und Bachauen.
- ERLACH, F. (1995): Erosionsstatus und Prognose des Bodenabtrages durch Wasser in einem kleinen Teileinzugsgebiet der Pöppelsche am Haarstrang bei Rütten, Kreis Soest. Diplomarbeit. Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- ERPENBECK, C. (1987): Über Stoffaustrag mit dem Oberflächen- und Zwischenabfluss von landwirtschaftlichen Flächen verschiedener Nutzungsweise - ein Beitrag zur Klärung der Gewässerbelastung in Mittelgebirgslagen. Dissertation an der Justus-Liebig-Universität zu Gießen.

- EUROPEAN CONSERVATION AGRICULTURE FEDERATION (ECAAF) u. GESELLSCHAFT FÜR KONSERVIERENDE BODENBEARBEITUNG (GKB) e. V. (Hrsg.) 1999: Konservierende Bodenbearbeitung in Europa: Umweltrelevante, ökonomische und EU politische Perspektiven.
- ESTLER, M.; BAUR, A. u. D. SCHMIDT (1995): Technik der Bodenbearbeitung. = AID-Schriftenreihe, Heft 1026.
- ESTLER, M.; UPPENKAMP, N. u. H.-H. VOSSHENRICH (2000): Technische Voraussetzungen der Pflanzenproduktion. In: LÜTKE ENTRUP, N. u. OEHMICHEN, J. (Hrsg.) 2000: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Bd. 2: Kulturpflanzen, S. 46 - 149.
- EVERDING, C.; KEHL, M.; BOTSCHKEK, J. u. A. SKOWRONEK (1994): Erosionsgefährdete Böden in Nordrhein-Westfalen - I. Feldberechnungen. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 74, S. 89 - 92.
- EVERDING, C.; KEHL, M.; BOTSCHKEK, J. u. A. SKOWRONEK (1994): Erosionsgefährdete Böden in Nordrhein-Westfalen - II. Laboruntersuchungen. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 74, S. 111 - 114.
- EVERDING, C.; KEHL, M.; BOTSCHKEK, J. u. A. SKOWRONEK (1996): Erosionsstatus, Erosionsverhalten und Erosionsanfälligkeit verschieden texturierter Ackerböden Nordrhein-Westfalens. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 79, S. 371 - 374.
- FABIS, J.; BACH, M.; FREDE, H.-G. (1994): Einfluss von Uferstreifen auf den Nährstoffaustrag in Gewässer des Mittelgebirgsraumes. In: Wasserwirtschaft, Nr. 84, S. 328 - 333.
- FAWCETT, R. S., CHRISTENSEN, B. R., TIERNEY, D. P. (1994): The impact of conservation tillage on pesticide runoff into surface water: A review and analysis. In: Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 49, p. 126 - 135.
- FEIGE, W. (1983): Wassermangel und zentrale Wasserversorgung, Hochwässer und Hochwasserschutz auf der Paderborner Hochfläche und dem östlichen Haarstrang. = Karst und Höhle 1982/83, S. 175 - 194.
- FELDWISCH, N. u. FREDE, H.-G. (1995): Maßnahmen zum verstärkten Gewässerschutz im Verursacherbereich Landwirtschaft. = DVWK-Materialien, Nr. 2/1995.
- FERGUSON, R. I. (1986): River loads underestimated by rating curves. In: Water Resources Research, Vol. 22, N 1, p. 74 - 76.
- FIP (1998): Siehe FÖRDERGEMEINSCHAFT INTEGRIERTER PFLANZENBAU
- FISCHBACH, P. (1983): Die Wasserverhältnisse am Haarstrang zwischen Soest und Salzkotten (Westfalen, NW-Deutschland) - Ausdruck der Verkarstung des Untergrundes. = Karst und Höhle 1982/83, S. 195 - 203.
- FISCHER, P.; BURHENNE, J.; BACH, M.; SPITELLER, M. u. H. G. FREDE (1996): Quantifizierung der Eintragspfade für Pflanzenschutzmittel in ein kleines Fließgewässer. In: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, Nr. 48, S. 121 - 125.
- FISCHER, P.; HARTMANN, H.; BACH, M.; BURHENNE, J.; FREDE H. G. u. M. SPITELLER (1998a): Gewässerbelastung durch Pflanzenschutzmittel in drei Einzugsgebieten. In: Gesunde Pflanzen, Heft 5, S. 142 - 147.

- FISCHER, P.; HARTMANN, H.; BACH, M.; BURHENNE, J.; FREDE H. G. u. M. SPI-TELLER (1998b): Reduktion des Gewässereintrags von Pflanzenschutzmitteln aus Punktquellen durch Beratung. In: Gesunde Pflanzen, Heft 5, S. 148 - 152.
- FLEIGE, H.; HORN, R. u. M. WEIßBACH (1999): Bodenerosion in Fahrspuren und mögliche Erosionsschutzmaßnahmen. In: Wasser & Boden, Nr. 51/12, S. 33 - 36.
- FLÜHLER, H.; URSINO, N.; BUNDT, M.; ZIMMERMANN, U. a. C. STAMM (2001): The preferential flow syndrom - A buzzword or a scientific problem. In: American Society of Agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 21 - 24.
- FÖRDERGEMEINSCHAFT INTEGRIERTER PFLANZENBAU (Hrsg.) 1998: Zukunftsfähige Landwirtschaft = Integrierter Pflanzenbau, Bd. 14/1998.
- FOHRER, N. (1995): Auswirkungen von Bodenfeuchte, Bodenart und Oberflächenbeschaffenheit auf Prozesse der Flächenerosion durch Wasser. Dissertation am Institut für Ökologie der Technischen Universität zu Berlin.
- FOSS GMBH (Hrsg.) 1994: Tecator Application Note Nr. ASN 143-01/90. Hamburg.
- FOSS GMBH (Hrsg.) 1998: Tecator Application Note Nr. ASN 5460. Hamburg.
- FRICK, H.; HAIDER, J. u. I. MÜLLER (2000): Erfassung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag und des damit verbundenen Austrags von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln im Velberter Lössrücken. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 92, S. 112 - 118.
- FRIELINGHAUS, M. (Hrsg.) 1997: Merkblätter zur Bodenerosion in Brandenburg. = ZALF - Berichte, Nr. 27.
- FRIELINGHAUS, M.; HÖFLICH, G.; JOSCHKO, M.; ROGASIK, H. u. H. SCHÄFER (1997): Auswertung eines Langzeitexperimentes zur konservierenden Bodenbearbeitung von Sandböden und Einschätzung des Erfolgs. In: Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, Nr. 41, S. 383 - 402.
- FRIELINGHAUS, M. u. WINNIGE, B. (2000): Maßstäbe bodenschonender landwirtschaftlicher Bodennutzung, Erarbeitung eines Bewertungs- und Entscheidungssystems zur Indikation der Wassererosion. = UBA-Texte, S. 43-100.
- GEISELHART, C. (1994): Abbau- und Transportverhalten von Pflanzenschutzmitteln unter Pflanzenbeständen. Dissertation am Fachbereich für Pflanzenproduktion und Landschaftsökologie der Universität zu Hohenheim.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT NRW (Hrsg.) 1989: Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen (M = 1:50000), Blatt L 4516 Büren
- GEOLOGISCHES LANDESAMT NRW (Hrsg.) 2000: Erosions- und Verschlammungsgefährdung der Böden, Digitale Karte, CD-ROM, ISBN 3-86029-701-5.
- GERHARD LABORTECHNIK GMBH (Hrsg.) 1997: Funktionsbeschreibung für Kjeldahltherm und Vapodest 50. Bonn.

- GESELLSCHAFT FÜR KONSERVIERENDE BODENBEARBEITUNG (GKB) E.V. (1999): Konservierende Bodenbearbeitung in Europa: Umweltrelevante, ökonomische und EU politische Perspektiven.
- GKB (1999): Siehe GESELLSCHAFT FÜR KONSERVIERENDE BODENBEARBEITUNG
- GLATTHAAR, D. u. SCHREIBER, D. (1988): Geographische Analyse eines Hochwasserereignisses im Naturraum Haarstrang (Ostwestfalen). In: Berichte zur deutschen Landeskunde, Bd. 62, Heft 2, S. 325 - 335. Kreisarchiv Soest 1994.
- GOLD, A. J. and LOUDON, T. L. (1989): Tillage effects on surface runoff water quality from artificially drained cropland. In: Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 32 (4), p. 1329 - 1334.
- GOTTESBÜREN, B.; PESTEMER, W. u. S. BEULKE (1994): Untersuchungen zur Charakterisierung und zu Auswirkungen der zeitlichen Veränderungen der Sorption von Herbiziden im Boden. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV, S. 661 - 670.
- GRUNEWALD, K.; MANNSFELD, K. u. W. SCHMIDT (1997): Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel (besonders Diuron) im Flusseinzugsgebiet der Großen Röder. In: Wasser & Boden, Nr. 3, S. 17 - 20.
- HÄFNER, M. (1990): Mobilität von Maisherbiziden in Böden und ihr Auftreten im Grundwasser. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XII, S. 427 - 435.
- HÄUßLER, W. (1992): Verhalten und Verbleib einiger in Mais eingesetzter Herbizide in verschiedenen Böden und auf unterschiedlichen Standorten. Dissertation am Fachbereich für Pflanzenproduktion und Landschaftsökologie der Universität zu Hohenheim.
- HAHN, H. U. (1992): Die morphogenetische Wirksamkeit historischer Niederschläge. Die Besselbergäcker und die Grünbachau - Ein Beispiel aus dem Taubereinzugsgebiet. = Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 82.
- HAIDER, J. (1994): Herbizide in Oberflächenabfluss und Bodenabtrag - Feldversuche mit simuliertem Regen. Dissertation an der Technischen Universität zu München-Weihenstephan.
- HAIDER, J. (1997): Ausmaß der Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffabschwemmung von Ackerflächen bei ordnungsgemäßer Landbewirtschaftung. - Forschungsprojekt im Verbundprojekt "Boden- und Stoffabtrag von ackerbaulich genutzten Flächen - Ausmaß und Minderungsstrategien" des MUNLV in NRW. Zwischenbericht 1997. Unveröffentlicht.
- HAIDER, J. und AUERSWALD, K. (1997): Prozesse bei der Pflanzenschutzmittelverlagerung mit Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. In: Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Heft 330, S. 7 - 18.
- HAUER, G.; KLIK, A.; JESTER, W. a. C. C. TRUMAN (2001): Field investigations of rain-fall impact on soil surface roughness. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 467 - 470.
- HELLEKES, R. u. OVERATH, H. (1997): Flächenhafter Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in das Grundwasser - Abschlussbericht des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Materialien, Nr. 39. Essen.

- HELMING, K. (1992): Die Bedeutung des Mikroreliefs für die Regentropfenerosion. Dissertation an der Technischen Universität zu Berlin.
- HEMPEL, L. (1962): Das Großrelief am Südrand der Westfälischen Bucht und im Sauerland. In: Spieker Bd. 12, S. 3 - 44.
- HERZEL, F. (1995): Pflanzenschutzmittel im Trinkwasser - Ein Überblick. In: Gesunde Pflanzen, Nr. 47, S. 132 - 140.
- HERZEL, F. (1997): Untersuchungen von Trinkwasserproben auf Pflanzenschutzmittel 1991 - 1996. In: Gesunde Pflanzen, Heft 6, 1997, S. 189 - 192.
- HERZEL, F. und SCHMIDT, G. (1988): Zum Einfluss der Bodeneigenschaften auf das Abbauverhalten von Pflanzenschutzmitteln. In: Wasser & Boden, Nr. 4, S. 174 - 177.
- HILLER, D. A; REMONATTO-DREYER, I. u. T. WIEDER (2000): Bodenerosion durch Wasser - Erfahrungen aus einem Projekt zur Minderung der Bodenerosion durch unkontrolliert abfließendes Niederschlagswasser aus landwirtschaftlichen Flächen einer Gemeinde am Niederrhein. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 92, S. 119 - 125.
- HOEGEN, B., BRENN, C. & J. BOTSCHKE (1995): Bodenerosion in Nordrhein-Westfalen - Gefährdung und Schutzmaßnahmen. = Forschungsberichte des Lehr- und Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und standortgerechte Landwirtschaft“ an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Heft 30.
- HOHNVEHLMANN, J. (1963): Vergesellschaftung, Entstehung und Eigenschaften der Böden im Soester Hellweggebiet. Dissertation am Institut für Bodenkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- HOOFF, U. (1994): Bedeutung des Eintragspfades Hofablauf für die Pflanzenschutzmittelbelastung von Oberflächengewässern. In: Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe, Kreisstelle Coesfeld. - Kooperation Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Einzugsgebiet der Stevertalsperre, Ergebnisse der Beratung 1994, S. 27 - 37.
- HORN, R. u. FLEIGE, H. (1999): Bewertung der Bodenerosion in Fahrspuren nach der Toleranzgrenze der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 91/III, S. 1229 - 1232.
- HORTON, R. E. (1940): An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. In: Soil Science Society of America. American Proceedings, Vol. 5, p. 399 - 417.
- HUBER, A. (1998): Belastung der Oberflächengewässer mit Pflanzenschutzmitteln in Deutschland - Modellierung der diffusen Einträge. = Boden und Landschaft, Bd. 25. Justus-Liebig-Universität zu Gießen.
- ILLNER, H. (2003): Bodenerosion am Haarstrang im Kontext von Relief, Klima, Böden und Nutzung. Teil I des Endberichtes der wissenschaftlichen Begleituntersuchungen zum E + E-Vorhaben „Biotopverbund Rühthener Haar, Kreis Soest“.
- INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS GEGEN VERUNREINIGUNG (IKSR, Hrsg.) 1993: Statusbericht Rhein. Koblenz.
- IRMER, U.; WOLTER, R.; KUSSATZ, C. (1993): Problembereich Pflanzenschutzmittel aus wasserwirtschaftlicher Sicht. = Schriftenreihe Agrarspectrum, Bd. 21, S. 22 - 23.

- ISRINGHAUSEN, S.; DUTTMANN, R. u. TH. MOSIMANN (1999): Überprüfung räumlich differenzierter Prognosen erosionsbedingter Stofftransporte durch Feldbeobachtungen. In: Wasser & Boden, Bd. 51/12, S. 25 - 32.
- ISENBECK-SCHRÖTER, M.; KOFOD, M.; KÖNIG, B.; SCHRAMM, T.; BEDBUR, E. u. G. MATTHESS (1998): Auftreten von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässern und im Grundwasser. In: Grundwasser, Nr. 2, S. 57 - 66.
- JAGOW, O. (1959): Das Problem der Bodenerosion in der Hellwegbörde. = Heimatkalender des Kreises Soest, S. 37 - 44.
- JAYNES, D. B.; KUNG, K.-J. S.; AHMEND, S. I. a. R. S. KANWAR (2001): Temporal dynamics of preferential flow to a field tile. In: American Society of Agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 89 - 92.
- JESTER, W.; KLIK, A.; HAUER, G.; HEBEL, H. a. C. C. TRUMAN (2001): Rainfall and surface roughness effects on soil loss and surface runoff. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 463 - 466.
- JORDAN, F. u. MÜLLER, CH. (1997): Oberflächenabfluss, Boden- und Nährstoffaustrag von ackerbaulich genutzten Flächen. = Schriftenreihe der Bayrischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP, Hrsg.) - "Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen" – 1985 - 1995, Teil II, 5/97.
- JURY, W.A. u. FLÜHLER, H. (1992): Transport of chemicals through soil: Mechanisms, models and field applications. In: Advances in Agronomy, Vol. 47, p. 141 - 201.
- KANWAR, R. S. and BAKHSH, A. (2001): Preferential flow and its effects on nitrate and Herbicide leaching to groundwater under various tillage systems. In: American Society of agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 165 - 168.
- KARRENBURG, H. (1968): Niederschlagsintensität und Erosion im Karstgebiet von Paderborn bei dem Unwetter vom 16 Juli 1965. In: Fortschritte der Geologie des Rheinlandes und Westfalen, Bd. 16, S. 41 - 64.
- KERTÉSZ, Á.; TÓTH, A.; JAKAB, G. a. Z. SZALAI (2001): Soil erosion measurement in the Tetves Catchment, Hungary. In: HELMING, K. (Ed.) 2001: Multidisciplinary Approaches to Soil Conservation Strategies. = ZALF - Berichte, Nr. 47.
- KIVELITZ, H. (1996): Grundlagen und Planung einer kleinräumigen Biotopvernetzung, dargestellt am Beispiel des Versuchsgutes Merklingsen. Diplomarbeit an der Universität – Gesamthochschule Paderborn.
- KLADIVKO, E. J.; SCOYOC van, G. E.; MONKE, E. J; OATES, K. M. a. W. PASK (1991): Pesticide and nutrient movement into subsurface tile drains on a silt loam soil in Indiana. In: Journal of Environmental Quality, Vol. 20, p. 264 - 270.
- KLEINN, H. (1962): Die Schledden auf der Haarfläche zwischen Geseke und Soest. Ein Beitrag zur Hydrographie und Morphologie temporärer Trockentäler. = Spieker, Bd. 11, S. 67 - 112.

- KLEIN, C.; PÄTZOLD, S. u. G. W. BRÜMMER (2001): Einfluss von Vegetationsfilterstreifen auf Pflanzenschutzmittelausträge mit dem Oberflächen- und Zwischenabfluss. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 96 (2), S. 627 - 628.
- KLIK, A. and SOKOL, W. (2001): A new measuring device for field erosion plots. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 234 - 237.
- KLIK, A.; ZARTL, A. S. a. J. ROSNER (2001): Tillage effects on soil erosion, nutrient, and pesticide transport. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 71 - 74.
- KLIMSA, K.-G (1996): Sorption, Verlagerung und Abbau von ausgewählten Pflanzenschutz-mittel-Wirkstoffen in Böden unterschiedlichen Stoffbestandes mit und ohne Mulch - Labor- und Freilanduntersuchungen. = Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Bd. 18. Institut für Bodenkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- KNAPPE, S. (1997): Beobachtungen zur Bodenerosion am Haarstrang im Bereich Körbecke (Gemeinde Möhnesee, Kreis Soest). Diplomarbeit. Universität Münster.
- KÖRDEL, W. (1997): Feldversuche zum Austrag von Pflanzenschutzmitteln über Drainage - Abschätzung der Belastung aquatischer Ökosysteme. In: Gesunde Pflanzen, Heft 5, S. 163 - 170.
- KÖRDEL, W. und KLÖPPEL, H. (1997): Runoff-Versuche an Großparzellen. In: Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Heft 330, S. 7 - 18.
- KORSAETH, A.; MÜLLER-BERGHÖFER, P.; MOLLENHAUER, K.; FISCHER, P.; BACH, M. u. H. G. FREDE (1997): Der Einfluss von organischer Bodenbedeckung auf den Oberflächentransport von Isoproturon. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Nr. 160, S. 519 - 523.
- KREIS SOEST, LIEGENSCHAFTSKATASTER (Hrsg.) 2001: Deutsche Grundkarte 1 : 5000. Digitale Karte. CD-ROM.
- KROMER, K.-H. (1996): Bonner Regensimulatoren. Systeme zur Messung der Bodenerosion. In: Landtechnik, Jg. 51, Bd. 1/1996.
- KRÜCK, ST.; NITZSCHE, O. u. W. SCHMIDT (2001): Regenwürmer vermindern Erosionsgefahr. In: Landwirtschaft ohne Pflug, Heft 1.
- KUNG, K.-J. S. (1990a): Preferential flow in a sandy vadose zone. 1. Field observation. In: Geoderma, Vol. 46, p. 51 - 58.
- KUNG, K.-J. S. (1990b): Preferential flow in a sandy vadose zone. 2. Mechanisms and implications. In: Geoderma, Vol. 46, p. 59 - 71.
- KUNTZE, H. u. BLANKENBURG, J. (2000): Meliorative Bodenbearbeitung. In: LÜTKE ENTRUP, N. u. OEHMICHEN, J. (Hrsg.) 2000: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Bd. 1: Grundlagen, S. 203 - 242.

- LAMMEL, J. (1990): Der Nährstoffaustrag aus Agrarökosystemen durch Vorfluter und Dräne unter besonderer Berücksichtigung der Bewirtschaftungsintensität. Dissertation an der Justus-Liebig-Universität zu Gießen.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA, Hrsg.) 1995: Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit Nitrat.
- LANDESANSTALT FÜR PFLANZENBAU BADEN WÜRTTEMBERG (Hrsg.) 2002: Verringerung von Oberflächenabfluss und Bodenerosion. In: Merkblatt für die umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 3 (2. Aufl.), Juli 2002.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN, (Hrsg.) 1997: Analysevorschrift für die Probenvorbereitung zur Bestimmung ausgewählter Herbizide in Wasser und Boden. Unveröffentlichter Bericht des Dezernates 331.3. Düsseldorf, 1997.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN, (Hrsg.) 1999: Gewässergütebericht 1997. Essen.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.) 2002: Topographische Karten von Nordrhein-Westfalen 1 : 50000. Digitale Karte. CD-ROM.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN - LIPPE (Hrsg.) 2001: Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz - Ausgabe 2001.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN - LIPPE (Hrsg.) 2002: Fachinformation EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Referat 31.
- LANG, St. und HURLE, K. (1997): Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer durch Runoff. In: Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Heft 330, S. 7 - 18.
- LAWA (1995): s. LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER
- LE BAYON, R. C. and BINET, F. (1999): Rainfall effects on erosion of earthworm casts and phosphorous transfers by water runoff. In: Biology and Fertility of Soils, Vol. 30, p. 7 - 13.
- LENNARTZ, B. u. WIDMOSER, P. (1994): Einträge von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer aus Dränflächen. = Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1994.
- LEVY, G. J.; SHAINBERG, I. a. J. LETEY (2001): Temporal changes in soil erodibility. In: AS-COUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 5 - 7.
- LINKE, C. (1998): Direktsaat - eine Bestandsaufnahme unter besonderer Berücksichtigung technischer, agronomischer und ökonomischer Aspekte. Dissertation am Fachbereich Agrartechnik der Universität zu Hohenheim.
- LÜTKE ENTRUP, N. (1996): Bodenbearbeitung, Bodenbelastung und Bodenverbesserung. In: PAHL, M. (Hrsg.): Bodennutzung, Bodenschädigung und Bodensanierung. Universität-GH Paderborn und Westfälisches Umweltzentrum, Paderborn (WUZ).

