

Strategien zur Minderung diffuser Einträge von herbiziden Wirkstoffen in Oberflächengewässer - Vergleich verschiedener Bestellverfahren auf Parzellen mit Mais in Nordrhein-Westfalen

Strategies to Reduce Diffuse Pollution of Surface Water by Herbicides - Comparison between Different Types of Tillage on Field Plots with Corn in Northrhine-Westfalia

F. Erlach, N. Lütke Entrup & F.-F. Gröblichhoff

Fachbereich Agrarwirtschaft, Fachhochschule Südwestfalen, Soest

Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit war es, auf einem erosionsgefährdeten Ackerstandort in Deutschland (Haarstrang, Nordrhein-Westfalen) diffuse Herbizidausträge durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag bei drei verschiedenen Bestellverfahren (konventionell mit Pflugeinsatz, konservierend als Mulchsaat, Direktsaat) unter Mais während eines fünfjährigen Feldversuches (1998-2002) zu quantifizieren. Mit Hilfe von Erosionsmessparzellen ($n=2$) und einer speziellen Messtechnik wurde für jedes Bestellverfahren untersucht, wie viel Wasser und Boden abfließt, welche Menge an applizierten Wirkstoffen ausgetragen wurde und wie hoch die dabei aufgetretenen Stoffkonzentrationen sind. In der Pflugvariante betrug der relative Oberflächenabfluss bis zu 8% des gefallenen Niederschlages eines Regenereignisses gegenüber 2% in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung (Mulchsaat). Der höchste mittlere Bodenabtrag mit bis zu $1,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ trat jeweils in der Pflugvariante auf gegenüber $0,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. Die maximalen mittleren Austräge der applizierten Wirkstoffe Metolachlor ($0,9 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), Pendimethalin ($0,6 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und Terbutylazin ($1,2 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) wurden in der Pflugvariante nachgewiesen. Bei Mulchsaat und Direktsaat konnte während der fünf Versuchsjahre im Vergleich eine Austragsminderung des Bodens sowie der angewandten Herbizide von 70-100% erreicht werden. Als maximale Konzentrationen im Oberflächenabfluss an gelöstem Metolachlor und Terbutylazin für die Bestellverfahren konventionell und konservierend wurden $5-98,8 \mu\text{g l}^{-1}$ gemessen. Die gemessenen Werte für Pendimethalin lagen bei $0,1-1,8 \mu\text{g l}^{-1}$. In gebundener Phase lagen die Höchstkonzentrationen für Terbutylazin und Metolachlor bei $40-710 \mu\text{g kg}^{-1}$ und für Pendimethalin bei bis zu $980 \mu\text{g kg}^{-1}$.

Schlüsselworte: Feldversuch, Bodenbearbeitung, Oberflächenabfluss, Herbizidaustrag

Summary

The objective of this study was to quantify soil loss and losses of herbicides by surface runoff from a sloping (7%) agricultural area in Germany (Haarstrang, Northrhine-Westfalia) during a five years field study (1998-2002) with corn, managed under three different tillage systems (conventional tillage, conservation tillage,

no-tillage). For each type of tillage field erosion plots ($n=2$) with an automated device for surface runoff and soil loss measurements were installed 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 are displaced, 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 surface runoff occurred with no-tillage. Under conventional tillage with corn the mean soil loss was up to $1.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in comparison to $0.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ under conservation tillage. Highest mean losses of the applied herbicides metolachlor ($0.9 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), pendimethalin ($0.6 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) and terbuthylazin ($1.2 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) were determined under conventional tillage. Conservation tillage and no-tillage markedly reduced sediment and herbicide losses by 70-100% during five years of field study. Maximum concentrations dissolved in surface runoff for metolachlor and terbuthylazin occurred between $5-98.8 \mu\text{g l}^{-1}$ and for pendimethalin $1.4 \mu\text{g l}^{-1}$; concentrations fixed on sediment were between $40-710 \mu\text{g kg}^{-1}$ for terbuthylazin and metolachlor and up to $980 \mu\text{g kg}^{-1}$ for pendimethalin.