- LÜTKE ENTRUP, N. (2000): Integrierter Pflanzenbau - Das Leitbild für eine standortgerechte und umweltverträgliche Landwirtschaft. In: LÜTKE ENTRUP, N. u. OEHMICHEN, J. (Hrsg.) 2000: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Bd. 2: Kulturpflanzen, S. 1 - 23.
- LÜTKE ENTRUP, N. u. OEHMICHEN, J. (Hrsg.) 2000a: Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 1: Grundlagen.
- LÜTKE ENTRUP, N. u. OEHMICHEN, J. (Hrsg.) 2000b: Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2: Produktionstechnik.
- LUA-NRW (1999): s. LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN
- LWK-WL (2002): s. LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE
- MAIDL, F. X. (1989): Einfluss landwirtschaftlicher Anbausysteme auf Größe und Verminderung des Nitratreintrages in tiefere Bodenschichten. In: Kali-Briefe, Nr. 19, S. 649 - 662.
- MALICKI, M. A.; PLAGGE, R.; RENGGER, M. u. R. T. WALCZAK (1992): Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores. In: Irrigation Science, vol. 13, p. 65 - 72.
- MALICKI, M. A.; PLAGGE, R. u. C. H. ROTH (1996): Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. In: European Journal of Soil Science, vol. 47, p. 357 - 366.
- MANNERING, J. V. u. MEYER, L. D. (1987): The effects of various rates of surface mulch on infiltration and erosion. Soil Science Society of America. American Proceedings, Vol. 27, S. 84 - 86.
- MATTHESS, G. (Hrsg.) 1997: Transport- und Abbauverhalten von Pflanzenschutzmitteln im Sicker- und Grundwasser. = Verein Wasser-, Boden-, Lufthygiene, Bd. 100.
- MICHAEL, A. (2001): Abschätzung des Sediment- und Nährstoffeintrages (P) in Oberflächengewässer bei unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung mit dem Erosionsprognosemodell EROSION 3 D. Vortragsskript des Workshop 1: "Modelle der Nah- und Fernfassung" am 12. März 2001. Veranstaltung des Landesamtes f. Wasserwirtschaft Rheinland Pfalz im Rahmen d. Projektes IRMA II: "Schonende Bewirtschaftung von sensiblen Niederschlagsflächen und Bachauen.
- MICHAELSEN, J. u. REXILIUS, L. (1995): Untersuchungen zum Migrationsverhalten von Pflanzenschutzmitteln nach Herbstapplikation auf einer gedrähten Ackerfläche - Ergebnisse aus 1994/95 -. Unveröff. Manuskript am Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel u. des Pflanzenschutzamtes Schleswig Holstein.
- MITCHELL, J. K.; BANASIK, K.; HIRSCHI, M. C.; COOKE, R. A. C. a. P. KALITA (2001): There is not always surface runoff and sediment transport. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21st century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 575 - 578.
- MOHANTY, B. P.; CASTIGLIONE, P.; SHOUSE, P. J. a. M. Th. van GENUCHTEN (2001): Measurement and modeling of preferential flow under controlled conditions. In: American Society of agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 77 - 80.

- MOKRY, M. (1991): Labor- und Feldversuche zum Abbauverhalten von Isoproturon, Terbutylazin und Pendimethalin in Ackerböden des Kraichgaus. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 63, S. 139 - 142.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1977): Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1985): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. DLG-Verlag. Frankfurt a. Main.
- MÜLLER, H. (1993): Anröchte. Geschichte seiner Ortschaften von den Anfängen bis um 1800. Münster.
- MÜLLER, I u. LÜTKE ENTRUP, N. (2001): Erfassung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag im Rahmen eines Demonstrationsvorhabens mit Maßnahmen zum Erosionsschutz in Nordrhein-Westfalen. Unveröff. Zwischenbericht des Forschungsvorhabens "Demonstrationsvorhaben zu Erosionsschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft - Messungen zur Wirksamkeit der Abtragsminderungsmaßnahmen (wissenschaftliche Begleitung)". Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen.
- MÜLLER-WEGENER, U. (1994): Eintrag von Pflanzenschutzmittelwirkstoffen aus landwirtschaftlicher Anwendung in Oberflächengewässer. In: Bundesgesundheitsblätter, Nr. 4, S. 158 - 163.
- MÜLLER-WILLE, W. (1942): Westfalen. Landschaftliche Ordnung und Bindung eines Landes. Münster.
- NEUMANN u. LEUCHS (1999): Trends in der Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit in NRW am Beispiel ausgewählter Grundwassermessstellen. = Berichte aus dem IWW. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung GmbH, Bd. 29, S. 141 - 169.
- NG, H. Y. F. a. GLEGG, S. B. (1997): Atrazine and Metolachlor losses in runoff events from an agricultural watershed: The importance of runoff components. In: The Science of the Total Environment, Vol. 193, p. 215 - 228.
- NIEBER, J. L. (2001): The relation of preferential flow to water quality and ist theoretical and experimental quantification. In: American Society of agricultural Engineers (Ed.) 2001: Preferential Flow. Water movement and chemical transport in the environment. Proceedings of the 2nd International Symposium, p. 1 - 10.
- NITZSCHE, O; SCHMIDT, W. u. W. RICHTER (2000): Minderung des P-Abtrages von Ackerflächen durch konservierende Bodenbearbeitung. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 92, S. 178 - 181.
- NORDMEYER, H. u. ADERHOLD, D. (1995): Verlagerung von Pflanzenschutzmitteln in Bodenmakroporen als mögliche Ursache für Grund- und Oberflächenwasserbelastungen. In: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, Nr. 47, S. 137 - 143.
- OEHMICHEN, J. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. In: LÜTKE ENTRUP, N. u. OEHMICHEN, J. (Hrsg.) 2000: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Bd. 1: Grundlagen, S. 407 - 599.
- OGDEN, C.-B.; WAGENET, R.-J.; ES van, H.-M. u. J.-L. HUTSON (1992): Quantification and modeling of macropore drainage. In: Geoderma, Vol. 55, S. 17 - 35.

- OLSON, D. I.; KANWAR, R. S. a. J. H. BISCHOFF (1997): Construction and testing of a facility for measuring water and agrochemical transport through the vadose zone. In: Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 40 (4), p. 961 - 969.
- PÄTZOLD, S. u. BRÜMMER, G. (2003): Influence of microbial activity and soil moisture on herbicide immobilization in soils. In: Journal of Plant Nutrients and Soil Science, vol. 166, p. 336 - 344.
- PAHL, M.-H. (1996): Bodennutzung, Bodenschädigung und Bodensanierung. Universität zu Paderborn und Westfälisches Umweltzentrum, Paderborn (WUZ).
- PETERMEIER, J. (1968): Die Naturlandschaften des Kreises Lippstadt. In: Beiträge zur Heimatkunde des Kreises Lippstadt, Heft 2.
- PHILLIPS, S. M. (1973): No-Tillage-Farming. Reiman Association, Milwaukee/Wisconsin/USA.
- PLIETH, H.-E. u. BÖRNER, H. (1985): Der Abbau von Pendimethalin im Boden von Gerstenkulturen unter dem Einfluss anderer Pflanzenschutzmittel und von Stroh. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Nr. 92 (3), S. 288 - 304.
- PLOEG van der, R. R. u. SCHWEIGERT, P. (2001a): Elbe river flood peaks and postwar agricultural land use in East Germany. In: Naturwissenschaften, Bd. 88, S. 522 - 525.
- PLOEG van der, R. R. u. SCHWEIGERT, P. (2001b): Reduzierte Bodenbearbeitung im Ackerbau - eine Chance für Wasserwirtschaft, Umwelt und Landwirtschaft. In: Wasserwirtschaft, Nr. 91 (9), S. 450 - 455.
- PLOEG van der, R. R. v. d.; GIESKA, M. u. P. SCHWEIGERT (2001): Landschaftshydrologische und Hochwasser relevante Aspekte der ackerbaulichen Bodenbewirtschaftung in der deutschen Nachkriegszeit - Impact of postwar agricultural soil management on surface hydrology and river peak discharge. In: Berichte über Landwirtschaft, Bd. 79, S. 447 - 466.
- POMMER, G.; KREMB, ST. u. CH. MÜLLER (2002): Erosionsbedingte Einschwemmungen und Nährstoffeinträge aus landwirtschaftlichen Nutzflächen in Oberflächengewässer. = Schule und Beratung, Heft 3.
- POTRATZ, K.-U. (1993): Bedeutung von Feuchte und Struktur der Bodenoberfläche für die Bodenerosion. = Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Bd. 11. Institut für Bodenkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- RACZKOWSKI, C. W.; GAYLE, G. A.; REYES, M. R. a. G. B. REDDY (2001): Crop response, soil loss and runoff results from a long term tillage study at North Carolina A&T State University. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 665 - 668.
- REDDY, G. B.; RACZKOWSKI, C. W.; REYES, M. R. a. G. A. GAYLE (2001): Surface losses of N, P, and herbicides from a long term tillage study at North Carolina A&T State University. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 669 - 672.

- REJMAN, J.; DĘBICKI, R. a. J. PALUSZEK (2001): Soil loss and crop yields in eroded loess area under soil conservation practices. In: HELMING, K. (Ed.) 2001: Multidisciplinary Approaches to Soil Conservation Strategies. = ZALF - Berichte, Nr. 47.
- RICHTER, G. (1965): Bodenerosion. Schäden und gefährdete Gebiete in der BRD. = Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 152.
- RICHTER, G. (Hrsg.) 1998: Bodenerosion - Analyse und Bilanz eines Umweltproblems.
- RITZEL, A. (1972): Der geologische Aufbau und die Oberflächengestaltung des Kreises Lippstadt. = Beiträge zur Heimatkunde des Kreises Lippstadt, Heft 4/1972.
- RÖDEL, V.; FISCHER, R.; HÄNEL, R. u. I. SIEBERS (1999): Analytik von Pflanzenschutzmitteln in Böden: Kurzfassungen von Methoden. In: Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Heft 364.
- RÖMER, W. (1997): Phosphoraustrag aus der Landwirtschaft in Gewässer. In: Wasser & Boden, Nr. 8, S. 51 - 54.
- RODE, M. (1995): Quantifizierung der Phosphorbelastung von Fließgewässern durch landwirtschaftliche Nutzung. = Boden und Landschaft, Bd. 1. Justus-Liebig-Universität zu Gießen.
- ROSNER, J. u. KLIK, A. (2001): Wirkstoffabtrag bei konventionell, konservierend und direkt bewirtschafteten Ackerflächen. Manuskript der 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 24. u. 25. Apr. 2001, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein in Irnding, Österreich.
- SAUERBORN, P. u. ERDMANN, K. H. (1993): Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte von Nordrhein-Westfalen. In: Wasser und Boden, Bd. 1/1993, S. 22 - 24 u. S. 37 - 38.
- SAUERLAND, H. J. (1969): Quellen am Hellweg. = Beiträge zur Heimatkunde des Kreises Lippstadt, Heft 3.
- SAUER, T. J. & DANIEL, T. C. (1987): Effect of tillage system on runoff losses of surface-applied pesticides. In: Soil Science Society American Journal, Vol. 51, p. 410 - 415.
- SCHEFFER, B. (1999): Stoffliche Belastung und Stoffausträge mit dem Sickerwasser bei Ackerböden. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 90, S. 85 - 94.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P U. K. STAHR (1995²): Bodenkundliches Praktikum. Berlin 1995.
- SCHMELMER, K.; BOTSCHEK, J. u. A. SKOWRONEK (2000): Grasfilterstreifen und Stoffabtrag von ackerbaulich genutzten Böden. In: Zeitschrift für Geomorphologie, N. F. Supplement, Nr. 121, S. 109 - 122.
- SCHMIDT, J.; WERNER, M. von; MICHAEL, A. u. W. SCHMIDT (1999): Planung und Bemessung von Erosionsschutzmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. In: Wasser & Boden, Bd. 51/12, S. 19 - 24.
- SCHMIDT, W.; MICHAEL, A. u. J. SCHMIDT (1997): Ergebnisse von Bodenabtragsmessungen auf konservierend bestellten Ackerflächen als Beratungsgrundlage für wassererosionsmindernde Anbauverfahren in Sachsen. = VDLUFA-Schriftenreihe, Bd. 46, Kongressband 1997, S. 675 - 678.

- SCHNEIDER, M.; HERTL, P. u. B. DÜFER (1997): Pflanzenschutzmittelabschwemmung von landwirtschaftlichen Flächen - Eine Literaturschau und Bewertung. In: Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- u. Forstwirtschaft, Heft 330, S. 63 - 86.
- SCHÜLEIN, J.; MARTENS, D.; SPITZAUER, P. a. A. KETTRUP (1995): Comparison of different solid phase extraction materials and techniques by application of multiresidue methods for the determination of pesticides in water by high-performance liquid chromatography (HPLC). In: Fresenius Journal of Analytical Chemistry, Vol. 352, p. 565 - 571.
- SCHÜLEIN, J.; SPITZAUER, P. u. A. KETTRUP (1996): Untersuchungen zum lateralen Transport von Pestiziden im Agrarökosystem. = Forschungsverbund Agrarökosysteme München (Hrsg.). Jahresbericht 1996, S. 171 - 177.
- SCHÜLEIN, J.; GLÄSSGEN, W. E.; HERTKORN, N.; SCHRÖDER, P.; SANDERMANN, H. a. A. KETTRUP (1996): Detection and identification of the herbicide isoproturon and its metabolites in field samples after a heavy rainfall event. In: International Journal of Environmental Analytical Chemistry, Vol. 65, p. 193 - 202.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & W. KAINZ (1990²): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrages und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart.
- SEEL, P.; LANG, S.; ZULLEI-SEIBERT, N. (1995): Eintragspfade von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer. In: Wasserwirtschaft, Nr. 85, S. 1 - 6.
- SEMMELE, A. (1983): Grundzüge der Bodengeographie. Stuttgart.
- SEMMELE, A. (1995): Holozäne Bodenbildungsraten und "tolerierbare Bodenerosion" – Beispiele aus Hessen. – Geologisches Jahrbuch Hessen, Nr. 123, S. 125 – 131.
- SEYFARTH, M.; DEUMLICH, D.; FRIELINGHAUS, M.; HELMING, K. u. H. PFÜTZENREUTER (1993): Messsystem zur automatischen Registrierung des Oberflächenabflusses und zur abflussabhängigen Probenahme. In: Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Boden, Bd. 37, S. 379 - 385.
- SHIPITALO, M. J.; EDWARDS, W. M.; DICK, W. A. u. L. B. OWENS (1990): Initial storm effects on macropore transport of subsurface-applied chemicals in no-till soil. In: Soil Science Society American Journal, Vol. 54, p. 1530 - 1536.
- SOMMER, C., KÖLLER, K. & M. BRENNDÖRFER (1989): Einordnung von Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren. Bodenbearbeitungs- und Bestellsysteme in der Diskussion. In: KTBL-Arbeitspapier, Nr. 130, S. 168 - 173.
- SOMMER, C. u. BRUNOTTE, J. (1995): Konservierende Bodenbearbeitung zu Mais. In: Mais, Nr. 3, S. 84 - 89.
- SOMMER, C. u. BRUNOTTE, J. (2000): Bodenschutz. In: LÜTKE ENTRUP, N. u. OEHMICHEN, J. (Hrsg.) 2000: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Bd. 1: Grundlagen, S. 203 - 223.
- SOMMER, C. (1999): Konservierende Bodenbearbeitung - ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. In: Bodenschutz, Nr. 1/1999, S. 15 - 19.
- SOUTHWICK, L. M.; WILLIS, G. H.; BENGTON, R. L. u. T. L. LORMAND (1990): Effect of subsurface drainage on runoff losses of atrazine and metolachlor in Southern Louisiana. In: Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 45, p. 113 - 119.

- SOUTHWICK, L. M.; WILLIS, G. H.; MERCADO, O. A. a. R. L. BENGTSON (1997): Effect of sub-surface drains on runoff losses of Metolachlor and Trifluralin from Mississippi River alluvial soil. In: Archives of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 32, p. 106 - 109.
- STANGE, C. F.; DIEKKRÜGER, B. u. H. NORDMAYER (1998): Measurement and simulation of herbicide transport in macroporous soils. In: Pesticide Science, Vol. 52, p. 241 - 250.
- STEENHUIS, T.-S.; STAUBITZ, W.; ANDREINI, M.-S.; SURFACE, J.; RICHARD, T.-L.; AULSEN, R.; PICKERING, N.-B.; HAGERMAN, J.-R.; L.-D. GOEHRING (1990): Preferential movement of pesticides and tracers in agricultural soils. In: Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 16, p. 50 - 66.
- STRECK, Th. and RICHTER, J. (1999): Field-scale study of Chlortoluron movement in a sandy soil over winter: II. Modeling. In: Journal of Environmental Quality, Vol. 28, p. 1824 - 1831.
- TEBRÜGGE, F. (1994): Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen unter den Aspekten von Bodenschutz und Ökonomie. In: TEBRÜGGE, F. u. DREIER, M. (Hrsg.) 1994: Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden, S. 5 - 16.
- TEBRÜGGE, F. u. DREIER, M. (Hrsg.) 1994: Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden. Gießen.
- TERRY, J. P. (1998): A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. Australien Journal of Soil Research, Vol. 36, p. 525 - 542.
- TIMME, G.; FREHSE, H. u. V. LASKA (1986): Zur statistischen Interpretation und graphischen Darstellung des Abbauverhaltens von Pflanzenbehandlungsmittel-Rückständen. In: II. Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer 39 (2), S. 188 - 204.
- TIMMERMANN, F. u. MOKRY, M. (1997): Bilanzierung ausgewählter Herbizide landwirtschaftlich genutzter Böden im Untersuchungsgebiet "Weierbach". Abschlussbericht des BMFT/BMBF-Vorhabens. Förderkennzeichen 02 WA 8904/2.
- TRUMAN, C. C.; SHAW, J. N. a. D. W. REEVES (2001): Tillage effects on rainfall partitioning, sediment yield, and facilitated agrichemical transport potential. In: ASCOUGH, J. C. and FLANAGAN, D. C. (Ed.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, p. 237 - 240.
- UBA (2000): s. UMWELTBUNDESAMT
- UMWELTBUNDESAMT, (Hrsg.) 2000: Schätzung der Einträge von Pflanzenschutzmitteln aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer Deutschlands. Berlin.
- VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA), (Hrsg.) 1991⁴ : Methodenbuch Band I. Die Untersuchung von Böden.
- VORSTAND DES DACHVERBANDES AGRARFORSCHUNG (DAF, Hrsg.) 1993: Belastungen der Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft - Gemeinsame Lösungsansätze zum Gewässerschutz. = Schriftenreihe Agrarspektrum, Bd. 21.
- WALTER, R. (1992): Geologie von Mitteleuropa. Stuttgart.

- WERNER, W. & OLFS, H.-W. (1989): Phosphatbelastung der Oberflächengewässer. In: Zeitschrift der Chemischen Industrie, Nr.10, S. 415 - 421.
- WERNER, W. und NOLTE, Ch. (1991): Stickstoff- und Phosphateintrag über diffuse Quellen in Fließgewässer des Elbeinzugsgebiets im Bereich der ehemaligen DDR. = Schriftenreihe Agrarspectrum, Bd. 19.
- WERNER, W. und WODSAK, H.-P. (1994): Stickstoff- und Phosphateintrag in die Fließgewässer Deutschlands unter besonderer Berücksichtigung des Eintragsgeschehens im Lockergesteinbereich der ehemaligen DDR. = Schriftenreihe Agrarspectrum, Bd. 22.
- WILLIS, G. H.; SOUTHWICK, L. M.; FOUSS, J. L.; CARTER, C. E. and J. S. ROGERS (1997): Nitrate losses in runoff and subsurface drain effluent from controlled-water-table plots. In: Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 58, p. 566 - 573.
- WINNIGE, B. u. FRIELINGHAUS, M. (1998): Ermittlung aktueller Bodenbedeckungsgrade auf Versuchs- und Praxisflächen. Unveröffentlichter Zwischenbericht des TLL/UBA-Vorhabens 10 701 022. Müncheberg/Braunschweig, Nov. 1998.
- WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. United States Department of Agriculture (USDA, Ed.) 1978: Agricultural Handbook, Vol. 537.
- WITHERS, P.-J. A.; CLAY, S. D. a. V. G. BREEZE (2001): Phosphorous transfer in runoff following application of fertilizer, manure and sewage sludge. In: Journal of Environmental Quality, Vol. 30, p. 180 - 188.
- WOLF, A. (1995): Grundwasserschonende Landbewirtschaftung - Erfahrungsbericht aus der Sicht der GEW-Werke Köln AG. In: Wasser & Boden, Bd. 47, S. 63 - 67.
- WÜRFEL, Th. (1999): Weniger Oberflächenabfluss. In: Landwirtschaft ohne Pflug - Sonderausgabe Agritechnica 99.
- WÜRFEL, Th. (2000): Erosionsschutz ist Hochwasservorsorge. In: Mais, Nr. 4, S. 149 - 152.
- WU, T. L.; CORRELL, D. L. a. H. E. H. REMENAPP (1983): Herbicide runoff from experimental watersheds. In: Journal of Environmental Quality, Vol 12, p. 330 - 336.
- ZANDER, C.; STRECK, T. u. J. RICHTER (1997): Räumlich variable Verlagerung des Herbizids Chlortoluron in einem Sandboden über Winter. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 80, S. 173 - 176.
- ZEZSCHWITZ, E. von (1967): Boden- und Vegetationseinflüsse auf Überschwemmungen und Erosionen beim Unwetter vom 16 Juli 1965 im Gebiet der Paderborner Hochfläche. In: Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau, Bd. 125, S. 189 - 210.
- ZEZSCHWITZ, E. von (1982): Paläoböden der Paderborner und Briloner Hochfläche. In: Eiszeitalter und Gegenwart, Bd. 32, S. 203 - 212.
- ZHAI, R.; KACHANOSKI, R. G. u. R. P. VORONEY (1990): Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water. In: Soil Science Society American Journal, Vol. 54, p. 186 - 192.

- ZHAO, B. (1994): Auswirkungen konservierender Bodenbearbeitung auf die Nährstoffverlagerung und einige bodenphysikalische und pflanzenbauliche Parameter. Dissertation am Fachbereich Pflanzenproduktion und Landschaftsökologie der Universität zu Hohenheim.
- ZOLLFRANK (1995): Bericht zum Verhalten und Messgenauigkeit von Regengebern im agrarmeteorologischen Messnetz Rheinland-Pfalz. In: Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz (Hrsg.): Tagungsband der 4. Arbeitstagung über Einsatz und Nutzung agrarmeteorologischer Messstationen in Mainz.
- ZSOLNAY, A.; WHERHAN, M. u. H. STEIDL (1994): A field based study on the effect of dissolved organic matter on the transport of terbuthylazine. In: Chemosphere, Vol. 28/3, p. 533 - 541.

Anhang



Abb. 1: Flutrinnenspülung nach Starkregen am Haarstrang bei Menzel. Foto: 05.09.1987



Abb. 2: Verspülungen und Verschlämmungen im „Schalkstal“ bei Menzel. Foto: 05.09.1987



Abb. 3: Verschütteter Entwässerungsgraben bei Menzel nach Erosionsereignis Foto: (05.09.1987)



Abb. 4: Typischer „Off Site“-Schaden mit überflutetem und verschüttetem Verkehrsweg am Haarstrang. Foto: (05.09.1987)



Abb. 5: Blick auf die Versuchsfläche mit Bearbeitungs-Varianten und Versuchsplots im Winterraps Foto: (25.09.1997, Blickrichtung: Norden)



Abb. 6: Klimastation auf der Versuchsfläche



Abb. 7: Versuchspot auf der Parzelle mit Winterweizen mit Ablaufvorrichtung



Abb. 8: Rohrsystem für die Ableitung von Oberflächenabfluss zum Messsystem



Abb. 9: Abfluss-Zulauf mit Verteilerkasten zum Messsystem in der Schutzhütte



Abb. 10: Installiertes Messsystem mit Kippwaage, Bypass zum Auffangtank und Datalogger



Abb. 11: 1 l-Kippwaage mit Reedkontakt



Abb. 12: Blick in den Verteiler-Behälter mit Dreh- und Schwenkantrieb sowie Probenflaschen

Tab. 1: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf der Parzelle mit Winterraps 1997 - 2002

Kultur:	Winterraps				
Erntejahr:	1998	1999	2000	2001	2002
Vorfrucht:	Winterweizen	Wintergerste	Wintergerste	Wintergerste	Wintergerste
Ernte der Vorfrucht:	gehäckselt: 06.08.1997	22.07.98	20.07.99	13.07.00	24.07.01
Bearbeitung:	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2
Aussaat:	18.08.97	19.08.98	16.08.99	24.08.00	18.08.01
Saatstärke:	6 kg/ha	6 kg/ha	5 Kg/ha	5 kg/ha	4 kg/ha
Sorte:	"Express"	"Attila"	"Attila"	"Magnum"	"Magnum"
Pflanzen- schutz:	Berücksichtigung der im Erosionsmessversuch eingesetzten Herbizide				
Herbizide:	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat
Präparat:	"Butisan-Star" / "Fusilade"	"Butisan-Top" / "Fusilade"	"Butisan-Top" / "Agil"	"Butisan-Top" / "Agil"	"Butisan-Top" / "Focus-Ultra"
Aufwand- menge:	2 l/ha / 0,75 l/ha	2 l/ha / 0,75 l/ha	2 l/ha / 0,75 l/ha	2 l/ha / 0,75 l/ha	2 l/ha / 1,4 l/ha
Untersuchter Wirkstoff:	Metazachlor	Metazachlor	Metazachlor	Metazachlor	Metazachlor
Wirkstoff- menge:	750g/ha	750g/ha	750g/ha	750g/ha	750g/ha
Applikation:	10.09.97	07.09.98	27.08.99	29.08.00	28.08.01
Fungizide:	keine	keine	keine	keine	keine
Insektizide:	keine	keine	keine	keine	keine
Dünger:	AHL*	AHL	AHL	AHL	AHL
Dünger- menge:	80 Kg/ha / 90 Kg/ha	40 Kg/ha / 160 Kg/ha	40 Kg/ha / 150 Kg/ha	40 Kg/ha / 150 Kg/ha	40 Kg/ha / 160 Kg/ha
Düngung:	10.03.98 / 12.04.98	12.09.98 / 10.03.99	06.09.99 / 12.03.00	18.09.00 / 17.03.01	11.09.01 / 09.03.02

*AHL: Ammonium-Nitrat-Harnstofflösung (Flüssigdünger)

Tab. 2: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf der Parzelle mit Winterweizen 1997 - 2002

Kultur:	Winterweizen				
Erntejahr:	1998	1999	2000	2001	2002
Vorfrucht:	Winterweizen	Winterraps	Winterraps	Winterraps	Winterraps
Ernte der Vorfrucht:	gehäckselt: 06.08.1997	23.07.98	21.07.99	13.07.00	06.08.01
Bearbeitung:	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2
Aussaat:	11.09.97	13.09.98	13.09.99	27.09.00	11.10.01
Saatstärke:	180 kg/ha	200 kg/ha	180 Kg/ha	180 kg/ha	160 kg/ha
Sorte:	"Ritmo"	"Flair"	"Maverick"	"Maverick"	"Maverick"
Pflanzen- schutz:	Berücksichtigung der im Erosionsmessversuch eingesetzten Herbizide				
Herbizide:	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat
Präparat:	"Dicuran" / "IPU"	"Dicuran" / "IPU"	"Dicuran" / "IPU"	"IPU"	"IPU"
Aufwand- menge:	3 l/ha / 0,75 l/ha	3 l/ha / 0,75 l/ha	3 l/ha / 1,5 l/ha	3 l/ha	3 l/ha
Untersuchte Wirkstoffe:	Chlortoluron / Isoproturon	Chlortoluron / Isoproturon	Chlortoluron / Isoproturon	Isoproturon	Isoproturon
Wirkstoff- menge:	1100 g/ha / 1500 g/ha	1100 g/ha / 1500 g/ha	1100 g/ha / 1500 g/ha	1500 g/ha	1500 g/ha
Applikation:	18.10.97	31.03.99	13.10.99	18.10.00	25.10.01
Fungizide:	keine	keine	keine	keine	keine
Insektizide:	keine	keine	keine	keine	keine
Dünger:	AHL*	AHL	AHL	AHL	AHL
Dünger- menge:	60 / 60 / 60 kg/ha	65 / 55 / 60 Kg/ha	60 / 60 / 50 Kg/ha	80 / 60 / 60 Kg/ha	60 / 80 / 60 Kg/ha
Düngung:	12.03. / 13.04. / 02.06.1998	10.03. / 11.04. / 31.05.1999	13.03. / 12.04. / 31.05.2000	08.03. / 05.04. / 24.05.2001	16.03. / 12.04. / 03.06.2002

*AHL: Ammonium-Nitrat-Harnstofflösung (Flüssigdünger)

Tab. 3: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf der Parzelle mit Mais 1998 - 2002

Kultur:	Mais*				
Erntejahr:	1998	1999	2000	2001	2002
Vorfrucht:	Winterweizen	Winterweizen	Winterweizen	Winterweizen	Winterweizen
Ernte der Vorfrucht:	16.08.97	15.08.98	04.08.99	11.08.00	22.08.01
Bearbeitung:	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2	s. Kap. 5.2.1.2
Aussaat:	13.05.98	10.05.99	27.04.00	11.05.01	10.05.02
Saatstärke:	10 Pfl./m ²	10 Pfl./m ²	10 Pfl./m ²	10 Pfl./m ²	10 Pfl./m ²
Sorte:	"Husar"	"Volvik"	"Nescio"	"Andante"	"Andante"
Pflanzen-schutz:	Berücksichtigung der im Erosionsmessversuch eingesetzten Herbizide				
Herbizide:	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat	s. Präparat
Präparat:	"Stentan"	"Stentan"	"Stentan"	"Stentan"	"Stentan"
Aufwand-menge:	6 l/ha	6 l/ha	6 l/ha	6 l/ha	6 l/ha
Untersuchte Wirkstoffe:	Metolachlor / Pendimethalin / Terbuthylazin	Metolachlor / Pendimethalin / Terbuthylazin	Metolachlor / Pendimethalin / Terbuthylazin	Metolachlor / Pendimethalin / Terbuthylazin	Metolachlor / Pendimethalin / Terbuthylazin
Wirkstoff-menge:	1450 g/ha / 990 g/ha / 750 g/ha	1450 g/ha / 990 g/ha / 750 g/ha	1450 g/ha / 990 g/ha / 750 g/ha	1450 g/ha / 990 g/ha / 750 g/ha	1450 g/ha / 990 g/ha / 750 g/ha
Applikation:	22.05.98	20.05.99	04.05.00	19.05.01	21.05.02
Fungizide:	keine	keine	keine	keine	keine
Insektizide:	keine	keine	keine	keine	keine
Dünger:	DAP* (Unterfußd.) / AHL*	DAP (Unterfußd.) / AHL	DAP (Unterfußd.) / AHL	DAP (Unterfußd.) / AHL	DAP (Unterfußd.) / AHL
Dünger-menge:	P: 46 kg/ha + N: 18 kg/ha / N: 120 kg/ha	P: 46 kg/ha + N: 18 kg/ha / N: 140 kg/ha	P: 46 kg/ha + N: 18 kg/ha / N: 120 kg/ha	P: 46 kg/ha + N: 18 kg/ha / N: 130 kg/ha	P: 46 kg/ha + N: 18 kg/ha / N: 140 kg/ha
Düngung:	s. Saattermin / 20.06.98	s. Saattermin / 22.06.99	s. Saattermin / 02.06.00	s. Saattermin / 09.06.01	s. Saattermin / 12.06.02

*Mais: Silomais zur Ganzpflanzen-Silage; *DAP: Diammonphosphat;

*AHL: Ammonium-Nitrat-Harnstofflösung (Flüssigdünger)

Tab. 4: Durchschnittserträge der Erntejahre 1998 - 2000 für die untersuchten Kulturen auf der Versuchsfläche

Kultur	Erträge der Erntejahre (dt/ha) je Variante*																								
	1998					1999					2000					2001					2002				
	Saat "Sorte"	Ernte	Variante			Saat "Sorte"	Ernte	Variante			Saat "Sorte"	Ernte	Variante			Saat "Sorte"	Ernte	Variante			Saat "Sorte"	Ernte	Variante		
			P*	M*	D*			P	M	D			P	M	D			P	M	D			P	M	D
Gerste*	11.09.97 "Teresa" 160 kg/ha	22.07.	33	25	30	24.09.98 "Nikel" 150 kg/ha	19.07.	70	62	61	13.09.99 "Nikel" 160 kg/ha	13.07.	68	69	71	27.09.00 "Nikel" 150 kg/ha	24.07.	57	52	54	22.09.01 "Nikel" 160 kg/ha	26.07.	69	66	66
Raps*	18.08.97 "Express" 6 kg/ha	23.07.	27	28	25	19.08.98 "Attila" 6 kg/ha	21.07	30	25	16	16.08.99 "Attila" 5 kg/ha	13.07.	32	32	31	24.08.00 "Magnum" 4 kg/ha	06.08.	30	28	24	18.08.01 "Magnum" 4 kg/ha	04.08.	28	27	n. n.*
Weizen*	11.09.97 "Ritmo" 180 kg/ha	15.08.	40	35	36	13.09.98 "Flair" 200 kg/ha	04.08.	75	73	74	13.09.99 "Maverick" 180 kg/ha	11.08.	73	73	74	27.09.00 "Maverick" 160 kg/ha	22.08.	87	82	75	11.10.01 "Maverick" 160 kg/ha	20.08.	78	76	74
Mais*	13.05.98 "Husar" 10 Pfl./m²	07.09.	76	95	70	10.05.99 "Volvik" 10 Pfl./m²	30.08.	82	84	n.n*	27.04.00 "Nescio" 10 Pfl./m²	05.09.	121	121	119	11.05.01 "Andante" 10 Pfl./m²	30.08.	97	107	91	10.05.02 "Andante" 10 Pfl./m²	04.09.	94	101	93

*Erträge der Erntejahre (dt/ha) = Durchschnittler Ertrag einer Variante aus 2 Ernteparzellen (2 x 90 qm)

*Wintergerste = Ertrag bereinigt bei 86 % TS

*Winterraps = Ertrag bereinigt bei 91 % TS

*Winterweizen = s. Wintergerste

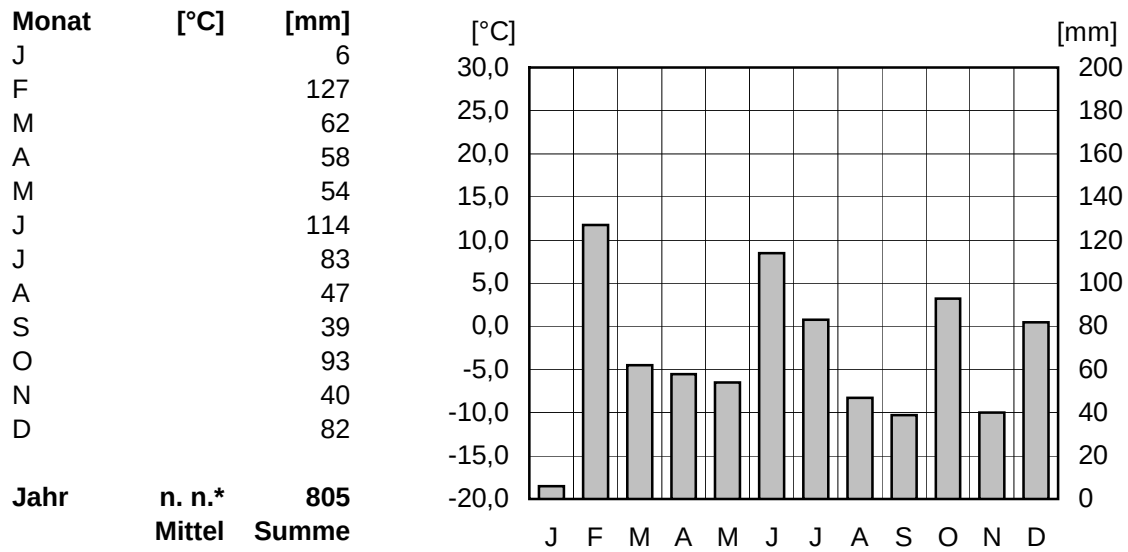
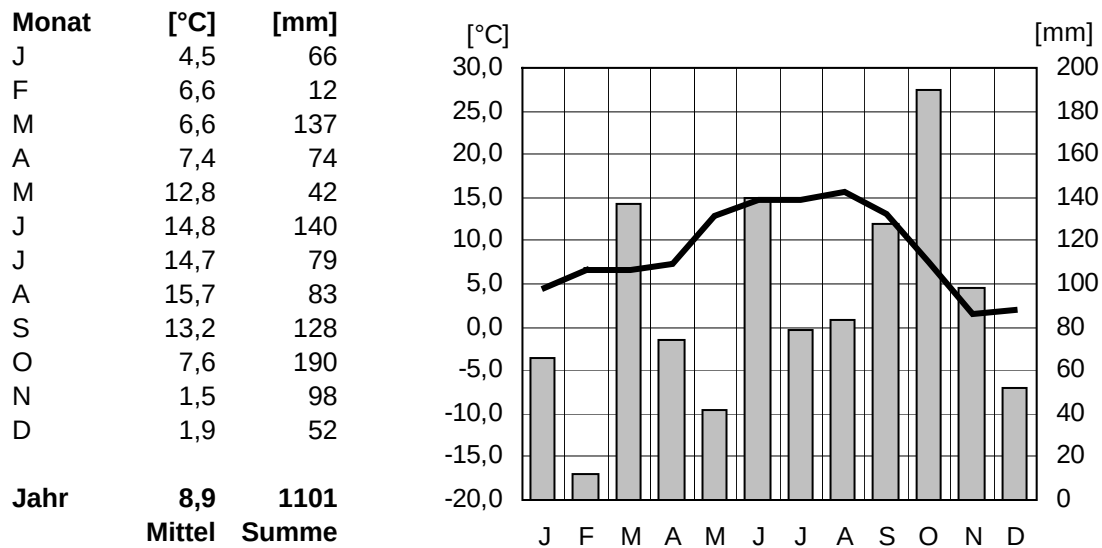
*Silomais = Ganzpflanzenertrag

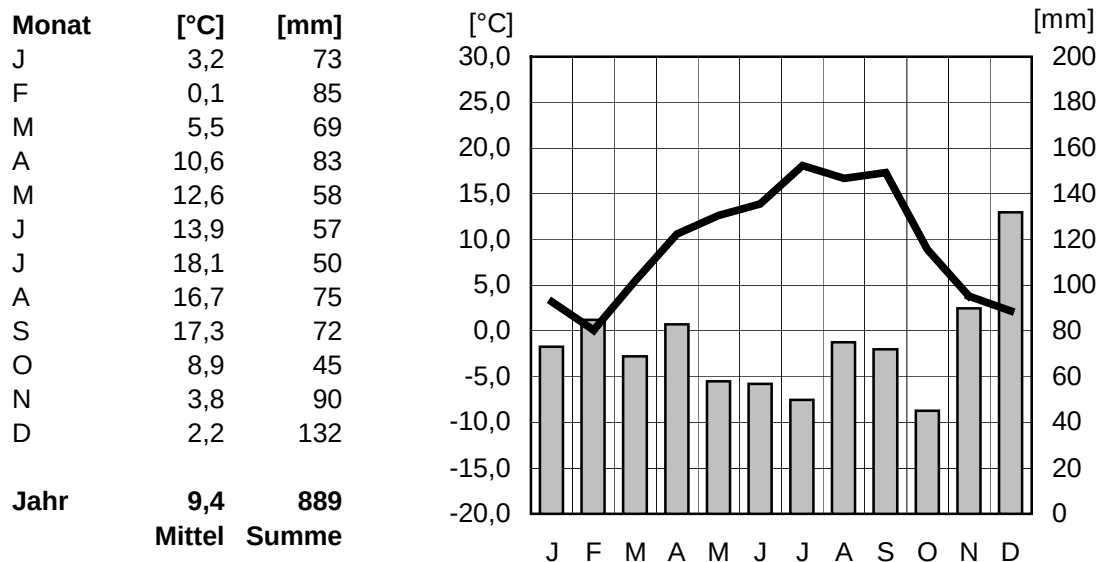
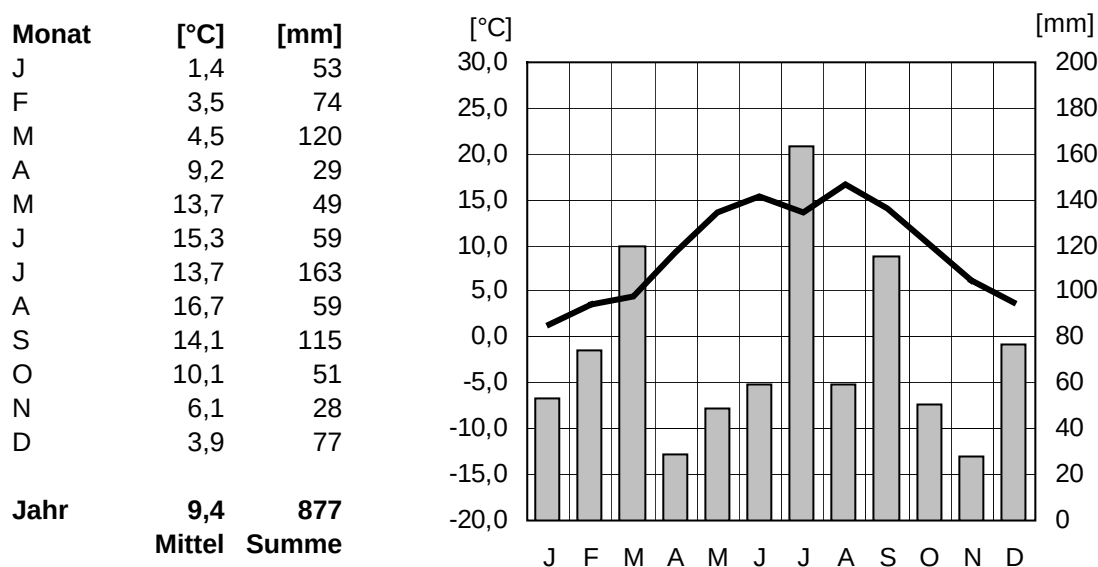
*P = Konventionelle Bearbeitungsvariante (Pflug)

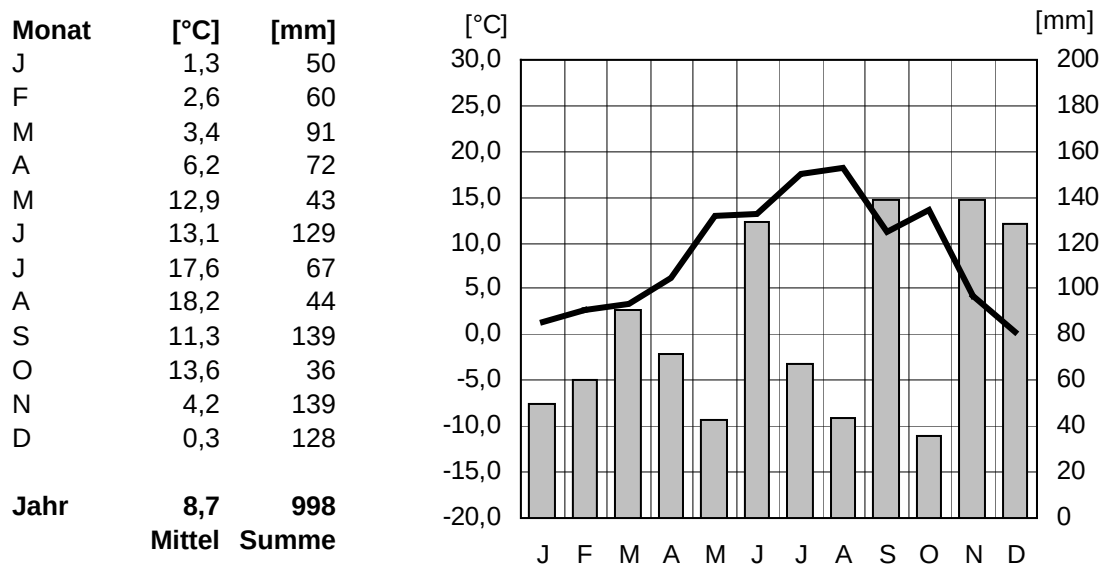
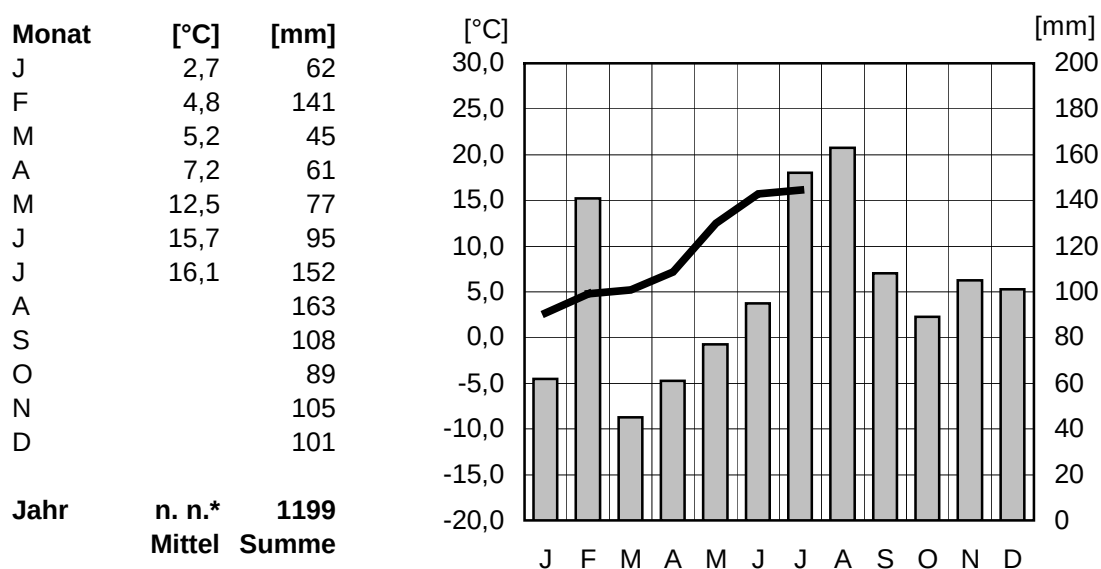
*M = Konservierende Bodenbearbeitung (Mulchsaat)

*D = Variante mit Direktsaat

*n. n.: nicht nachgewiesen

Tab. 5 und Abb. 13: Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1997**Tab. 6 und Abb. 14:** Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1998

Tab. 7 und Abb. 15: Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 1999**Tab. 8 und Abb. 16:** Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2000

Tab. 9 und Abb. 17: Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2001**Tab. 10 und Abb. 18:** Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Versuchsfläche des Jahres 2002

Tab. 11: Niederschlagsdaten zu den Oberflächenabflussereignissen der Versuchsjahre 1998, 1999 und 2001 im Mais sowie des Versuchsjahres 2000 im Winterraps

Ereignis	Variante	Regenbeginn (Datum/MEZ)*	Regenende (Datum/MEZ)	Regen- dauer (h:min)	Regen- summe (mm)	Regendauer b. Abfluss- beginn (h:min)	Regensumme b. Abfluss- beginn (mm)	Max. Regen- intensität (mm/min.)
Mais								
98/1	Pflug I	21.06.98 / 21:11	21.06.98 / 21:28			00:06	3,7	0,9
98/1	Pflug II	21.06.98 / 21:11	21.06.98 / 21:28			k. A.*	k. A.	0,9
98/1	Mulch I	21.06.98 / 21:11	21.06.98 / 21:28			k. A.	k. A.	0,9
98/1	Mulch II	21.06.98 / 21:11	21.06.98 / 21:28			k. A.	k. A.	0,9
98/1	Summe			00:17	5,2			
98/2	Pflug I	22.06.98 / 01:05	22.06.98 / 01:10			00:01	1	0,8
98/2	Pflug II	22.06.98 / 01:05	22.06.98 / 01:10			00:02	1,5	0,8
98/2	Mulch I	22.06.98 / 01:05	22.06.98 / 01:10			00:03	1,8	0,8
98/2	Mulch II	22.06.98 / 01:05	22.06.98 / 01:10			00:02	1,5	0,8
98/2	Summe			00:05	2,9			
98/3	Pflug I	22.06.98 / 3:59	22.06.98 / 04:10			00:01	1,1	0,6
98/3	Pflug II	22.06.98 / 3:59	22.06.98 / 04:10			00:02	1,3	0,6
98/3	Mulch I	22.06.98 / 3:59	22.06.98 / 04:10			00:03	1,7	0,6
98/3	Mulch II	22.06.98 / 3:59	22.06.98 / 04:10			00:02	1,5	0,6
98/3	Summe			00:11	2,9			
98/4	Pflug I	01.08.98 / 21:12	01.08.98 / 22:54			00:54	6,8	0,5
98/4	Pflug II					k. A.	k. A.	0,5
98/4	Mulch I					k. A.	k. A.	0,5
98/4	Mulch II					k. A.	k. A.	0,5
98/4	Summe			01:48	13,4			
99/1	Pflug I	12.07.99 / 19:14	12.07.99 / 19:39	00:24	12,7	00:07	6,4	1,8
99/1	Pflug II	12.07.99 / 19:14	12.07.99 / 19:39	00:24	12,7	00:06	5,7	1,8
99/2	Pflug I	19.07.99 / 22:07	19.07.99 / 22:16	00:08	6,2	00:04	4,2	1,2
99/2	Pflug II	19.07.99 / 22:07	19.07.99 / 22:16	00:08	6,2	00:04	4,2	1,2
99/3	Pflug I	20.07.99 / 03:05	20.07.99 / 03:52	00:46	4,8	00:12	2,9	0,5
99/3	Pflug II	20.07.99 / 03:05	20.07.99 / 03:52	00:46	4,8	00:10	2,1	0,5
01/1	P I	30.06.01 / 15:01	30.06.01 / 18:10	03:09	35	00:17	4,9	1,4
01/1	P II	"	"	"	"	00:17	4,9	1,4
01/1	M I	"	"	"	"	00:19	6,7	1,4
01/1	M II	"	"	"	"	k. A.	k. A.	1,4
Winterraps								
00 / 1	Pflug I	07.09.00 / 08:38	07.09.00 / 11:24	02:46	10,1	00:22	2	0,4
00 / 1	Pflug II	07.09.00 / 08:38	07.09.00 / 11:24	02:46	10,1	00:22	2	0,4
00 / 2	Pflug I	16.09.00 / 05:23	16.09.00 / 06:44	01:22	13,5	00:33	3,2	0,4
00 / 2	Pflug II	16.09.00 / 05:23	16.09.00 / 06:44	01:22	13,5	00:29	2,6	0,4
00 / 3	Pflug I	25.09.00 / 08:18	25.09.00 / 10:07	01:49	11,0	00:09	4,5	0,5
00 / 3	Pflug II	25.09.00 / 08:18	25.09.00 / 10:07	01:49	11,0	00:08	3,7	0,5
00 / 4	Pflug I	27.09.00 / 16:00	27.09.00 / 16:52	00:52	3,0	00:44	2,1	0,4
00 / 4	Pflug II	27.09.00 / 16:00	27.09.00 / 16:52	00:52	3,0	00:42	1,6	0,4

*MEZ: Mitteleuropäische Uhrzeit, *k. A.: Kein Abfluss

Tab. 12: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1998 im Mais

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Regen- menge (mm)	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Metolachlor- konzentr. (µg/l)	Pendimethalin- konzentr. (µg/l)	Terbuthylazin- konzentr. (µg/l)	Metolachlor- austrag (mg/ha)	Pendimethalin- austrag (mg/ha)	Terbuthylazin- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konz. (mg/l)	NH ₄ -N- konz. (mg/l)	PO ₄ -P- konz. (mg/l)	NO ₃ -N- austr. (g/ha)	NH ₄ -N- austr. (g/ha)	PO ₄ -P- austr. (g/ha)
Pflug I / 1	21.06.1998		0,02	80,40	0,60	98,00				5,87	0,16	0,17			
2			0,007	83,40	1,20	98,20				6,20	1,07	0,05			
3			0,007	81,60	0,60	97,60				5,74	1,20	0,06			
4			0,007	82,40	1,80	98,00				6,44	0,98	0,05			
5			0,007	83,00	0,80	98,00				5,81	0,00	0,07			
6			0,02	86,80	1,40	98,80				6,79	0,00	0,17			
Summe	21.06.1998	5,2	0,07 / 1,3				55,3	0,67	65,5				14,5	0,48	0,13
Pflug I / 7	22.06.98 (I)*		0,033	27,40	1,40	50,00				5,07	1,30	0,28			
8			0,033	22,00	1,20	27,20				5,74	0,34	0,85			
9			0,033	37,40	1,20	43,40				5,09	0,23	0,58			
10			0,033	28,60	1,20	35,20				7,02	0,02	0,31			
11			0,033	22,40	1,20	26,40				2,12	0,12	0,17			
Summe	22.06.98 (I)*	2,9	0,17 / 5,9				51,4	2,27	71,2				8,3	0,67	0,13
Pflug I / 12	22.06.98 (II)*		0,033	37,40	1,20	46,40				6,50	0,25	0,70			
13			0,033	20,40	1,20	24,60				5,01	0,16	0,20			
14			0,033	36,00	1,20	45,80				2,20	1,01	0,20			
15			0,067	21,80	1,40	25,40				3,33	0,10	0,45			
16			0,067	21,80	1,40	24,40				5,75	1,05	0,57			
Summe	22.06.98 (II)*	2,9	0,24 / 8,3				76,9	3,53	99,2				10,6	1,20	0,17
Pflug I / 1	01.08.1998		0,02	7,40	< 0,1	16,10				2,80	5,33	0,31			
2			0,007	5,40	< 0,1	14,60				8,74	2,76	0,09			
3			0,007	8,60	< 0,1	21,80				9,16	4,78	0,06			
4			0,007	5,40	< 0,1	13,60				10,94	4,61	0,18			
5			0,007	7,80	< 0,1	18,40				10,57	5,10	0,08			
6			0,02	7,40	< 0,1	17,40				12,99	7,01	0,52			
Summe	01.08.1998	13,4	0,07 / 0,5				4,7	0,13	11,3				5,7	3,6	0,07
Summe Mais 98		24,4	0,58 / 2,4				188,3	6,6	247,2				39,1	5,94	0,50
g/ha							0,19	0,01	0,25				39,1	5,94	0,50
% d. Appl.							0,01	< 0,01	0,03				0,03		< 0,05
Pflug II / 1	22.06.98 (I)*		0,02	23,60	1,20	27,20				8,60	1,98	0,41			
2			0,007	20,60	1,00	25,00				3,38	1,26	0,07			
3			0,007	17,40	1,00	20,60				6,72	1,24	0,12			
4			0,007	35,80	1,00	44,00				3,58	0,21	0,11			

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Fortsetzung der Tabelle 12:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Regen- menge (mm)	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Metolachlor- konzentr. (µg/l)	Pendimethalin- konzentr. (µg/l)	Terbuthylazin- konzentr. (µg/l)	Metolachlor- austrag (mg/ha)	Pendimethalin- austrag (mg/ha)	Terbuthylazin- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konz. (mg/l)	NH ₄ -N- konz. (mg/l)	PO ₄ -P- konz. (mg/l)	NO ₃ -N- austr. (g/ha)	NH ₄ -N- austr. (g/ha)	PO ₄ -P- austr. (g/ha)
Pflug II / 5			0,007	20,00	1,00	23,20				5,40	1,35	0,08			
6			0,02	41,00	1,20	49,60				3,18	0,72	0,31			
7			0,033	43,00	1,20	49,80				3,69	0,08	0,38			
Summe	22.06.98 (I)*	2,9	0,04 / 1,4				32,1	1,1	38,3				4,8	0,80	0,07
Pflug II / 8	22.06.98 (II)*		0,033	36,20	1,20	42,60				4,98	0,20	0,99			
9			0,033	38,80	1,00	45,80				6,85	0,26	0,37			
Summe	22.06.98 (II)*	2,9	0,07 / 2,4				7,1	0,20	8,4				3,9	0,13	0,07
Summe Mais 98		5,8	0,12 / 2,1				39,3	1,3	46,7				8,7	0,93	0,14
g/ha							0,04	< 0,01	0,05				8,7	0,93	0,14
% d. Appl.							< 0,01	< 0,01	0,01				0,01		
Mulch I / 1	22.06.98 (I)*		0,02	39,40	1,20	61,00				5,12	1,38	0,83			
2			0,007	34,20	1,00	54,00				4,69	0,74	0,10			
3			0,007	31,40	0,60	49,40				7,61	0,46	0,14			
4			0,007	33,20	0,20	51,60				6,93	0,90	0,10			
Summe	22.06.98 (I)*	2,9	0,05 / 1,7				16,1	0,33	25,2				1,6	0,20	0,07
Mulch I / 5	22.06.98 (II)*		0,007	36,00	1,00	55,40				13,18	0,93	0,14			
6			0,02	34,20	1,40	52,40				7,44	0,29	0,51			
Summe	22.06.98 (II)*	2,9	0,03 / 1,03				9,2	0,33	14,1				1,3	0,07	0,07
Summe Mais 98		5,8	0,08 / 1,4				25,3	0,01	39,3				2,9	0,26	0,14
g/ha							0,03	0,00	0,04				2,9	0,26	0,14
% d. Appl.							< 0,01	< 0,01	0,01						
Mulch II / 1	22.06.98 (I)*		0,02	34,40	1,00	57,20				4,17	1,68	0,23			
2			0,007	30,80	0,80	52,60				3,72	0,91	0,13			
3			0,007	29,80	0,20	51,40				3,08	0,55	0,08			
Summe	22.06.98 (I)*	2,9	0,03 / 1,0				12,7	0,27	21,5				0,73	0,20	0,07
Mulch II / 4	22.06.98 (II)*		0,007	29,00	0,20	48,60				3,75	0,57	0,06			
5			0,007	27,00	0,20	46,20				3,46	0,65	0,09			
Summe	22.06.98 (II)*	2,9	0,02 / 0,7				3,7	< 0,01	6,3				0,47	0,07	0,07
Summe Mais 98		5,8	0,05 / 0,9				16,4	< 0,001	27,8				1,2	0,26	0,14
g/ha							0,02	< 0,001	0,03				1,2	0,27	0,14
% d. Appl.							< 0,01	< 0,001	< 0,01						

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Tab. 13: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Sediment von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1998 im Mais

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Sedimentgehalt i. Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Metolachlor- konzentr. (µg/kg)	Pendimethalin- konzentr. (µg/kg)	Terbuthylazin- konzentr. (µg/kg)	Metolachlor- austrag (mg/ha)	Pendimethalin- austrag (mg/ha)	Terbuthylazin- austrag (mg/ha)	N-gesamt- gehalt (g/kg)	P- gesamt- gehalt (g/kg)	N-gesamt- gehalt (kg/ha)	P-gesamt- gehalt (kg/ha)
Pflug I / 1	21.06.1998	58,67		290,00	290,00	70,00				2,050	0,528		
2		60,35		310,00	330,00	90,00				2,070	0,519		
3		53,46		320,00	470,00	120,00				2,140	0,535		
4		50,65		280,00	240,00	80,00				2,111	0,552		
5		46,90		310,00	360,00	110,00				1,990	0,544		
6		32,04		270,00	260,00	80,00				2,070	0,587		
Summe	21.06.1998		32,00				9,9	10,4	3,5			0,066	0,017
Pflug I / 7	22.06.98 (I)*	70,51		220,00	370,00	70,00				1,770	0,487		
8		53,64		230,00	500,00	90,00				1,890	0,512		
9		56,41		250,00	660,00	110,00				1,820	0,489		
10		50,02		270,00	410,00	90,00				1,890	0,529		
11		50,16		230,00	270,00	80,00				1,880	0,525		
Summe	22.06.98 (I)*		93,33				22,4	41,3	8,2			0,17	0,047
Pflug I / 12	22.06.98 (II)*	66,94		300,00	410,00	80,00				1,850	0,500		
13		56,22		160,00	290,00	60,00				1,840	0,497		
14		49,86		190,00	330,00	70,00				1,810	0,515		
15		43,90		220,00	750,00	110,00				1,860	0,538		
16		46,79		180,00	280,00	70,00				1,740	0,498		
Summe	22.06.98 (II)*		162,00				34,0	66,7	12,6			0,29	0,082
Pflug I / 1	01.08.1998	17,27		230,00	510,00	100,00				n. n.*	n. n.		n. n.
2		15,63		230,00	680,00	120,00				n. n.	n. n.		n. n.
3		15,23		190,00	690,00	100,00				n. n.	n. n.		n. n.
4		12,39		210,00	720,00	100,00				n. n.	n. n.		n. n.
5		8,58		160,00	880,00	90,00				n. n.	n. n.		n. n.
6		2,94		160,00	170,00	140,00				n. n.	n. n.		n. n.
Summe	01.08.1998		11,33				2,2	6,9	1,2	n. n.	n. n.		n. n.
Summe Mais 98			4,48				68,5	125,3	25,6			0,53	0,15
g/ha							0,07	0,12	0,03				
% d. Appl.							0,01	0,01	0,003				
kg/ha			298,93									0,53	0,15

*n. n.: nicht nachgewiesen

Fortsetzung der Tabelle 13:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Sedimentgehalt i. Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Metolachlor- konzentr. (µg/kg)	Pendimethalin- konzentr. (µg/kg)	Terbuthylazin- konzentr. (µg/kg)	Metolachlor- austrag (mg/ha)	Pendimethalin- austrag (mg/ha)	Terbuthylazin- austrag (mg/ha)	N-gesamt- gehalt (g/kg)	P- gesamt- gehalt (g/kg)	N-gesamt- gehalt (kg/ha)	P-gesamt- gehalt (kg/ha)
Pflug II / 1	22.06.98 (I)*	43,88		240,00	620,00	50,00				2,610	0,622		
2		80,68		230,00	810,00	60,00				1,940	0,515		
3		82,25		230,00	980,00	90,00				1,990	0,502		
4		77,91		240,00	780,00	80,00				1,930	0,526		
Pflug II / 5		67,80		230,00	870,00	110,00				2,000	0,536		
6		45,06		280,00	850,00	120,00				1,940	0,592		
7		33,13		240,00	910,00	120,00				2,400	0,645		
Summe	22.06.98 (I)*		0,92				13,5	46,6	4,9			0,13	0,034
Pflug II / 8	22.06.98 (II)*	37,60		240,00	850,00	110,00				2,310	0,600		
9		22,36		170,00	730,00	100,00				2,300	0,612		
Summe	22.06.98 (II)*		0,39				5,3	20,5	2,7			0,059	0,015
Summe Mais 98			1,32				18,8	67,1	7,6			0,189	0,05
g/ha							0,02	0,07	0,01				
% d. Appl.							< 0,01	< 0,01	< 0,01				
kg/ha			87,40									0,19	0,05
Mulch I / 1	22.06.98 (I)*	39,58		220,00	600,00	60,00				2,680	0,633		
2		50,72		270,00	710,00	50,00				2,520	0,662		
3		34,26		350,00	410,00	50,00				2,550	0,615		
4		29,23		250,00	500,00	60,00				2,700	0,637		
Summe	22.06.98 (I)*		0,21				3,8	7,8	1,5			0,036	0,008
Mulch I / 5	22.06.98 (II)*	16,98		140,00	390,00	40,00				2,860	0,650		
6		16,62		210,00	610,00	60,00				2,630	0,624		
Summe	22.06.98 (II)*		0,07				0,82	2,4	0,23			0,012	0,003
Summe Mais 98			0,28				4,6	10,7	1,8			0,049	0,011
g/ha							0,01	0,01	0,002				
% d. Appl.							< 0,01	< 0,01	< 0,01				
kg/ha			18,46									0,05	0,01
Mulch II / 1	22.06.98 (I)*	61,73		210,00	590,00	40,00				2,180	0,564		
2		48,81		210,00	510,00	50,00				2,340	0,623		
3		34,53		210,00	710,00	60,00				2,700	0,652		
Summe	22.06.98 (I)*		0,28				3,9	11,3	0,93			0,044	0,011
Mulch II / 4	22.06.98 (II)*	32,82		230,00	390,00	40,00				2,610	0,629		
5		29,01		180,00	520,00	50,00				2,450	0,626		
Summe	22.06.98 (II)*		0,09				1,2	2,7	0,27			0,015	0,004
Summe Mais 98			0,37				5,2	14,1	1,2			0,06	0,015
g/ha							0,01	0,014	< 0,01				
% d. Appl.							< 0,01	< 0,01	< 0,01				
kg/ha			24,53									0,06	0,02

Tab. 14: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999 im Mais

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Regen- menge (mm)	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Metolachlor- konzentr. (µg/l)	Pendimethalin- konzentr. (µg/l)	Terbuthylazin- konzentr. (µg/l)	Metolachlor- austrag (mg/ha)	Pendimethalin- austrag (mg/ha)	Terbuthylazin- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konz. (mg/l)	NH ₄ -N- konz. (mg/l)	PO ₄ -P- konz. (mg/l)	NO ₃ -N- austr. (g/ha)	NH ₄ -N- austr. (g/ha)	PO ₄ -P- austr. (g/ha)
Pflug I / 1	12.07.1999		0,02	11,90	< 0,1	7,38				26,17	25,69	0,59			
2	12.07.1999		0,007	16,22	< 0,1	10,52				39,13	24,81	0,02			
3	12.07.1999		0,007	20,62	< 0,1	13,42				31,47	33,44	0,13			
4	12.07.1999		0,007	22,74	< 0,1	13,54				37,27	19,77	0,21			
5	12.07.1999		0,007	21,66	< 0,1	14,82				25,13	10,31	0,37			
Summe	12.07.1999	11,9	0,05 / 0,4		< 0,1		7,8	< 0,01	5,0				14,1	11,0	2,5
Pflug I / 1	19.07.1999		0,02	11,80	< 0,1	9,52				16,71	8,14	0,18			
2	19.07.1999		0,007	11,50	< 0,1	9,60				28,89	7,43	0,2			
3	19.07.1999		0,007	14,04	< 0,1	10,90				25,89	7,28	0,16			
Summe	19.07.1999	6,1	0,03 / 0,49		< 0,1		4,1	< 0,01	3,3				7,0	2,6	0,9
Pflug I / 1	20.07.1999		0,02	7,06	< 0,1	5,32				16,74	7,57	0,520			
2	20.07.1999		0,007	7,22	< 0,1	5,00				14,63	6,55	0,44			
Summe	20.07.1999	5,2	0,03 / 0,6		< 0,1		2,4	< 0,01	1,7				5,1	2,3	0,96
Summe Mais 99		22,5	0,11 / 0,5		< 0,1		14,2	< 0,01	9,9				26,3	15,9	4,9
g / ha							0,01	< 0,001	0,01				26,3	15,9	0,33
% d. Appl.							0,001	< 0,001	0,001				0,02		< 0,001
Pflug II / 1	12.07.1999		0,02	40,64	< 0,1	31,70				39,24	39,31	0,030			
2	12.07.1999		0,007	37,46	< 0,1	27,26				38,91	60,26	< 0,05			
3	12.07.1999		0,007	39,32	< 0,1	30,82				39,04	42,20	< 0,05			
4	12.07.1999		0,007	38,54	< 0,1	28,88				38,86	43,34	< 0,05			
5	12.07.1999		0,007	44,08	< 0,1	36,42				34,89	52,24	< 0,05			
6	12.07.1999		0,007	39,26	< 0,1	30,08				30,42	28,55	< 0,05			
7	12.07.1999		0,007	30,04	< 0,1	21,36				14,47	38,47	0,050			
8	12.07.1999		0,007	22,50	< 0,1	15,36				13,54	23,13	0,09			
9	12.07.1999		0,013	28,92	< 0,1	22,12				31,04	27,44	0,11			
10	12.07.1999		0,02	33,64	< 0,1	23,28				31,72	22,66	0,09			
11	12.07.1999		0,033	29,02	< 0,1	22,56				19,91	16,89	0,07			
Summe	12.07.1999	11,9	0,14 / 1,1		< 0,1		54,8	< 0,01	34,1				39,0	41,1	1,1
Pflug II / 1	19.07.1999		0,02	15,80	< 0,1	14,20				22,86	9,58	0,12			
2	19.07.1999		0,007	15,70	< 0,1	13,72				13,54	7,50	0,13			
3	19.07.1999		0,007	17,68	< 0,1	16,28				6,98	5,64	0,15			
4	19.07.1999		0,007	17,86	< 0,1	16,82				12,18	9,89	< 0,05			
5	19.07.1999		0,007	15,24	< 0,1	13,76				7,44	7,26	0,9			
6	19.07.1999		0,007	19,84	< 0,1	19,40				9,69	11,64	0,1			
7	19.07.1999		0,007	18,12	< 0,1	16,62				12,00	10,72	0,015			
8	19.07.1999		0,007	22,50	< 0,1	21,06				11,81	10,61	0,08			
Summe	19.07.1999	6,1	0,07 / 1,13		< 0,1		11,6	< 0,01	10,7				9,5	6,1	1,1
Pflug II / 1	20.07.1999		0,02	28,58	< 0,1	26,30				37,99	9,43	0,11			
2	20.07.1999		0,007	14,00	< 0,1	13,18				13,28	13,84	0,11			
Summe	20.07.1999	5,2	0,03 / 0,6		< 0,1		6,6	< 0,01	6,1				7,7	4,0	0,44
Summe Mais 99		22,5	0,24 / 1,1		< 0,1		73,0	< 0,01	51,0				56,2	51,2	2,6
g / ha							0,073	< 0,001	0,051				56,2	51,2	0,17
% d. Appl.							0,005	< 0,001	0,007				0,04		< 0,001

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Tab. 15: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Sediment von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999 im Mais

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Sedimentgehalt i. Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Metolachlor- konzentr. (µg/kg)	Pendimethalin- konzentr. (µg/kg)	Terbuthylazin- konzentr. (µg/kg)	Metolachlor- austrag (mg/ha)	Pendimethalin- austrag (mg/ha)	Terbuthylazin- austrag (mg/ha)	N-gesamt- gehalt (g/kg)	P-gesamt- gehalt (g/kg)	N-gesamt- gehalt (kg/ha)	P-gesamt- gehalt (kg/ha)
Pflug I / 1	12.07.1999	3,96		121,0	169,1	< 50				n. n.*	n. n.	n. n.	n. n.
2	12.07.1999	4,85		90,0	267,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
3	12.07.1999	2,41		127,0	305,0	51,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
4	12.07.1999	4,84		120,0	400,0	56,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
5	12.07.1999	4,07		n. n.	n. n.	n. n.*				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	12.07.1999		0,03				2,3	5,7	0,8	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Pflug I / 1	19.07.1999	12,03		71,0	307,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
2	19.07.1999	11,68		77,0	246,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
3	19.07.1999	7,68		165,0	250,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	19.07.1999		0,06				4,2	10,7	1,5	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Pflug I / 1	20.07.1999	3,14		87,0	235,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
2	20.07.1999	1,75		58,0	145,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	20.07.1999		0,01				0,2	0,5	0,1	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe Mais 99			0,09				6,6	16,9	2,3	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
g / ha							0,007	0,2	0,002	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
% d. Appl.							< 0,001	0,002	< 0,001	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
kg / ha			6,26										
Pflug II / 1	12.07.1999	15,01		166,0	612,0	58,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
2	12.07.1999	11,85		215,0	513,0	67,5				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
3	12.07.1999	8,88		161,0	461,0	70,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
4	12.07.1999	6,34		150,0	356,0	69,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
5	12.07.1999	5,16		162,0	437,0	70,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
6	12.07.1999	4,39		179,0	449,0	75,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
7	12.07.1999	10,03		138,0	510,0	54,5				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
8	12.07.1999	13,36		115,0	364,0	57,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
9	12.07.1999	17,56		126,0	358,0	67,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
10	12.07.1999	20,26		129,0	427,0	58,5				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
11	12.07.1999	8,68		122,0	465,0	60,5				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	12.07.1999		0,24				24,2	72,0	10,3	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Pflug II / 1	19.07.1999	20,9		58,0	145,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
2	19.07.1999	14,15		69,0	231,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
3	19.07.1999	26,49		87,0	358,0	55,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
4	19.07.1999	24,72		76,0	265,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
5	19.07.1999	30,65		73,0	208,0	< 50				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Pflug II / 6	19.07.1999	28,74		79,0	236,0	52,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
7	19.07.1999	29,57		96,0	277,0	63,5				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
8	19.07.1999	28,62		91,0	322,0	63,5				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	19.07.1999		0,25				13,4	43,4	8,7	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Pflug II / 1	20.07.1999	13,01		96,0	350,0	58,5				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
2	20.07.1999	15,52		83,0	441,0	64,5				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	20.07.1999		0,07				4,5	19,8	3,1	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe Mais 99			0,56				42,0	135,1	22,0	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
g / ha							0,04	0,135	0,02	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
% d. Appl.							0,02	0,09	0,02	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.

*n. n.: nicht nachgewiesen

Tab. 16: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2001 im Mais

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Regen- menge (mm)	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Metolachlor- konzentr. (µg/l)	Pendimethalin- konzentr. (µg/l)	Terbuthylazin- konzentr. (µg/l)	Metolachlor- austrag (mg/ha)	Pendimethalin- austrag (mg/ha)	Terbuthylazin- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konz. (mg/l)	NH ₄ -N- konz. (mg/l)	PO ₄ -P- konz. (mg/l)	NO ₃ -N- austr. (g/ha)	NH ₄ -N- austr. (g/ha)	PO ₄ -P- austr. (g/ha)
Pflug I / 2	30.06.2001	35,0	0,028	42,30	< 0,01	76,70				9,54	4,0	0,53			
8	30.06.2001	"	0,042	41,50	"	75,80				10,20	4,00	0,51			
14	30.06.2001	"	0,119	41,50	"	77,80				8,07	3,50	0,47			
20	30.06.2001	"	0,386	49,50	"	96,80				9,49	3,50	0,51			
Summe	30.06.2001		0,58 / 2,8												
g / ha	30.06.2001						0,25	< 0,01	0,48				53,9	21,5	2,9
% d. Appl.	30.06.2001						0,02	< 0,001	0,06						
kg / ha	30.06.2001												0,05	0,02	0,003
Pflug II	30.06.2001														
Summe	30.06.2001	35,0	2,2 / 12,3												
Summe Mais 01			2,2 / 12,3												
g / ha							0,96	< 0,01	1,8				204,6	81,4	12,1
% d. Appl.							0,07	< 0,001	0,25						
kg / ha													0,21	0,081	0,012
Mulch II/2	30.06.2001			56,20	< 0,01	32,10				17,00	5,00	0,68			
6	30.06.2001			71,80	"	42,30				19,20	6,00	0,75			
12	30.06.2001			34,00	"	23,70				6,76	3,00	0,84			
16	30.06.2001			36,00	"	25,70				5,76	3,00	1,03			
Summe	30.06.2001	35,0	0,57 / 3,94												
Summe Mais 01			0,57 / 3,9												
g / ha							0,28	< 0,01	0,18				70,6	24,7	4,8
% d. Appl.							0,02	< 0,001	0,02						
kg / ha													0,071	0,025	0,005

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Tab. 17: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Sediment von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2001 im Mais

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Sedimentgehalt i. Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Metolachlor- konzentr. (µg/kg)	Pendimethalin- konzentr. (µg/kg)	Terbuthylazin- konzentr. (µg/kg)	Metolachlor- austrag (mg/ha)	Pendimethalin- austrag (mg/ha)	Terbuthylazin- austrag (mg/ha)	N-gesamt- gehalt (g/kg)	P-gesamt- gehalt (g/kg)	N-gesamt- gehalt (kg/ha)	P-gesamt- gehalt (kg/ha)
Pflug I / 2	30.06.2001	20,01		360,0	330,0	240,0				n. n.*	n. n.	n. n.	n. n.
8	30.06.2001	27,23		430,0	540,0	300,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
14	30.06.2001	21,36		230,0	470,0	230,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
20	30.06.2001	24,03		320,0	840,0	360,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	30.06.2001		128,1				42,9	69,8	36,2	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe Mais 01	30.06.2001									n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
g / ha	30.06.2001						0,04	0,07	0,04	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
% d. Appl.	30.06.2001						0,003	0,01	0,005	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
kg / ha	30.06.2001		128,1							n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Pflug II	30.06.2001									n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	30.06.2001		1969,3				660,2	1100,4	560,3	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe Mais 01			1969,3							n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
g / ha							0,66	1,1	0,56	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
% d. Appl.							0,05	0,11	0,07	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
kg / ha			1969,3							n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Mulch I/2	30.06.2001	24,71		320,0	300,0	90,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
6	30.06.2001	18,59		560,0	790,0	160,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
12	30.06.2001	18,31		460,0	780,0	120,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
16	30.06.2001	26,6		390,0	850,0	140,0				n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe	30.06.2001		302,9				131,0	206,0	38,6	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Summe Mais 01										n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
g / ha							0,13	0,21	0,04	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
% d. Appl.							0,009	0,02	0,005	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
kg / ha			302,9										

*n. n.: nicht nachgewiesen

Tab. 18: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser der Pflugvariante (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2000 im Winterraps

Variante (Plot)	Ereignis-	Abfluss	Metazachlor-	Metazachlor-	NO ₃ -N-	NH ₄ -N-	PO ₄ -P-	NO ₃ -N-	NH ₄ -N-	PO ₄ -P-
Proben-	Datum	(mm)/	konzentr.	austrag	konzentr.	konzentr.	konzentr.	austrag	austrag	austrag
nummer		(% v. Ni.)*	(µg/l)	(mg/ha)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(g/ha)	(g/ha)	(g/ha)
Pflug I / 1	07.09.2000	0,02	11,00		0,48	1,73	0,11			
2	07.09.2000	0,007	66,70		2,10	5,65	0,80			
3	07.09.2000	0,007	69,10		1,15	3,94	1,25			
4	07.09.2000	0,007	68,50		0,57	4,98	1,93			
5	07.09.2000	0,007	42,90		0,38	0,86	0,71			
6	07.09.2000	0,007	32,00		0,48	1,38	0,20			
7	07.09.2000	0,007	30,00		0,99	1,02	0,23			
8	07.09.2000	0,007	29,20		0,35	0,67	0,20			
9	07.09.2000	0,01	32,00		0,26	1,25	0,33			
10	07.09.2000	0,02	45,80		0,67	1,53	0,71			
Summe	07.09.2000	0,11 / 1,12		40,0				0,8	2,5	0,7
Pflug I / 1	16.09.2000	0,02	73,00		2,55	2,06	0,09			
2	16.09.2000	0,007	58,90		1,10	0,83	0,05			
3	16.09.2000	0,007	67,80		1,13	1,05	0,08			
4	16.09.2000	0,007	72,90		2,37	0,94	0,00			
5	16.09.2000	0,007	63,10		1,06	0,97	0,00			
6	16.09.2000	0,007	58,30		1,04	1,00	0,00			
7	16.09.2000	0,007	80,50		1,87	1,19	0,00			
8	16.09.2000	0,007	67,80		1,89	1,12	0,00			
9	16.09.2000	0,01	87,40		0,66	0,99	0,06			
10	16.09.2000	0,02	68,10		0,82	1,12	0,2			
11	16.09.2000	0,03	56,20		1,50	1,28	0,06			
12	16.09.2000	0,03	56,80		0,64	0,96	0,05			
13	16.09.2000	0,007	73,10		0,43	0,84	0,00			
14	16.09.2000	0,007	56,60		0,68	0,81	0,09			
15	16.09.2000	0,007	61,20		1,02	0,79	0,00			
16	16.09.2000	0,05	60,80		0,79	1,06	0,06			
17	16.09.2000	0,03	71,00		0,26	0,81	0,08			
18	16.09.2000	0,07	76,40		0,55	1,36	0,09			
19	16.09.2000	0,07	87,20		0,31	0,83	0,07			
20	16.09.2000	0,1	95,20		0,65	0,88	0,05			
21	16.09.2000	0,1	73,90		0,90	0,91	0,07			
22	16.09.2000	0,38	73,40		1,68	0,87	0,05			
Summe	16.09.2000	0,98 / 9,7		750,4				11	10	0

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Fortsetzung der Tabelle 18:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Regen- menge (mm)	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Metazachlor- konzentr. (µg/l)	Metazachlor- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konz. (mg/l)	NH ₄ -N- konz. (mg/l)	PO ₄ -P- konz. (mg/l)	NO ₃ -N- austr. (g/ha)	NH ₄ -N- austr. (g/ha)	PO ₄ -P- austr. (g/ha)
Pflug I / 1	25.09.2000		0,02	19,10		35,14	3,02	0,00			
2	25.09.2000		0,007	17,10		19,45	3,56	0,00			
3	25.09.2000		0,007	18,40		15,09	3,91	0,00			
4	25.09.2000		0,007	15,90		7,41	4,31	0,00			
5	25.09.2000		0,007	20,70		9,09	4,94	0,06			
6	25.09.2000		0,007	22,20		8,92	3,02	0,00			
7	25.09.2000		0,007	23,30		22,25	2,23	0,00			
8	25.09.2000		0,007	25,00		28,12	3,80	0,05			
9	25.09.2000		0,01	24,70		25,30	5,47	0,06			
10	25.09.2000		0,02	20,30		18,82	3,83	0,00			
11	25.09.2000		0,03	24,10		6,65	3,04	0,00			
12	25.09.2000		0,03	24,00		5,98	2,25	0,06			
13	25.09.2000		0,007	24,40		10,40	2,94	0,070			
14	25.09.2000		0,007	21,40		6,18	3,86	0,060			
15	25.09.2000		0,007	21,70		7,23	3,86	0,00			
16	25.09.2000		0,05	24,80		5,75	3,56	0,00			
17	25.09.2000		0,03	24,50		4,24	2,81	0,00			
18	25.09.2000		0,07	18,90		2,09	2,00	0,00			
19	25.09.2000		0,07	20,00		1,23	2,09	0,00			
20	25.09.2000		0,1	17,30		5,70	1,34	0,00			
Summe	25.09.2000	11,0	0,54 / 4,9		110,3				41,6	13,5	0,04
Pflug I / 2	27.09.2000		0,03	17,00		3,30	3,44	0,00			
4	27.09.2000		0,01	15,60		10,78	2,97	0,00			
5	27.09.2000		0,07	18,90		6,87	2,76	0,00			
7	27.09.2000		0,01	18,80		8,23	3,10	0,00			
8	27.09.2000		0,007	18,10		6,43	2,63	0,00			
10	27.09.2000		0,03	18,70		4,66	2,06	0,00			
11	27.09.2000		0,03	21,50		5,34	2,50	0,00			
13	27.09.2000		0,04	27,50		4,26	2,48	0,00			
Summe	27.09.2000	3,0	0,18 / 6,0		40,1				9,3	4,6	0,00
Summe Raps 00		37,6	1,81 / 4,8						62,9	29,6	14,7
g / ha					0,94				62,9	29,6	0,98
% d. Appl.					0,13						
kg / ha											

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Fortsetzung der Tabelle 18:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Regen- menge (mm)	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Metazachlor- konzentr. (µg/l)	Metazachlor- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konz. (mg/l)	NH ₄ -N- konz. (mg/l)	PO ₄ -P- konz. (mg/l)	NO ₃ -N- austr. (g/ha)	NH ₄ -N- austr. (g/ha)	PO ₄ -P- austr. (g/ha)
Pflug II / 1	07.09.2000		0,02	22,00		0,57	1,84	0,2			
2	07.09.2000		0,007	35,40		0,60	0,58	0,13			
3	07.09.2000		0,007	35,40		0,25	0,17	0,14			
4	07.09.2000		0,007	37,60		0,30	0,37	0,09			
5	07.09.2000		0,007	24,40		0,37	1,11	0,3			
6	07.09.2000		0,007	39,40		0,29	0,51	0,14			
7	07.09.2000		0,007	40,10		1,18	0,60	0,06			
8	07.09.2000		0,007	34,25		0,97	0,00	0,09			
9	07.09.2000		0,01	41,80		0,43	1,66	0,07			
10	07.09.2000		0,02	32,70		0,22	1,19	0,10			
11	07.09.2000		0,03	36,10		1,15	1,33	0,05			
12	07.09.2000		0,03	36,40		0,64	0,78	0,09			
13	07.09.2000		0,007	42,40		0,64	0,77	0,05			
14	07.09.2000		0,007	40,70		0,38	0,81	0,00			
15	07.09.2000		0,007	42,00		0,85	0,83	0,05			
16	07.09.2000		0,05	41,90		0,56	0,98	0,00			
17	07.09.2000		0,03	34,60		0,77	1,33	0,00			
18	07.09.2000		0,07	43,88		0,76	1,34	0,09			
Summe	07.09.2000	10,1	0,35 / 3,5		134,4				2,4	4,0	0,29
Pflug II / 1	16.09.2000		0,02	76,80		0,87	1,69	0,00			
2	16.09.2000		0,007	80,40		0,92	1,59	0,00			
3	16.09.2000		0,007	72,50		1,59	1,38	0,00			
4	16.09.2000		0,007	72,90		1,56	1,11	0,00			
5	16.09.2000		0,007	86,00		1,54	1,41	0,06			
6	16.09.2000		0,007	90,50		1,25	0,81	0,00			
7	16.09.2000		0,007	88,10		0,76	1,04	0,00			
8	16.09.2000		0,007	76,20		1,25	1,25	0,00			
9	16.09.2000		0,01	80,80		3,09	1,82	0,05			
10	16.09.2000		0,02	74,00		1,13	1,02	0,06			
11	16.09.2000		0,03	63,50		1,25	0,98	0,08			
12	16.09.2000		0,03	64,30		1,66	1,24	0,00			
13	16.09.2000		0,007	75,90		1,27	1,44	0,00			
14	16.09.2000		0,007	77,00		2,04	1,23	0,17			
15	16.09.2000		0,007	75,30		1,23	0,99	0,00			
16	16.09.2000		0,05	73,70		0,83	0,98	0,00			
17	16.09.2000		0,03	67,60		1,22	1,14	0,00			
18	16.09.2000		0,07	66,90		0,56	1,25	0,00			
19	16.09.2000		0,07	87,20		2,12	0,96	0,00			
20	16.09.2000		0,1	52,40		1,01	1,45	0,11			
21	16.09.2000		0,12	72,30		1,15	0,90	0,07			
22	16.09.2000		0,1	63,90		27,71	25,59	0,05			
Summe	16.09.2000	13,5	0,71 / 5,28		470,2				9,9	9,2	0,57

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Fortsetzung der Tabelle 18:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Regen- menge (mm)	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Metazachlor- konzentr. (µg/l)	Metazachlor- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konz. (mg/l)	NH ₄ -N- konz. (mg/l)	PO ₄ -P- konz. (mg/l)	NO ₃ -N- austr. (g/ha)	NH ₄ -N- austr. (g/ha)	PO ₄ -P- austr. (g/ha)
Pflug II / 1	25.09.2000		0,02	15,30		8,44	3,06	0,00			
2	25.09.2000		0,007	17,80		9,79	3,17	0,00			
3	25.09.2000		0,007	18,10		8,26	2,90	0,00			
4	25.09.2000		0,007	18,70		8,81	2,60	0,00			
5	25.09.2000		0,007	18,60		23,97	1,79	0,00			
6	25.09.2000		0,007	19,30		7,24	3,09	0,00			
7	25.09.2000		0,007	21,00		16,48	2,20	0,00			
8	25.09.2000		0,007	19,50		40,47	2,11	0,00			
9	25.09.2000		0,01	20,00		36,83	2,14	0,00			
10	25.09.2000		0,02	19,00		27,78	2,44	0,00			
11	25.09.2000		0,03	21,90		13,50	2,43	0,00			
12	25.09.2000		0,03	25,20		46,91	2,12	0,00			
13	25.09.2000		0,007	28,30		26,24	2,70	0,00			
14	25.09.2000		0,007	33,50		28,32	2,22	0,00			
15	25.09.2000		0,007	27,70		29,89	1,94	0,00			
16	25.09.2000		0,05	32,80		27,92	2,90	0,00			
17	25.09.2000		0,03	24,40		10,93	2,08	0,00			
18	25.09.2000		0,07	16,40		11,44	2,13	0,00			
19	25.09.2000		0,07	26,50		8,24	2,44	0,00			
20	25.09.2000		0,1	24,90		9,48	1,87	0,00			
21	25.09.2000		0,1	19,10		3,32	1,90	0,00			
22	25.09.2000		0,07	19,70		5,92	1,75	0,00			
23	25.09.2000		0,53	18,80		3,28	1,84	0,00			
Summe	25.09.2000	11,0	1,2 / 10,91		250,2				216,1	27,6	0,00
Pflug II / 2	27.09.2000		0,03	23,40		2,20	1,84	0,00			
4	27.09.2000		0,01	18,70		3,84	2,06	0,00			
5	27.09.2000		0,07	16,50		1,58	2,18	0,00			
7	27.09.2000		0,01	16,80		5,88	1,98	0,00			
8	27.09.2000		0,007	17,10		5,98	1,67	0,00			
10	27.09.2000		0,03	16,70		2,77	1,88	0,00			
11	27.09.2000		0,007	18,50		4,36	2,22	0,00			
13	27.09.2000		0,03	18,80		2,12	1,87	0,00			
14	27.09.2000		0,007	19,20		10,82	1,92	0,00			
16	27.09.2000		0,03	22,20		11,24	2,21	0,00			
17	27.09.2000		0,007	23,70		6,18	1,83	0,00	12,1	5,0	
Summe	27.09.2000	3,0	0,31 / 10,44		60,2				151,8	59,2	0,00
Summe Raps 00			2,57 / 6,8						151,8	59,2	1,55
g / ha					0,92						
% d. Appl.					0,12				0,15		
kg / ha											

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Tab. 19: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Sediment der Pflugvariante (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2000 im Wintertraps

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Sediment- gehalt im Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Metazachlor- konzentr. (µg/kg)	Metazachlor- austrag (mg/ha)	N-gesamt- gehalt (g/kg)	P-gesamt- gehalt (g/kg)	N-gesamt- austr. (kg/ha)	P-gesamt- austr. (kg/ha)
Pflug I / 1	07.09.2000	n.n.*		150,00		n. n.*	n. n.		
2	07.09.2000	5,1		170,00			"		
3	07.09.2000	2,4		n. n.			"		
4	07.09.2000	1,4		200,00			"		
5	07.09.2000	4,7		200,00			"		
6	07.09.2000	8,1		110,00			"		
7	07.09.2000	8,2		160,00			"		
8	07.09.2000	7,8		170,00			"		
9	07.09.2000	4,1		n. n.			"		
10	07.09.2000	1,6		140,00			"		
Summe	07.09.2000		64,7		10,5		0,57		0,002
Pflug I / 1	16.09.2000	7,6		100,00			0,57		
2	16.09.2000	10,9		70,00			n. n.		
3	16.09.2000	12,0		80,00			"		
4	16.09.2000	11,3		100,00			"		
5	16.09.2000	9,6		80,00			"		
6	16.09.2000	7,7		100,00			"		
7	16.09.2000	7,0		80,00			"		
8	16.09.2000	6,2		70,00			"		
9	16.09.2000	5,3		70,00			"		
10	16.09.2000	4,3		110,00			"		
11	16.09.2000	22,3		50,00			0,57		
12	16.09.2000	25,1		170,00			0,55		
13	16.09.2000	21,8		150,00			0,51		
14	16.09.2000	26,6		140,00			0,52		
15	16.09.2000	26,9		170,00			0,54		
16	16.09.2000	25,4		140,00			0,52		
17	16.09.2000	23,7		220,00			0,53		
18	16.09.2000	23,5		270,00			0,50		
19	16.09.2000	18,0		100,00			0,52		
20	16.09.2000	10,8		90,00			n. n.		
21	16.09.2000	8,6		120,00			"		
22	16.09.2000	8,2		90,00			"		
Summe	16.09.2000		1917,6		224,5				0,1

*n. n.: nicht nachgewiesen

Fortsetzung der Tabelle 19:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Sediment- gehalt im Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Metazachlor- konzentr. (µg/kg)	Metazachlor- austrag (mg/ha)	N-gesamt- gehalt (g/kg)	P-gesamt- gehalt (g/kg)	N-gesamt- austr. (kg/ha)	P-gesamt- austr. (kg/ha)
Pflug I / 1	25.09.2000	5,22		< 50		n. n*	n. n		
2	25.09.2000	5,32		"			"		
3	25.09.2000	5,25		"			"		
4	25.09.2000	4,63		"			"		
5	25.09.2000	4,07		"			"		
6	25.09.2000	3,74		"			"		
7	25.09.2000	3,15		"			"		
8	25.09.2000	2,62		"			"		
9	25.09.2000	2,02		"			"		
10	25.09.2000	2,92		"			"		
11	25.09.2000	2,89		"			"		
12	25.09.2000	1,4		"			"		
13	25.09.2000	1,2		"			"		
14	25.09.2000	0,89		"			"		
15	25.09.2000	0,61		"			"		
16	25.09.2000	2,98		"			"		
17	25.09.2000	4,25		"			"		
18	25.09.2000	3,07		"			"		
19	25.09.2000	1,7		"			"		
20	25.09.2000	2,95		"			"		
Summe	25.09.2000		233,9				0,5		0,008
Pflug I / 2	27.09.2000	11,81		< 50			0,6		
4	27.09.2000	12,56		"			0,5		
5	27.09.2000	13,18		"			0,6		
7	27.09.2000	12,25		"			n. n		
8	27.09.2000	13,07		"			"		
10	27.09.2000	11,37		"			"		
11	27.09.2000	9,25		"			"		
13	27.09.2000	4,26		"			"		
Summe	27.09.2000		256,4						0,009
Summe Raps 00			2472,5						
g / ha				0					
% d. Appl.				0					
kg / ha			2472,5						0,09

*n. n.: nicht nachgewiesen

Fortsetzung der Tabelle 19:

Variante (Plot)	Ereignis- datum	Sediment- gehalt im Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Metazachlor- konzentr. (µg/kg)	Metazachlor- austrag (mg/ha)	N-gesamt- gehalt (g/kg)	P-gesamt- gehalt (g/kg)	N-gesamt- austr. (kg/ha)	P-gesamt- austr. (kg/ha)
Pflug II / 1	07.09.2000	n. n.*		n. n.		n. n.	n. n.		
2	07.09.2000	"		"			"		
3	07.09.2000	"		"			"		
4	07.09.2000	"		"			"		
5	07.09.2000	"		"			"		
6	07.09.2000	"		"			"		
7	07.09.2000	"		"			"		
8	07.09.2000	3,8		180,00			"		
9	07.09.2000	8,6		190,00			"		
10	07.09.2000	9,9		240,00			"		
11	07.09.2000	7,8		250,00			"		
12	07.09.2000	7,2		70,00			"		
13	07.09.2000	6,5		250,00			"		
14	07.09.2000	7,6		140,00			"		
15	07.09.2000	7,5		110,00			"		
16	07.09.2000	4,8		100,00			"		
17	07.09.2000	4,2		80,00			"		
18	07.09.2000	1,6		120,00			"		
Summe	07.09.2000		230,3		36,84		0,570		0,01
Pflug II / 1	16.09.2000	n. n.		n. n.			n. n.		
2	16.09.2000	"		"			"		
3	16.09.2000	"		"			"		
4	16.09.2000	"		"			"		
5	16.09.2000	"		"			"		
6	16.09.2000	"		"			"		
7	16.09.2000	"		"			"		
8	16.09.2000	"		"			"		
9	16.09.2000	8,0		70,00			"		
10	16.09.2000	12,0		110,00			0,546		
11	16.09.2000	13,7		140,00			0,551		
12	16.09.2000	11,9		130,00			0,566		
13	16.09.2000	10,7		100,00			n. n.		
14	16.09.2000	11,3		120,00			"		
15	16.09.2000	11,1		180,00			"		
16	16.09.2000	8,80		190,00			n. n.*		
17	16.09.2000	8,50		< 50			"		
18	16.09.2000	7,30		"			"		
19	16.09.2000	3,70		"			"		
20	16.09.2000	27,60		"			0,537		
21	16.09.2000	25,80		"			0,512		
22	16.09.2000	1,20		"			n. n.		
Summe	16.09.2000		1240		173,63				0,044

*n. n.: nicht nachgewiesen

Fortsetzung der Tabelle 19:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Sediment- gehalt im Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Metazachlor- konzentr. (µg/kg)	Metazachlor- austrag (mg/ha)	N-gesamt- gehalt (g/kg)	P-gesamt- gehalt (g/kg)	N-gesamt- austr. (kg/ha)	P-gesamt- austr. (kg/ha)
Pflug II / 1	25.09.2000	11,6		< 50			n. n.*		
2	25.09.2000	11,97		"			"		
3	25.09.2000	9,56		"			"		
4	25.09.2000	9,33		"			"		
5	25.09.2000	9,79		"			"		
6	25.09.2000	9,42		"			"		
7	25.09.2000	10,27		"			"		
8	25.09.2000	10,98		"			"		
9	25.09.2000	11,34		"			"		
10	25.09.2000	10,48		"			"		
11	25.09.2000	9,11		"			"		
12	25.09.2000	6,68		"			"		
13	25.09.2000	5,37		"			"		
14	25.09.2000	5,51		"			"		
15	25.09.2000	5,07		"			"		
16	25.09.2000	3,20		"			"		
17	25.09.2000	4,39		"			"		
18	25.09.2000	6,02		"			"		
19	25.09.2000	3,33		"			"		
20	25.09.2000	4,36		"			"		
21	25.09.2000	7,19		"			"		
22	25.09.2000	10,75		"			"		
23	25.09.2000	5,72		"			"		
Summe	25.09.2000		1131,3				0,53		0,04
Pflug II / 2	27.09.2000	10,16		< 50					
4	27.09.2000	14,51		"			0,51		
5	27.09.2000	17,19		< 50			0,498		
7	27.09.2000	17,59		"			0,519		
8	27.09.2000	18,03		"			0,528		
10	27.09.2000	19,53		"			0,530		
11	27.09.2000	18,88		"			0,527		
13	27.09.2000	18,21		"			0,561		
14	27.09.2000	21,90		"			n. n.*		
16	27.09.2000	20,70		"			"		
17	27.09.2000	18,17		"			"		
Summe	27.09.2000		700,2						0,024
Summe Raps 00			3302,0						
g / ha									118,3
% d. Appl.									
kg / ha			3302,0						0,12

*n. n.: nicht nachgewiesen

Tab. 20: Niederschlagsdaten zu den Oberflächenabflussereignissen des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen

Ereignis	Variante Plot	Regenbeginn (Datum/Uhrzeit) (MEZ)*	Regenende (Datum/Uhrzeit) (MEZ)	Regen- dauer (h:min)	Regen- summe (mm)	Regendauer b. Abflussbeginn (h:min)	Regensumme b. Abflussbeginn (mm)	Max. Regen- intensität (mm/min.)
99/00/ 1	Pflug I	22.11.99 / 20:55	23.11.00 / 08:25	11:30	9,2	04:43	3,2	0,3
99/00/ 1	Pflug II	22.11.99 / 20:55	23.11.00 / 08:25	11:30	9,2	01:57	2,4	0,3
99/00/ 1	Mulch I	22.11.99 / 20:55	23.11.00 / 08:25	11:30	9,2	04:24	2,9	0,3
99/00/ 1	Mulch II	22.11.99 / 20:55	23.11.00 / 08:25	11:30	9,2	01:18	1,4	0,3
99/00/ 2	Pflug I	29.01.00 / 06:20	29.01.00 / 14:50	08:30	6,6	00:47	1,0	0,4
99/00/ 2	Mulch II	29.01.00 / 06:20	29.01.00 / 14:50	08:30	6,6	01:57	2,7	0,4
99/00/ 3	Pflug I	24.02.00 / 22:00	25.02.00 / 11:00	13:00	20,6	04:26	4,8	0,1
99/00/ 3	Pflug II	24.02.00 / 22:00	25.02.00 / 11:00	13:00	20,6	04:08	4,7	0,1
99/00/ 3	Mulch I	24.02.00 / 22:00	25.02.00 / 11:00	13:00	20,6	06:24	15,7	0,1
99/00/ 3	Mulch II	24.02.00 / 22:00	25.02.00 / 11:00	13:00	20,6	04:00	4,1	0,1
99/00/ 4	Pflug I	01.03.00 / 01:05	01.03.00 / 15:20	14:15	12,6	01:34	3,7	0,4
99/00/ 4	Pflug II	01.03.00 / 01:05	01.03.00 / 15:20	14:15	12,6	01:48	4,4	0,4
99/00/ 4	Mulch I	01.03.00 / 01:05	01.03.00 / 15:20	14:15	12,6	02:02	5,0	0,4
99/00/ 4	Mulch II	01.03.00 / 01:05	01.03.00 / 15:20	14:15	12,6	01:48	4,4	0,4
99/00/ 5	Pflug I	03.03.00 / 08:25	03.03.00 / 13:30	04:55	10,2	00:54	1,2	0,9
99/00/ 5	Pflug II	03.03.00 / 08:25	03.03.00 / 13:30	04:55	10,2	00:39	0,8	0,9
99/00/ 5	Mulch I	03.03.00 / 08:25	03.03.00 / 13:30	04:55	10,2	02:01	3,3	0,9
99/00/ 5	Mulch II	03.03.00 / 08:25	03.03.00 / 13:30	04:55	10,2	00:56	1,2	0,9
99/00/ 6	Pflug I	08.03.00 / 07:50	09.03.00 / 08:45	24:55	24,9	03:26	4,8	1,0
99/00/ 6	Pflug II	08.03.00 / 07:50	09.03.00 / 08:45	24:55	24,9	03:14	4,1	1,0
99/00/ 6	Mulch I	08.03.00 / 07:50	09.03.00 / 08:45	24:55	24,9	03:14	4,1	1,0
99/00/ 6	Mulch II	08.03.00 / 07:50	09.03.00 / 08:45	24:55	24,9	02:05	1,8	1,0
99/00/ 7	Pflug I	10.03.00 / 20:55	11.03.00 / 10:10	13:15	6,7	04:01	3,8	0,6
99/00/ 7	Pflug II	10.03.00 / 20:55	11.03.00 / 10:10	13:15	6,7	02:29	1,3	0,6
99/00/ 7	Mulch I	10.03.00 / 20:55	11.03.00 / 10:10	13:15	6,7	04:01	3,8	0,6
99/00/ 7	Mulch II	10.03.00 / 20:55	11.03.00 / 10:10	13:15	6,7	02:21	0,9	0,6
99/00/ 8	Pflug I	17.03.00 / 23:10	18.03.00 / 18:15	19:05	11,3	02:01	1,4	0,4
99/00/ 8	Pflug II	17.03.00 / 23:10	18.03.00 / 18:15	19:05	11,3	01:57	1,3	0,4
99/00/ 8	Mulch I	17.03.00 / 23:10	18.03.00 / 18:15	19:05	11,3	07:49	4,7	0,4
99/00/ 8	Mulch II	17.03.00 / 23:10	18.03.00 / 18:15	19:05	11,3	01:09	0,8	0,4

*(MEZ): Mitteleuropäische Uhrzeit

Tab. 21: Stoffkonzentrationen und -austräge im Runoff-Wasser von 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Sediment- gehalt im Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Chlortoluron- konzentr. (µg/l)	Isoproturon- konzentr. (µg/l)	Chlortoluron- austrag (mg/ha)	Isoproturon- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konzentr. (mg/l)	NH ₄ -N- konzentr. (mg/l)	PO ₄ -P- konzentr. (mg/l)	NO ₃ -N- austrag (g/ha)	NH ₄ -N- austrag (g/ha)	PO ₄ -P- austrag (g/ha)
Pflug I / 1	29.01.2000	0,02	n. n.*		2,36	< 0,1			10,04	2,40	< 0,05			
2	29.01.2000	0,007	n. n.		1,66	< 0,1			4,97	1,46	< 0,05			
Summe	29.01.2000	0,03 / 0,34	n. n.	n. n.			0,6	< 0,1				2,3	0,6	< 0,05
Pflug I / 1	25.02.2000	0,02			5,96	0,58			4,51	0,95	< 0,05			
2	25.02.2000	0,007	3,6		9,06	0,54			3,23	1,00	< 0,05			
3	25.02.2000	0,007	3,1		7,87	< 0,1			3,81	0,89	0,06			
4	25.02.2000	0,007	4,3		8,01	0,53			2,41	0,88	0,06			
5	25.02.2000	0,007	3,5		7,06	0,60			2,42	0,84	0,08			
6	25.02.2000	0,007	2,6		6,62	0,51			2,49	0,87	0,07			
Summe	25.02.2000	0,06 / 0,27		2,0			3,8	0,3				1,9	0,5	0,0
Pflug I / 1	01.03.2000	0,02	7,4		7,20	< 0,1			2,06	1,53	< 0,05			
2	01.03.2000	0,007	5,6		7,74	0,55			3,99	1,02	0,06			
3	01.03.2000	0,007	6		7,60	< 0,1			4,42	1,17	0,050			
4	01.03.2000	0,007	5,6		6,47	< 0,1			3,75	1,32	0,060			
5	01.03.2000	0,007	5,3		5,71	< 0,1			6,48	0,88	0,06			
6	01.03.2000	0,007			5,60	< 0,1			4,00	1,44	0,06			
Summe	01.03.2000	0,06 / 0,48		3,0			3,6	0,0				1,9	0,7	0,0
Pflug I / 1	03.03.2000	0,02	n. n.		8,82	0,72			4,10	1,20	0,050			
2	03.03.2000	0,007	n. n.		6,91	< 0,1			5,06	1,15	0,060			
3	03.03.2000	0,007	n. n.		6,12	< 0,1			1,11	0,87	0,05			
4	03.03.2000	0,007	n. n.		5,48	< 0,1			0,88	1,25	0,06			
Summe	03.03.2000	0,04 / 0,39		n. n.			3,0	0,1				1,3	0,5	0,0
Pflug I / 1	08.03.2000	0,02	n. n.		5,47	0,51			3,32	3,83	0,07			
2	08.03.2000	0,007	4,0		7,00	< 0,1			8,03	1,11	0,060			
3	08.03.2000	0,007	n. n.		6,24	< 0,1			5,36	1,35	0,06			
4	08.03.2000	0,007	4,8		5,66	< 0,1			3,76	1,07	0,06			
5	08.03.2000	0,007	7,1		7,93	< 0,1			5,94	0,8	0,08			
6	08.03.2000	0,007	5,8		8,87	< 0,1			3,91	0,77	0,06			
Summe	08.03.2000	0,06 / 0,24		2,2			3,5	0,1				2,5	1,1	0,0
Pflug I / 1	18.03.2000	0,02	n. n.		5,01	< 0,1			1,65	1,43	0,07			
2	18.03.2000	0,007	n. n.		5,35	0,50			2,67	2,36	0,08			
Summe	18.03.2000	0,03 / 0,27		n. n.			1,4	0,0				0,5	0,4	0,0
Sume Weizen 99/00							15,8	0,6				10,4	3,8	0,1
g / ha							0,0	< 0,001				10,4	3,8	0,1
% d. Appl.							0,0	< 0,001						

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Fortsetzung Tabelle 21:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Sediment- gehalt im Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Chlortoluron- konzentr. (µg/l)	Isoproturon- konzentr. (µg/l)	Chlortoluron- austrag (mg/ha)	Isoproturon- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konzentr. (mg/l)	NH ₄ -N- konzentr. (mg/l)	PO ₄ -P- konzentr. (mg/l)	NO ₃ -N- austrag (g/ha)	NH ₄ -N- austrag (g/ha)	PO ₄ -P- austrag (g/ha)
Pflug II / 1	23.11.1999	0,02	n. n.*		3,96	1,54			14,40	1,39	< 0,05			
2	23.11.1999	0,007	n. n.		4,07	1,56			9,16	1,75	< 0,05			
5	23.11.1999	0,007	n. n.		4,64	1,81			4,68	1,85	0,07			
6	23.11.1999	0,007	n. n.		3,79	1,53			3,47	1,63	0,1			
Summe	23.11.1999	0,05 / 0,54		n. n.			1,6	0,6				4,0	0,6	0,0
Pflug II / 1	25.02.2000	0,02	n. n.		2,06	< 0,1			3,33	0,80	< 0,05			
2	25.02.2000	0,007	n. n.		2,1	< 0,1			2,86	1,43	0,05			
4	25.02.2000	0,007	n. n.		2,75	0,62			1,44	1,20	0,07			
Summe	25.02.2000	0,03 / 0,17		n. n.			0,7	0,0				1,0	0,3	0,0
Pflug II / 1	01.03.2000	0,02	n. n.		2,98	0,52			1,25	0,93	< 0,05			
2	01.03.2000	0,007	n. n.		2,57	0,52			3,47	1,27	0,06			
3	01.03.2000	0,007	n. n.		2,70	< 0,1			3,44	1,48	< 0,05			
Summe	01.03.2000	0,03 / 0,24		n. n.			0,9	0,2				0,7	0,4	< 0,01
Pflug II / 1	03.03.2000	0,02	n. n.		3,47	< 0,1			1,09	1,04	0,15			
2	03.03.2000	0,007	n. n.		3,09	< 0,1			0,50	1,02	0,05			
3	03.03.2000	0,007	n. n.		1,98	< 0,1			1,54	1,69	< 0,05			
Summe	03.03.2000	0,03 / 0,29		n. n.			1,0	< 0,01				0,4	0,4	0,0
Pflug II / 1	08.03.2000	0,02	n. n.		3,43	< 0,1			3,69	1,65	0,07			
2	08.03.2000	0,007	n. n.		3,15	< 0,1			4,19	2,02	0,07			
3	08.03.2000	0,007	n. n.		3,61	0,49			4,05	1,81	0,08			
4	08.03.2000	0,007	n. n.		2,93	< 0,1			1,67	2,68	< 0,05			
5	08.03.2000	0,007	n. n.		3,87	0,51			2,85	2,04	0,08			
6	08.03.2000	0,007	n. n.		2,65	< 0,1			1,86	1,56	0,07			
Summe	08.03.2000	0,06 / 0,24		n. n.			1,8	0,1				1,7	1,0	0,0
Pflug II / 1	11.03.2000	0,02	n. n.		2,95	< 0,1			3,53	2,87	< 0,05			
2	11.03.2000	0,007	n. n.		3,78	< 0,1			1,55	2,46	0,06			
Summe	11.03.2000	0,03 / 0,45		n. n.			0,8	< 0,01				0,8	0,7	< 0,01
Pflug II / 1	18.03.2000	0,02	n. n.		3,72	< 0,1			4,82	4,38	0,06			
2	18.03.2000	0,007	n. n.		2,91	< 0,1			2,67	3,38	0,08			
Summe	18.03.2000	0,03 / 0,27		n. n.			0,9	< 0,01				1,1	1,1	0,0
Summe Weizen 99/00		0,26 / 0,27					7,9	0,9				9,7	3,9	0,1
g / ha							0,0	0,0				9,7	3,9	0,1
% d. Appl.							< 0,001	< 0,001						

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Fortsetzung Tabelle 21:

Variante (Plot) Proben- nummer	Ereignis- datum	Abfluss (mm)/ (% v. Ni.)*	Sediment- gehalt im Abfluss (g/l)	Boden- abtrag (kg/ha)	Chlortoluron- konzentr. (µg/l)	Isoproturon- konzentr. (µg/l)	Chlortoluron- austrag (mg/ha)	Isoproturon- austrag (mg/ha)	NO ₃ -N- konzentr. (mg/l)	NH ₄ -N- konzentr. (mg/l)	PO ₄ -P- konzentr. (mg/l)	NO ₃ -N- austrag (g/ha)	NH ₄ -N- austrag (g/ha)	PO ₄ -P- austrag (g/ha)
M I / 1	25.02.2000	0,02	n. n.*		< 0,1	2,01			5,36	0,83	< 0,05			
2	25.02.2000	0,007	n. n.		< 0,1	3,03			5,54	0,86	0,09			
Summe	25.02.2000	0,03 / 0,15		n. n.	< 0,1		< 0,01	0,6				1,4	0,2	0,0
M I / 1	08.03.2000	0,02	n. n.		0,76	4,65			3,11	3,39	0,08			
2	08.03.2000	0,007	2,49		0,53	3,77			2,09	1,82	0,11			
3	08.03.2000	0,007	3,2		< 0,1	3,98			1,39	1,36	0,27			
Summe	08.03.2000	0,04 / 0,16		0,7			0,2	1,4				0,9	0,9	0,0
Summe Weizen 99/00		0,07 / 0,16		0,7			0,2	1,5				2,3	1,1	0,0
g / ha							< 0,001	0,0				2,3	1,1	0,0
% d. Appl.							< 0,001	< 0,001						
M II / 1	29.01.2000	0,02	n. n.		0,90	4,99			15,60	0,51	< 0,05			
2	29.01.2000	0,007	n. n.		0,67	2,65			5,65	0,59	< 0,05			
3	29.01.2000	0,007	n. n.		0,79	2,80			6,00	0,87	< 0,05			
Summe	29.01.2000	0,03 / 0,45		n. n.			0,3	1,4				1,9	0,2	< 0,01
M II / 1	25.02.2000	0,02	n. n.		1,25	4,66			3,50	1,69	< 0,05			
2	25.02.2000	0,007	n. n.		0,97	4,57			0,60	1,18	0,08			
3	25.02.2000	0,007	n. n.		0,62	3,74			0,88	1,25	0,08			
Summe	25.02.2000	0,03 / 0,15		n. n.			0,4	1,5				0,8	0,5	0,0
M II / 1	01.03.2000	0,02	n. n.		1,01	5,56			4,59	1,25	< 0,05			
2	01.03.2000	0,007	n. n.		1,04	5,50			5,30	1,27	0,050			
Summe	01.03.2000	0,03 / 0,24		n. n.			0,3	1,5				1,3	0,3	< 0,01
M II / 1	03.03.2000	0,02	n. n.		0,79	4,94			0,92	1,33	0,08			
2	03.03.2000	0,007	n. n.		0,8	5,55			1,93	1,70	0,15			
Summe	03.03.2000	0,03 / 0,29		n. n.			0,2	1,4				0,3	0,4	0,0
M II / 1	08.03.2000	0,02	n. n.		0,7	4,51			3,41	1,53	0,06			
2	08.03.2000	0,007	n. n.		0,8	4,92			4,85	1,14	< 0,05			
3	08.03.2000	0,007	n. n.		0,61	4,63			2,90	0,72	0,07			
4	08.03.2000	0,007	n. n.		0,75	4,38			5,89	2,04	< 0,05			
5	08.03.2000	0,007	n. n.		0,79	4,81			4,45	2,77	0,05			
Summe	08.03.2000	0,05 / ,2		n. n.			0,3	2,2				1,9	0,8	0,0
Mulch II / 1	11.03.2000	0,02	n. n.		0,50	3,53			2,110	3,470	< 0,05			
2	11.03.2000	0,007	n. n.		0,71	4,36			3,100	2,520	< 0,05			
Summe	11.03.2000	0,03 / ,45		n. n.			0,1	1,0				0,6	0,9	< 0,01
Summe Weizen 99/00		0,25 / ,24					1,7	9,5				0,1	0,2	< 0,01
g / ha							0,0	0,0				7,2	3,4	0,1
% d. Appl.							< 0,001	< 0,001						

*(% v. Ni.): Abfluss relativ zum Niederschlag

Tab. 22: Stoffkonzentrationen und -austräge mit dem Zwischenabfluss in 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999/2000 im Winterweizen

Variante Proben- nummer	Ereignis- datum	Nieder- schlag (mm)	Abfluss- menge (l/3 m ²)*	Chlortoluron- konzentr. (µg/l)	Isoproturon- konzentr. (µg/l)	Chlortoluron- austrag (µg)	Isoproturon- austrag (µg)	NO ₃ -N- konzentr. (mg/l)	NH ₄ -N- konzentr. (mg/l)	PO ₄ -P- konzentr. (mg/l)	NO ₃ -N- austrag (mg)	NH ₄ -N- austrag (mg)	PO ₄ -P- austrag (mg)
Pflug I	22.02.2000	n. n.*	1,6	0,50	< 0,01	2,7	< 0,01	13,5	1,47	< 0,01	21,6	2,4	n. n.
Pflug I	29.02.2000	30,9	1,0	2,43	0,50	8,1	1,7	11,86	0,73	0,46	11,9	0,7	0,5
Pflug I	02.03.2000	12,8	1,0	1,77	< 0,01	5,9	< 0,01	7,91	0,67	< 0,01	7,9	0,7	n. n.
Pflug I	06.03.2000	13,3	1,0	2,06	< 0,01	6,9	< 0,01	17,51	0,60	< 0,01	17,5	0,6	n. n.
Pflug I	13.03.2000	36,8	1,0	0,96	1,11	3,2	3,7	7,16	0,73	0,26	7,2	0,7	0,3
Pflug I	15.03.2000	12,3	1,0	1,32	< 0,01	4,4	< 0,01	3,00	1,80	0,05	3,0	1,8	0,1
Pflug I	16.03.2000	1,6	1,0	2,80	< 0,01	9,3	< 0,01	6,72	0,78	0,07	6,7	0,8	0,1
Pflug I	17.03.2000	2,4	0,6	0,59	< 0,01	1,2	< 0,01	10,24	0,77	< 0,01	6,1	0,5	n. n.
Pflug I	18.03.2000	2,5	1,2	0,70	< 0,01	2,8	< 0,01	19,43	0,89	< 0,01	23,3	1,1	n. n.
Pflug I	20.03.2000	11,1	1,0	0,53	< 0,01	1,8	< 0,01	9,36	0,88	< 0,01	9,4	0,9	n. n.
Pflug I	27.03.2000	10,2	1,0	1,15	< 0,01	3,8	< 0,01	13,76	1,67	< 0,01	13,8	1,7	n. n.
Pflug I	29.03.2000	13,6	1,0	0,54	< 0,01	1,8	< 0,01	8,69	1,06	< 0,01	8,7	1,1	n. n.
Pflug I	31.03.2000	1,5	1,0	<0,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	8,28	1,32	0,06	8,3	1,3	0,1
Summe		149,0	11,2			51,9	5,4				145,4	14,3	1,0
% d. Appl.						< 0,001	< 0,001						
Pflug II	22.02.2000	n. n.	2,0	5,05	< 0,01	16,8	< 0,01	12,66	0,83	< 0,01	25,4	1,7	n. n.
Pflug II	29.02.2000	30,9	1,0	6,27	< 0,01	20,9	< 0,01	1,13	0,95	0,06	1,1	1,0	0,1
Pflug II	02.03.2000	12,8	1,0	6,35	< 0,01	21,2	< 0,01	3,34	0,64	< 0,01	3,3	0,6	n. n.
Pflug II	06.03.2000	13,3	1,0	6,09	< 0,01	20,3	< 0,01	0,56	0,61	< 0,01	0,6	0,6	n. n.
Summe		57,0	5,0			79,2	< 0,01				30,4	3,9	0,1
% d. Appl.						0,0	< 0,01						

*(l/3 m²): Flächenmaß des Dränvlises; *n. n.: nicht nachgewiesen

Fortsetzung Tabelle 22:

Variante Proben- nummer	Ereignis- datum	Nieder- schlag (mm)	Abfluss- menge (l/3 m ²)*	Chlortoluron- konzentr. (µg/l)	Isoproturon- konzentr. (µg/l)	Chlortoluron- austrag (µg)	Isoproturon- austrag (µg)	NO ₃ -N- konzentr. (mg/l)	NH ₄ -N- konzentr. (mg/l)	PO ₄ -P- konzentr. (mg/l)	NO ₃ -N- austrag (mg)	NH ₄ -N- austrag (mg)	PO ₄ -P- austrag (mg)
Mulch I	29.02.2000	30,9	1,0	0,93	0,68	3,1	2,3	13,74	1,68	0,12	13,7	1,9	0,1
Mulch I	02.03.2000	12,8	1,0	0,85	0,82	2,8	2,7	9,55	0,75	< 0,01	9,6	0,8	n. n.
Mulch I	06.03.2000	13,3	1,1	3,03	1,33	11,1	4,8	20,50	0,83	< 0,01	22,6	0,9	n. n.
Mulch I	13.03.2000	36,8	1,0	0,73	< 0,01	2,4	< 0,01	11,37	1,03	0,05	11,4	1,0	0,1
Mulch I	15.03.2000	12,3	1,0	1,22	0,79	4,1	2,6	6,86	0,92	0,05	6,9	0,9	0,1
Mulch I	16.03.2000	1,6	1,0	1,38	1,04	4,6	3,5	8,19	0,92	0,05	8,2	0,9	0,1
Mulch I	17.03.2000	2,4	1,2	1,01	0,90	4,1	3,6	6,57	0,77	0,09	7,9	1,0	0,1
Mulch I	18.03.2000	2,5	1,0	1,14	0,74	3,8	3,0	3,64	0,93	< 0,01	3,6	0,9	n. n.
Mulch I	20.03.2000	11,1	0,7	1,16	0,86	2,7	2,0	5,14	1,34	0,06	3,6	0,9	0,0
Mulch I	23.03.2000	0,0	1,0	0,93	1,44	3,1	3,4	7,04	1,24	0,05	7,0	1,2	0,1
Mulch I	27.03.2000	10,2	1,0	1,61	< 0,01	5,4	< 0,01	12,86	3,16	0,05	12,9	3,2	0,1
Mulch I	29.03.2000	13,6	1,0	0,73	0,52	2,4	1,7	11,46	2,71	0,08	11,5	2,7	0,1
Mulch I	31.03.2000	1,5	13	1,16	1,09	3,9	3,6	16,03	0,78	0,09	16,0	0,8	0,1
Summe		149,0	13,0			53,5	33,2				134,9	17,1	0,7
% d. Appl.						< 0,001	< 0,001						
Mulch II	02.03.2000	12,8	1,0	2,26	< 0,01	7,5	< 0,01	3,71	1,72	< 0,01	3,7	1,7	n. n.
Mulch II	06.03.2000	13,3	0,65	0,63	< 0,01	2,1	< 0,01	7,20	0,30	< 0,01	4,7	0,2	n. n.
Summe		26,1	1,65			9,6	< 0,01	10,90	2,00	< 0,01	8,4	1,9	n. n.
% d. Appl.						0,0	< 0,001						
Direkt I	02.03.2000	12,8	1,1	1,60	0,90	4,9	2,9	8,12	0,67	< 0,01	8,9	0,7	n. n.
Direkt I	06.03.2000	13,3	1,0	0,99	0,93	3,3	3,1	8,06	1,97	< 0,01	8,1	2,0	n. n.
Direkt I	13.03.2000	36,8	1,0	0,70	< 0,01	2,3	< 0,01	5,51	0,37	0,05	5,5	0,4	0,1
Direkt I	20.03.2000	19,1	0,65	0,60	0,60	3,2	3,1	5,79	1,63	0,05	3,8	1,1	0,03
Direkt I	27.03.2000	10,2	1,0	1,09	0,59	3,6	2,0	6,57	5,72	0,06	6,6	5,7	0,1
Direkt I	29.03.2000	13,6	1,0	0,81	0,80	2,7	2,7	5,35	1,24	< 0,01	5,4	1,2	n. n.
Summe		105,8	5,75			20,1	13,7				38,3	11,1	0,1
% d. Appl.						< 0,001	< 0,001						
Direkt II	29.02.2000	30,9	1,0	2,54	0,50	8,5	1,7	4,40	0,34	< 0,01	4,4	0,3	n. n.
Direkt II	02.03.2000	12,8	1,0	3,99	< 0,01	13,3	< 0,01	9,99	0,91	0,1	10,0	0,9	0,1
Direkt II	15.03.2000	62,4	0,0	2,48	< 0,01	8,3	< 0,01	5,13	1,00	0,08	5,1	1,0	0,1
Direkt II	27.03.2000	27,8	1,0	1,53	< 0,01	5,1	< 0,01	0,93	5,26	0,06	0,9	5,3	0,1
Direkt II	06.03.2000	13,3	0,0	3,41	< 0,01	11,4	< 0,01	0,66	0,65	0,05	0,7	0,7	0,1
Summe			3,0		< 0,01	46,5	1,7				21,1	8,2	0,3
% d. Appl.						< 0,001	< 0,001						

*(l/3 m²): Flächenmaß des Dränvlieses; *n. n.: nicht nachgewiesen

Tab. 23: Stoffkonzentrationen und -austräge mit dem Drainageabfluss in 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 2000 im Winterraps

Variante Proben- nummer	Ereignis- datum	Nieder- schlag (mm)	Regen- menge (l/120 m ²)*	Abfluss- rate (l/h)	Abfluss- menge (m ³)	Metazachlor- konzentr. (µg/l)	Metazachlor- austrag (g)	NO ₃ -N- konzentr. (mg/l)	NH ₄ -N- konzentr. (mg/l)	PO ₄ -P- konzentr. (mg/l)	NO ₃ -N- austrag (g)	NH ₄ -N- austrag (g)	PO ₄ -P- austrag (g)
Pflug I	15.09.1998	62,1	7452	432,0	5,40	58,40	0,32	15,96	0,20	0,69	86,4	1,1	3,7
Pflug I	16.09.1998	6,4	768	k. A.*	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.			
Pflug I	17.09.1998	14,6	1752	24,0	0,34	30,00	0,01	8,22	0,08	0,31	2,8	0,03	0,11
Pflug I	18.09.1998	0,8	96	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.			
Summe		83,9	10068		5,74		0,34				89,2	1,1	3,8
Pflug I	08.10.1998	9,1	1092	6,0	0,09	4,00	< 0,001	27,77	0,11	0,62	2,5	0,011	0,06
Pflug I	12.10.1998	10,6	1272	2,0	0,03	< 0,1		15,79	0,14	0,035	0,5	0,004	0,001
Pflug I	13.10.1998	6,6	792	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.		
Pflug I	14.10.1998	8,6	1032	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.		
Summe		34,9	4188		0,11		< 0,001				3,0	0,02	0,06
Summe Raps 98 (g)					5,85		0,34				92,2	1,1	3,9
% d. Appl.							0,045						
Mulch I	15.09.1998	62,1	7452	315,0	6,18	96,60	0,597	21,97	0,20	0,08	136,0	1,2	0,5
Mulch I	16.09.1998	6,4	768	190,0	3,73	42,20	0,157	19,97	0,16	0,09	74,6	0,6	0,3
Mulch I	17.09.1998	14,6	1752	112,0	1,31	31,40	0,041	20,66	0,17	2,44	27,5	0,2	3,2
Mulch I	18.09.1998	0,8	96	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.			
Summe		83,9	10068		11,22		0,795				238,1	2,0	4,0
Mulch I	08.10.1998	9,1	1092	9,0	0,15	< 0,1	< 0,001	21,33	0,19	0,54	3,2	0,03	0,08
Mulch I	12.10.1998	10,6	1272	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.			
Mulch I	13.10.1998	6,6	792	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.			
Mulch I	14.10.1998	8,6	1032	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.			
Summe		34,9	4188		0,15		< 0,001				3,2	0,03	0,08
Summe Raps 98 (g)					11,37		0,80				241,3	2,0	4,1
% d. Appl.							0,12						
Direkt I	15.09.1998	62,1	7452	280,0	5,06	60,60	0,307	35,57	0,33	0,06	180,1	1,7	0,3
Direkt I	16.09.1998	6,4	768	134,0	2,66	26,00	0,069	43,40	0,06	0,06	115,4	0,2	0,2
Direkt I	17.09.1998	14,6	1752	79,0	1,34	23,80	0,032	6,60	0,15	0,04	8,8	0,2	0,1
Direkt I	18.09.1998	0,8	96	36,0	0,48	< 0,1	< 0,001	9,75	0,10	0,06	4,7	0,1	0,0
Summe		83,9	10068		9,55		0,408				309,0	2,1	0,54
Direkt I	08.10.1998	9,1	1092	44,0	0,88	< 0,1	< 0,001	12,05	0,14	0,03	10,6	0,12	0,03
Direkt I	12.10.1998	10,6	1272	26,0	0,44	< 0,1	< 0,001	37,10	0,13	0,90	16,3	0,06	0,40
Direkt I	13.10.1998	6,6	792	9,0	0,13	< 0,1	< 0,001	25,49	0,04	0,04	3,3	0,01	0,01
Direkt I	14.10.1998	8,6	1032	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.			
Summe		34,9	4188		1,45		< 0,001				30,2	0,19	0,44
Summe Raps 98 (g)		268,0			12,78		< 0,001				339,2	3,0	0,98
% d. Appl.							< 0,001						

*(l/m²): Definierte Ackerfläche zwischen 2 Drainageabschnitten; *k. A.: kein Abfluss

Tab. 24: Stoffkonzentrationen und -austräge mit dem Drainageabfluss in 3 Bearbeitungsvarianten (Versuchsplots I + II) während des Versuchsjahres 1999(2000 im Winterweizen

Variante u. Probe Probennahme (MEZ)*	Ereignis- datum	Nieder- schlag (mm)	Abfluss- rate (l/h)	Abfluss- menge (m³)	Chlortoluron- konzentr. (µg/l)	Isoproturon- konzentr. (µg/l)	Chlortoluron- austrag (g)	Isoproturon- austrag (g)	NO ₃ -N- konzentr. (mg/l)	NH ₄ -N- konzentr. (mg/l)	PO ₄ -P- konzentr. (mg/l)	NO ₃ -N- austrag (g)	NH ₄ -N- austrag (g)	PO ₄ -P- austrag (g)
DI / 1 / 10:00	09.03.2000		360,0	1,83	< 0,1	< 0,1	< 0,001	< 0,001	2,66	1,02	0,17			
DI / 2 / 10:00	09.03.2000		360,0		"	"	"	"	4,03	0,93	0,18			
DI / 1 / 10:00	10.03.2000		225,0	2,74	"	"	"	"	1,79	0,73	0,12			
DI / 2 / 10:00	10.03.2000		225,0		"	"	"	"	1,89	0,86	0,09			
Summe 09. + 10.03.00		26,5		4,57	"	"	"	"				9,0	1,1	0,06
DI / 1 / 10:00	11.03.2000		60,0		< 0,1	< 0,1	< 0,001	< 0,001	9,56	1,34	0,05			
DI / 2 / 10:00	11.03.2000		58,1	0,34	"	"	"	"	16,67	0,58	0,06			
DI / 1 / 10:00	12.03.2000		28,8	0,74	"	"	"	"	1,28	0,83	0,05			
DI / 2 / 10:00	12.03.2000		28,8		"	"	"	"	11,12	1,13	0,07			
Summe 11. + 12.03.00		2,3		1,1	"	"	"	"				3,2	0,95	0,07
DI / 1 / 10:00	13.03.2000		67,9	0,41	< 0,1	< 0,1	< 0,001	< 0,001	0,98	0,85	0,07			
DI / 2 / 10:00	13.03.2000		67,9		"	"	"	"	1,84	1,18	0,06			
DI / 1 / 10:00	14.03.2000		70,6	0,67	"	"	"	"	3,73	0,84	0,08			
DI / 2 / 10:00	14.03.2000		70,6		"	"	"	"	4,16	0,68	0,07			
Summe 13. + 14.03.00		7,5		1,38	"	"	"	"				0,27	0,07	0,006
Summe Weizen 99/00 D I (g)				7,03	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001				23,4	6,1	0,83
% d. Appl.					"	"	"	"						
MI / 1 / 10:00	09.03.2000		720,0	2,7	8,27	< 0,1		< 0,001	1,61	0,77	1,17			
MI / 2 / 10:00	09.03.2000		720,0		8,55	"	0,023	"	1,10	0,43	1,22			
MI / 1 / 10:00	10.03.2000		60,0	0,6	4,89	"	"	"	1,68	1,89	1,74			
MI / 2 / 10:00	10.03.2000		60,0		4,99	"	0,003	"	1,04	1,09	1,63			
Summe 09. + 10.03.00		26,5		3,4		"	0,026	"				4,6	0,17	0,28
Summe Weizen 99/00 M I (g)							0,026	< 0,001				4,6	0,17	0,28
% d. Appl.							< 0,001	< 0,001						
PI / 1 / 10:00	09.03.2000		1800	6,7	5,56	< 0,1		< 0,001	1,03	0,41	1,83			
PI / 2 / 10:00	09.03.2000		1800		5,66	"	0,037	"	3,29	0,29	3,14			
PI / 1 / 10:00	10.03.2000		163,6	1,5	2,10	"	"	"	2,41	0,50	2,57			
PI / 2 / 10:00	10.03.2000		163,6		2,10	"	0,003	"	1,57	0,85	3,42			
Summe 09. + 10.03.00		26,5		8,2		"	0,04	"				17,7	3,7	21,3
PI / 1 / 10:00	11.03.2000		19	0,22	< 0,1	< 0,1	< 0,001	< 0,001	3,84	1,18	1,97			
PI / 2 / 10:00	11.03.2000		19		"	"	"	"	4,27	0,79	1,82			
PI / 1 / 10:00	12.03.2000		19	0,22	"	"	"	"	1,75	0,95	1,30			
PI / 2 / 10:00	12.03.2000		19		"	"	"	"	2,22	1,06	1,93			
Summe 11. + 12.03.00		7,5		0,44	"	"	"	"				1,30	0,44	0,77
Summe Weizen 99/00 P I (g)				8,66			0,07	< 0,001				19,0	4,1	22,1
% d. Appl.							0,006	"						

*(MEZ): Mitteleuropäische Uhrzeit

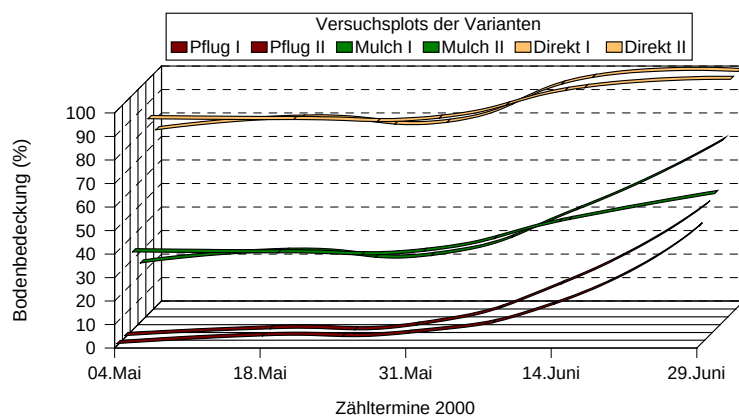


Abb. 19: Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2000 im Mais

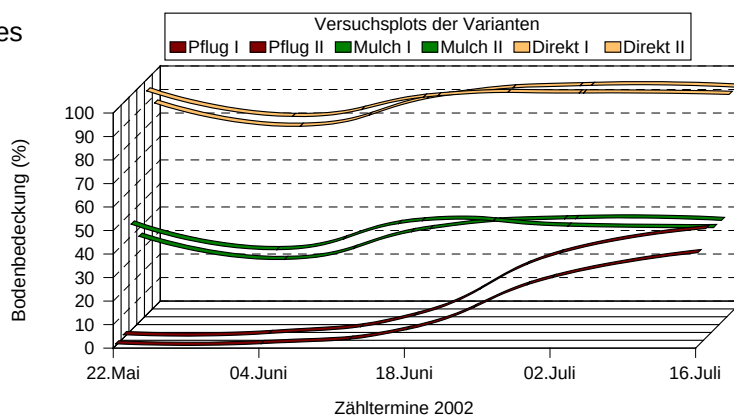


Abb. 20: Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2000 im Mais

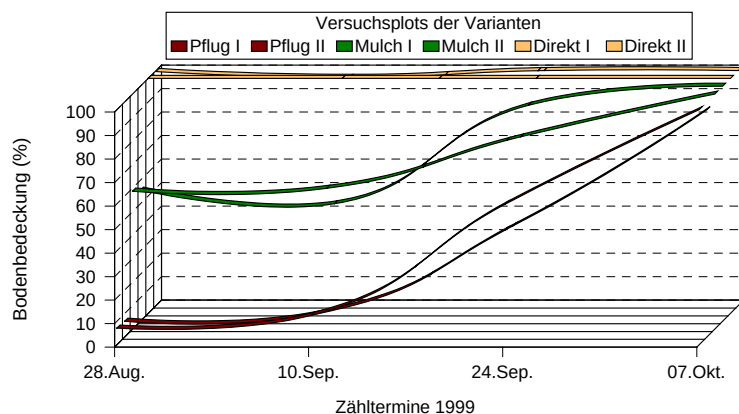


Abb. 21: Bodenbedeckung des Versuchsjahres 1999 im Winterraps

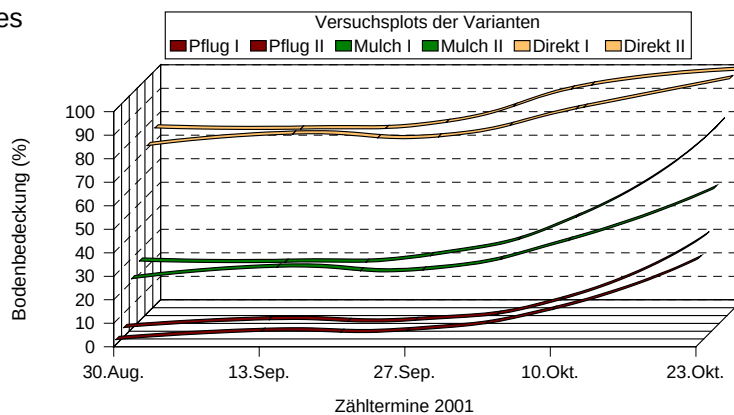


Abb. 22: Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2001 im Winterraps

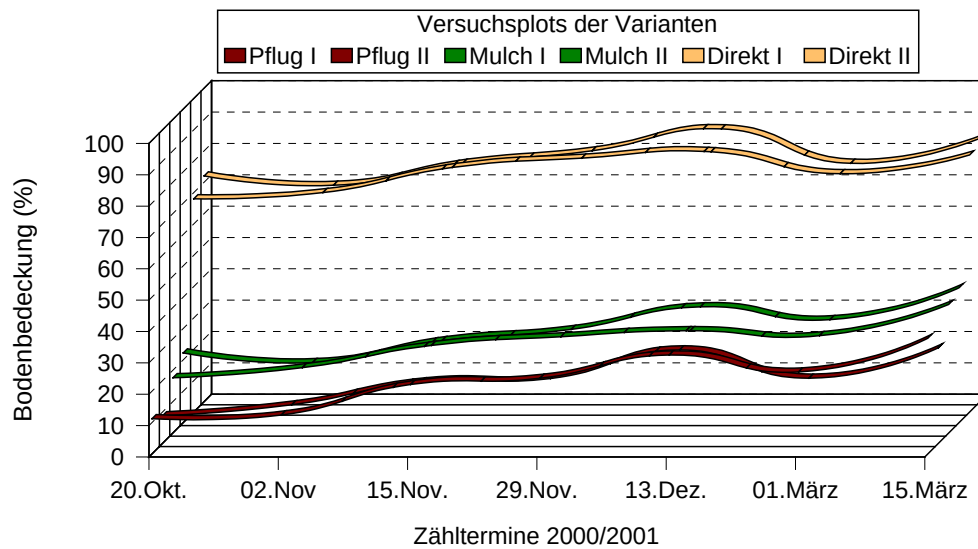


Abb. 23: Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2000/2001 im Winterweizen

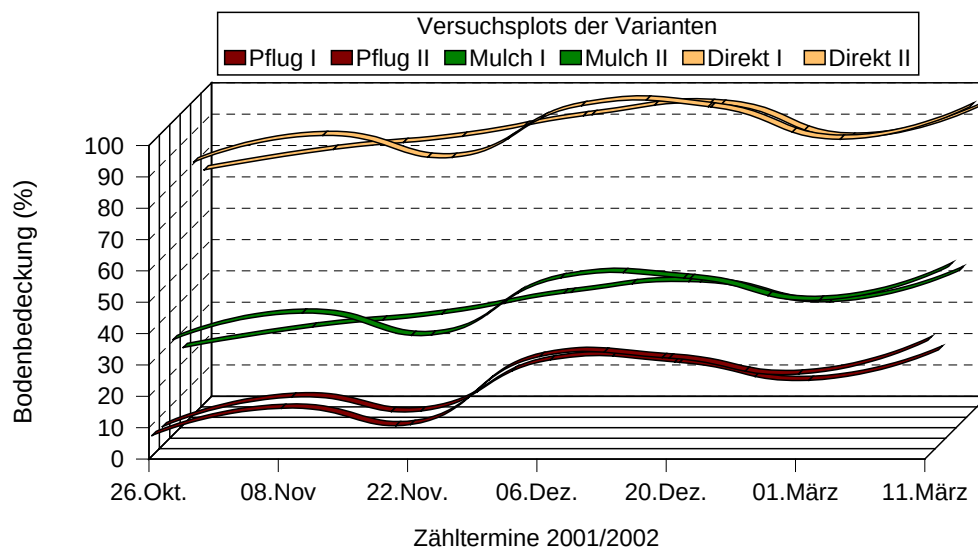


Abb. 24: Bodenbedeckung des Versuchsjahres 2001/2002 im Winterweizen

Tab. 25: Rückstandsgehalte von Herbiziden im humosen Oberboden (0 – 5 cm) zwischen 1 und 56 Tagen nach Applikation der Versuchsjahre 1998/99 im Mais

Versuchsjahr 1998					Versuchsjahr 1999				
Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte der Herbizide (mg/kg) in 0-5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)			Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte der Herbizide (mg/kg) in 0-5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)		
		Metolachlor	Pendimethalin	Terbuthylazin			Metolachlor	Pendimethalin	Terbuthylazin
	1 Pflug I	0,23	0,23	0,05		1 Pflug I	1,95	1,26	0,65
	1 Pflug II	1,15	0,99	0,32		1 Pflug II	0,48	0,39	0,15
	1 Mulch I	0,56	0,42	0,06		1 Mulch I	1,19	0,79	0,36
	1 Mulch II	0,43	0,29	0,08		1 Mulch II	0,62	0,44	0,12
	1 Direktsaat I	0,14	0,35	0,07		1 Direktsaat I	0,66	0,52	0,18
	1 Direktsaat II	0,54	0,41	0,14		1 Direktsaat II	0,18	0,16	0,07
	14 Pflug I	0,23	0,13	0,18		14 Pflug I	0,48	0,53	0,16
	14 Pflug II	< 0,005	0,2	0,06		14 Pflug II	0,64	0,3	0,12
	14 Mulch I	0,26	0,2	0,05		14 Mulch I	0,97	0,55	0,34
	14 Mulch II	0,1	0,07	0,03		14 Mulch II	1,08	0,78	0,31
	14 Direktsaat I	0,16	0,13	0,08		14 Direktsaat I	0,53	0,26	0,32
	14 Direktsaat II	0,15	0,13	0,09		14 Direktsaat II	0,26	0,17	0,17
	28 Pflug I	0,32	0,55	0,23		28 Pflug I	0,38	0,2	0,08
	28 Pflug II	0,29	0,55	0,18		28 Pflug II	0,05	0,09	< 0,005
	28 Mulch I	0,16	0,53	0,14		28 Mulch I	0,61	0,13	0,09
	28 Mulch II	0,14	0,28	0,09		28 Mulch II	0,47	0,22	0,11
	28 Direktsaat I	0,1	0,27	0,11		28 Direktsaat I	0,71	0,55	0,53
	28 Direktsaat II	0,07	0,24	0,09		28 Direktsaat II	0,14	0,12	0,1
	42 Pflug I	0,18	0,01	0,01		42 Pflug I	0,81	0,24	0,17
	42 Pflug II	0,35	0,38	0,12		42 Pflug II	1,18	0,83	0,42
	42 Mulch I	0,08	0,32	0,07		42 Mulch I	0,98	1,06	0,56
	42 Mulch II	< 0,005	0,27	0,08		42 Mulch II	0,59	0,49	0,3
	42 Direktsaat I	< 0,005	0,22	0,07		42 Direktsaat I	0,13	0,13	0,1
	42 Direktsaat II	< 0,005	0,21	0,09		42 Direktsaat II	< 0,005	0,09	< 0,005
	56 Pflug I	< 0,005	0,18	0,06		56 Pflug I	1,13	0,94	0,43
	56 Pflug II	0,05	0,2	0,08		56 Pflug II	1,1	1,2	0,39
	56 Mulch I	< 0,005	0,14	0,03		56 Mulch I	0,51	0,65	0,27
	56 Mulch II	< 0,005	0,09	0,02		56 Mulch II	0,77	0,87	0,28
	56 Direktsaat I	< 0,005	0,1	0,03		56 Direktsaat I	< 0,005	0,1	0,08
	56 Direktsaat II	< 0,005	0,11	0,04		56 Direktsaat II	< 0,005	0,09	< 0,005

Tab. 26: Rückstandsgehalte von Herbiziden im humosen Oberboden (0 – 5 cm) zwischen 1 und 56 Tagen nach Applikation der Versuchsjahre 2000/02 im Mais

Versuchsjahr 2000					Versuchsjahr 2001				
Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte der Herbizide (mg/kg) in 0-5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)			Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte der Herbizide (mg/kg) in 0-5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)		
		Metolachlor	Pendimethalin	Terbuthylazin			Metolachlor	Pendimethalin	Terbuthylazin
1	Pflug I	2,93	1,76	1,23	1	Pflug I	1,61	0,91	0,66
1	Pflug II	4,92	2,84	2,02	1	Pflug II	3,65	2,2	1,55
1	Mulch I	1,63	1,02	0,67	1	Mulch I	1,59	0,95	0,68
1	Mulch II	1,55	0,96	0,59	1	Mulch II	1,46	0,89	0,66
1	Direktsaat I	n. n.*	n. n.	n. n.	1	Direktsaat I	0,74	0,43	0,37
1	Direktsaat II	n. n.	n. n.	n. n.	1	Direktsaat II	1,08	0,69	0,56
14	Pflug I	0,53	0,33	0,25	14	Pflug I	0,92	0,53	0,47
14	Pflug II	0,52	0,31	0,2	14	Pflug II	1,19	0,73	0,54
14	Mulch I	1,04	0,56	0,49	14	Mulch I	1,25	0,81	0,59
14	Mulch II	0,42	0,31	0,19	14	Mulch II	0,64	0,28	0,25
14	Direktsaat I	n. n.	n. n.	n. n.	14	Direktsaat I	0,43	0,18	0,2
14	Direktsaat II	n. n.	n. n.	n. n.	14	Direktsaat II	0,76	0,45	0,41
28	Pflug I	0,72	0,48	0,34	28	Pflug I	0,5	0,36	0,28
28	Pflug II	1,36	0,92	0,76	28	Pflug II	0,32	0,2	0,2
28	Mulch I	1,01	0,8	0,63	28	Mulch I	0,42	0,34	0,25
28	Mulch II	0,42	0,26	0,24	28	Mulch II	0,43	0,26	0,21
28	Direktsaat I	n. n.	n. n.	n. n.	28	Direktsaat I	0,22	0,11	0,19
28	Direktsaat II	n. n.	n. n.	n. n.	28	Direktsaat II	0,07	0,05	0,12
42	Pflug I	0,53	0,52	0,45	42	Pflug I	0,43	0,59	0,37
42	Pflug II	0,61	0,54	0,41	42	Pflug II	0,39	0,35	0,36
42	Mulch I	0,25	0,24	0,15	42	Mulch I	0,24	0,4	0,24
42	Mulch II	0,34	0,31	0,28	42	Mulch II	0,44	0,67	0,36
42	Direktsaat I	n. n.	n. n.	n. n.	42	Direktsaat I	< 0,005	0,06	0,07
42	Direktsaat II	n. n.	n. n.	n. n.	42	Direktsaat II	< 0,005	< 0,005	0,06
56	Pflug I	< 0,005	0,1	< 0,005	56	Pflug I	0,22	0,24	0,2
56	Pflug II	0,07	0,15	0,1	56	Pflug II	0,17	0,16	0,16
56	Mulch I	< 0,005	0,19	0,12	56	Mulch I	0,3	0,33	0,26
56	Mulch II	0,11	0,21	0,13	56	Mulch II	0,27	0,26	0,18
56	Direktsaat I	n. n.	n. n.	n. n.	56	Direktsaat I	0,11	0,05	0,11
56	Direktsaat II	n. n.	n. n.	n. n.	56	Direktsaat II	0,06	< 0,005	< 0,005

*n. n.: nicht nachgewiesen

Tab. 27: Rückstandsgehalte des Herbizides Metazachlor im Oberboden (0 – 5 cm) zwischen 1 und 56 Tagen nach Applikation der Versuchsjahre 1998 – 2001 im Winterraps

Versuchsjahr 1998			Versuchsjahr 1999			Versuchsjahr 2000			Versuchsjahr 2001		
Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte des Herbizides (mg/kg) in 0,5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)	Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte des Herbizides (mg/kg) in 0,5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)	Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte des Herbizides (mg/kg) in 0,5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)	Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte des Herbizides (mg/kg) in 0,5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)
		Metazachlor			Metazachlor			Metazachlor			Metazachlor
1	Pflug I	4,39	1	Pflug I	0,98	1	Pflug I	0,7	1	Pflug I	0,64
1	Pflug II	4,16	1	Pflug II	0,06	1	Pflug II	0,55	1	Pflug II	0,58
1	Mulch I	3,36	1	Mulch I	0,62	1	Mulch I	0,48	1	Mulch I	0,53
1	Mulch II	4,53	1	Mulch II	0,89	1	Mulch II	0,24	1	Mulch II	0,59
1	Direktsaat I	2,81	1	Direktsaat I	0,38	1	Direktsaat I	< 0,005	1	Direktsaat I	n. n.*
1	Direktsaat II	1,78	1	Direktsaat II	0,09	1	Direktsaat II	0,08	1	Direktsaat II	n. n.
14	Pflug I	< 0,05	14	Pflug I	0,06	14	Pflug I	0,25	14	Pflug I	0,35
14	Pflug II	0,21	14	Pflug II	0,06	14	Pflug II	0,22	14	Pflug II	0,21
14	Mulch I	< 0,005	14	Mulch I	0,06	14	Mulch I	< 0,005	14	Mulch I	0,2
14	Mulch II	< 0,005	14	Mulch II	0,06	14	Mulch II	< 0,005	14	Mulch II	0,18
14	Direktsaat I	< 0,005	14	Direktsaat I	< 0,005	14	Direktsaat I	0,05	14	Direktsaat I	n. n.
14	Direktsaat II	< 0,005	14	Direktsaat II	< 0,005	14	Direktsaat II	< 0,005	14	Direktsaat II	n. n.
28	Pflug I	< 0,005	28	Pflug I	0,05	28	Pflug I	0,05	28	Pflug I	0,05
28	Pflug II	< 0,005	28	Pflug II	< 0,005	28	Pflug II	< 0,005	28	Pflug II	< 0,005
28	Mulch I	< 0,005	28	Mulch I	< 0,005	28	Mulch I	< 0,005	28	Mulch I	0,05
28	Mulch II	< 0,005	28	Mulch II	0,07	28	Mulch II	< 0,005	28	Mulch II	< 0,005
28	Direktsaat I	< 0,005	28	Direktsaat I	< 0,005	28	Direktsaat I	< 0,005	28	Direktsaat I	n. n.
28	Direktsaat II	< 0,005	28	Direktsaat II	< 0,005	28	Direktsaat II	< 0,005	28	Direktsaat II	n. n.
42	Pflug I	0,35	42	Pflug I	< 0,005	42	Pflug I	< 0,005	42	Pflug I	< 0,005
42	Pflug II	< 0,005	42	Pflug II	< 0,005	42	Pflug II	< 0,005	42	Pflug II	< 0,005
42	Mulch I	0,33	42	Mulch I	< 0,005	42	Mulch I	< 0,005	42	Mulch I	< 0,005
42	Mulch II	< 0,005	42	Mulch II	< 0,005	42	Mulch II	< 0,005	42	Mulch II	< 0,005
42	Direktsaat I	< 0,005	42	Direktsaat I	< 0,005	42	Direktsaat I	< 0,005	42	Direktsaat I	n. n.
42	Direktsaat II	< 0,005	42	Direktsaat II	< 0,005	42	Direktsaat II	< 0,005	42	Direktsaat II	n. n.
56	Pflug I	0,24	56	Pflug I	< 0,005	56	Pflug I	< 0,005	56	Pflug I	< 0,005
56	Pflug II	< 0,005	56	Pflug II	< 0,005	56	Pflug II	< 0,005	56	Pflug II	< 0,005
56	Mulch I	< 0,005	56	Mulch I	< 0,005	56	Mulch I	< 0,005	56	Mulch I	< 0,005
56	Mulch II	< 0,005	56	Mulch II	< 0,005	56	Mulch II	< 0,005	56	Mulch II	< 0,005
56	Direktsaat I	< 0,005	56	Direktsaat I	< 0,005	56	Direktsaat I	< 0,005	56	Direktsaat I	n. n.
56	Direktsaat II	< 0,005	56	Direktsaat II	< 0,005	56	Direktsaat II	< 0,005	56	Direktsaat II	n. n.

*n. n.: nicht nachgewiesen

Tab. 28: Rückstandsgehalte von Herbiziden im Oberboden (0 – 5 cm) zwischen 1 und 56 Tagen nach Applikation in verschiedenen Versuchsjahren im Winterweizen

Versuchsjahr 1999/2000				Versuchsjahr 2000/2001				Versuchsjahr 2001/2002			
Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte der Herbizide (mg/kg) in 0,5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)		Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte der Herbizide (mg/kg) in 0,5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)		Tage nach Applikation	Varianten mit Versuchsplots	Rückstandsgehalte der Herbizide (mg/kg) in 0,5 cm Bodentiefe (Mittelwerte, n = 2)	
		Chlortoluron	Isoproturon			Chlortoluron	Isoproturon			Chlortoluron	Isoproturon
1	Pflug I	2,91	1,91	1	Pflug I	n. n.*	0,48	1	Pflug I	n. n.	1,87
1	Pflug II	1,98	1,32	1	Pflug II	n. n.	0,52	1	Pflug II	n. n.	3,36
1	Mulch I	2,6	1,67	1	Mulch I	n. n.	0,54	1	Mulch I	n. n.	1,84
1	Mulch II	2,54	1,74	1	Mulch II	n. n.	0,56	1	Mulch II	n. n.	1,5
1	Direktsaat I	2,56	1,67	1	Direktsaat I	n. n.	n. n.	1	Direktsaat I	n. n.	n. n.
1	Direktsaat II	1,84	1,78	1	Direktsaat II	n. n.	n. n.	1	Direktsaat II	n. n.	n. n.
14	Pflug I	0,3	0,16	14	Pflug I	n. n.	0,27	14	Pflug I	n. n.	1,41
14	Pflug II	0,45	0,23	14	Pflug II	n. n.	0,39	14	Pflug II	n. n.	0,48
14	Mulch I	0,5	0,25	14	Mulch I	n. n.	0,12	14	Mulch I	n. n.	0,71
14	Mulch II	0,59	0,33	14	Mulch II	n. n.	0,21	14	Mulch II	n. n.	0,75
14	Direktsaat I	0,26	0,1	14	Direktsaat I	n. n.	n. n.	14	Direktsaat I	n. n.	n. n.
14	Direktsaat II	0,34	0,21	14	Direktsaat II	n. n.	n. n.	14	Direktsaat II	n. n.	n. n.
28	Pflug I	0,16	< 0,005	28	Pflug I	n. n.	0,14	28	Pflug I	n. n.	0,21
28	Pflug II	0,21	0,05	28	Pflug II	n. n.	0,15	28	Pflug II	n. n.	0,08
28	Mulch I	0,18	0,05	28	Mulch I	n. n.	0,17	28	Mulch I	n. n.	0,14
28	Mulch II	0,29	0,16	28	Mulch II	n. n.	0,05	28	Mulch II	n. n.	0,16
28	Direktsaat I	0,18	0,05	28	Direktsaat I	n. n.	n. n.	28	Direktsaat I	n. n.	n. n.
28	Direktsaat II	0,47	0,27	28	Direktsaat II	n. n.	n. n.	28	Direktsaat II	n. n.	n. n.
42	Pflug I	0,33	0,07	42	Pflug I	n. n.	< 0,005	42	Pflug I	n. n.	< 0,005
42	Pflug II	0,72	0,17	42	Pflug II	n. n.	< 0,005	42	Pflug II	n. n.	< 0,005
42	Mulch I	0,5	0,15	42	Mulch I	n. n.	< 0,005	42	Mulch I	n. n.	< 0,005
42	Mulch II	0,6	0,17	42	Mulch II	n. n.	< 0,005	42	Mulch II	n. n.	< 0,005
42	Direktsaat I	0,78	0,24	42	Direktsaat I	n. n.	n. n.	42	Direktsaat I	n. n.	n. n.
42	Direktsaat II	0,43	0,15	42	Direktsaat II	n. n.	n. n.	42	Direktsaat II	n. n.	n. n.
56	Pflug I	0,39	0,07	56	Pflug I	n. n.	< 0,005	56	Pflug I	n. n.	< 0,005
56	Pflug II	0,33	0,08	56	Pflug II	n. n.	< 0,005	56	Pflug II	n. n.	< 0,005
56	Mulch I	0,49	0,1	56	Mulch I	n. n.	< 0,005	56	Mulch I	n. n.	< 0,005
56	Mulch II	0,45	0,08	56	Mulch II	n. n.	< 0,005	56	Mulch II	n. n.	< 0,005
56	Direktsaat I	0,4	0,09	56	Direktsaat I	n. n.	n. n.	56	Direktsaat I	n. n.	< 0,005
56	Direktsaat II	0,45	0,11	56	Direktsaat II	n. n.	n. n.	56	Direktsaat II	n. n.	< 0,005

*n. n.: nicht nachgewiesen

Danksagung

Dieser Dissertation liegt das Forschungsprojekt „Konservierende Bodenbearbeitung als ackerbauliche Maßnahme zur Verringerung des diffusen Eintrages von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen in Oberflächengewässer“ zugrunde. Das Projekt war Teil eines Verbundvorhabens mit dem Titel „Boden- und Stoffabtrag von ackerbaulich genutzten Flächen – Ausmaß und Minderungsstrategien“, das vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz finanziell unterstützt worden ist. Die Arbeiten hierzu wurden hauptsächlich am Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Südwestfalen in Soest durchgeführt. In Kooperation mit der Fakultät für Kulturwissenschaften (Fach: Geografie) und der Fakultät für Naturwissenschaften (Department: Technische Chemie) der Universität Paderborn wurden physikochemische Laboranalysen von Wasser- und Bodenproben durchgeführt.

Zum Gelingen der oben angeführten Arbeit haben viele beigetragen, allen Helfern und Begleitern gebührt mein aufrichtiger Dank.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Norbert Lütke Entrup und Herrn Dr. Franz Ferdinand Gröbblinghoff für das Vertrauen bei der Betreuung dieser Arbeit, für die Diskussionsbereitschaft über die erzielten Ergebnisse während der praktischen Phase des Vorhabens und für die konstruktiven Anregungen zum Aufbau der Arbeit. Dies gilt auch für Herrn Prof. Dr. Hans Karl Barth, dem ich zusätzlich für die Übernahme der Gutachtertätigkeit danke sowie für Herrn Prof. Dr. Lütke Entrup bezüglich der Übernahme des Zweitgutachters. Den beiden genannten Herren möchte ich weiterhin für die Übernahme der Prüfertätigkeit im Rahmen meiner Promotion ausdrücklich danken, ebenso Herrn Prof. Dr. Andreas Kagermeier vom Fach Geografie der Fakultät für Kulturwissenschaften an der Universität Paderborn für seine Bereitschaft den Vorsitz der Prüfungskommission zu übernehmen. Dankend weise ich auf Herrn Dr. Gerhard Müller hin, ehemals Angehöriger des o. a. Faches Geografie, der meinem Wunsch der Prüfungskommission bzw. der Disputation beizuwohnen gerne entgegen kam.

Ein herzliches Dankeschön richte ich an alle aktiven und ehemaligen MitarbeiterInnen des Fachbereiches Agrarwirtschaft der Fachhochschule Südwestfalen, insbesondere an Frau Simone Dagan und den studentischen Mitarbeitern, Frau Saskia Ross, Herr Rüdiger Seckelmann und Herr Roderich Garmeister für ihre Mithilfe bei der Planung, Durchführung und Auswertung der zahlreichen Untersuchungen im Labor und den aufwendigen Arbeiten auf der Feldversuchsfläche bei teilweise widrigen Wetterbedingungen. Ohne ihren Einsatz und ihr Engagement wären viele Untersuchungen nicht möglich gewesen.

Dem Landwirt, Herrn Heinfried Richter und seiner Familie (Frau Elisabeth Richter, Hendrik Richter und Frederik Richter) danke ich ganz besonders für sein freundliches Einverständnis und Interesse an den Geländearbeiten auf der großzügig bereitgestellten Ackerfläche in der Gemarkung Menzel, Gemeinde Rüthen. Seine nicht ganz selbstverständliche Bereitschaft die Feldarbeiten neben den betrieblichen Aufgaben mit Tatkraft zu unterstützen, auch im Hinblick auf mögliche Folgeschäden nach Beendigung der Feldarbeiten, bedarf einer besonderen Anerkennung.

Dankend erwähne ich ebenfalls die MitarbeiterInnen des Versuchsgutes am Fachbereich Agrarwirtschaft und ihren technischen Leiter, Herrn Günter Stemann, für die neben den versuchsguteigenen Aufgaben nicht immer ganz einfach zu koordinierende Absprache einer produktionstechnischen Unterstützung der Feldversuche in Rüthen/Menzel.

Für die gewissenhafte Durchführung der HPLC-Analytik zur Bestimmung der im Feldversuch angewandten herbiziden Wirkstoffe im Wasser und Boden bedanke ich mich recht herzlich bei den MitarbeiterInnen des Departmentes Technische Chemie an der Universität Paderborn. Zu nennen wären Herr Dieter Heinrichs, Frau Marlies Daniels und der Leiter, Herrn Prof. Dr. Hans-Joachim Warnecke.

Hinsichtlich des erstmaligen Einbaues der Erosionsmesstechnik für den Feldversuch und der phasenweise notwendigen Reparaturen, geht mein aufrichtiger Dank an das Technikerteam der Umwelt-Geräte-Technik GmbH (UGT) in Müncheberg, unter der Leitung von Herrn Dr. Manfred Seyfarth.

Herrn Dr. Josef Haider sowie Herrn Rolf Reupert und Herrn Dr. Ingo Müller vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen danke ich für die fachliche Beratung hinsichtlich der Versuchsmethodik zu Beginn des Forschungsprojektes.

Am Schluss geht mein persönlicher Dank an Frau Birgit Köhler, die durch ihre aufmerksame Wegbegleitung, der Korrekturarbeiten am Manuskript und nicht zuletzt durch ihre aufmunternden Worte dazu beitrug, dass die Dissertationsschrift in dieser Form vorliegen konnte.