Key words: Field study, tillage system, surface runoff, herbicide loss

Einleitung und Zielsetzung

Der Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer erfolgt auf unterschiedlichen Pfaden, oft über diffuse Quellen. Nach AKKAN et al. (2003) werden in Deutschland ca. 35.000 t a^{-1} Pflanzenschutzmittel auf landwirtschaftlich genutzten Flächen angewendet. Davon entfallen ca. 16.000 t a^{-1} auf die Herbizide, von diesen gelangen etwa 28 t a^{-1} (0,17%) in die Oberflächengewässer. Sie gehen von ca. 9 t a^{-1} Eintrag durch Abschwemmung von landwirtschaftlich genutzten Flächen und ca. 10 t a^{-1} durch Hofabläufe aus. Abtrift ($3,5 \text{ t a}^{-1}$) und Dränagen ($1,5 \text{ t a}^{-1}$) sind von geringerer Bedeutung. Die Schätzgrößen sind mit großen Schwankungsbreiten verbunden, geben aber dennoch wichtige Hinweise auf mögliche Eintragspfade und Minderungsstrategien. Um die Entwicklung von Strategien zur Minderung von Stoffeinträgen in die Oberflächengewässer voranzutreiben, ist es notwendig, die Eintragspfade oder -quellen der genannten Stoffe zu lokalisieren und zu quantifizieren (HUBER et al. 2000, BACH et al. 2001, 2005).

Wirksame Schutzmaßnahmen können flächendeckend zur Minderung von Bodenabtrag und Stoffausträgen angewandt werden. Hier ist insbesondere die Form der Bodenbearbeitung (LÜTKE ENTRUP 1996, FRIELINGHAUS et al. 1997, FREDE et al. 1998, SOMMER 1999, EUROPEAN CONSERVATION AGRICULTURE FEDERATION [ECAAF] & GESELLSCHAFT FÜR KONSERVIERENDE BODENBEARBEITUNG [GKB] 1999, BUCHNER 2000, BACH et al. 2001, BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT [BMVEL] 2001) zu nennen. Pfluglose Bestellverfahren wie die konservierende Bodenbearbeitung oder das Direktsaatverfahren können zur Minimierung des Pflanzenschutzmitteleintrages in die Oberflächengewässer beitragen.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit war die Quantifizierung von Boden- und Stoffabträgen von einer erosionsgefährdeten Ackerfläche in Nordrhein-Westfalen bei unterschiedlichen Bestellverfahren. In den Jahren 1998 bis 2002 wurde dazu auf einem erosionsgefährdeten Ackerstandort eine Feldstudie zum Austrag von Herbiziden durch Oberflächenabfluss mit drei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten in der Kultur Mais unter natürlichen Niederschlagsbedingungen durchgeführt. Die dabei ausgetragenen Mengen an Bodenmaterial und herbiziden Wirkstoffen wurden quantifiziert und eine Bewertung der Bearbeitungsvarianten hinsichtlich ihrer Anfälligkeit für Oberflächenabfluss und Stoffverlagerung vorgenommen. Die zentralen Forschungsfragen waren:

1. Wie viel Wasser fließt nach erosiven Niederschlägen bei konventionellem Bestellverfahren (Pflugeinsatz) im Vergleich zur konservierenden Bodenbearbeitung (Mulchsaat) und Direktsaat (keine Bodenbearbeitung) oberflächlich ab?
2. Wie hoch ist der Bodenabtrag bei den unterschiedlichen Bestellverfahren?
3. Welche Herbizidmengen werden von den Versuchsplots abgeschwemmt bzw. mit dem abgetragenen Boden verlagert?
4. Welche Wirkstoffkonzentrationen treten dabei auf?

Material und Methoden

Standortcharakteristika der Feldversuchsfläche

Die Feldversuchsfläche befand sich in Rüthen-Menzel auf der oberen Nordabdachung des Haarstranges im Kreis Soest. Bei dem am Standort vorkommenden Bodentyp handelte es sich um eine flach- bis mittelgründige Braunerde aus lösshaltigem Kalksteinverwitterungslehm über verkarsteten Kalken und Mergeln der Oberkreide. Die Hangneigung betrug 7%, die Textur des Oberbodens war ein Tu3 mit ca. 45% Ton- und 53% Schluffanteil. Der Oberboden (0-25 cm) war stark humos (2,3% C_{org}). Der mittlere Jahresniederschlag für den östlichen Teil des Haarstranges mit der dortigen Versuchsfläche lag bei 898 mm. Die Jahresverteilung der Niederschläge ist relativ konstant, mit einem Hauptmaximum im Sommerhalbjahr (Mai bis September) und einem Zwischenmaximum im Winterhalbjahr (Januar). Aufgrund der langjährigen Niederschlagsdaten muss in den Monaten Mai bis September mit vermehrt erosiven Niederschlägen gerechnet werden (Tab. 1).

Pflanzenbauliche Maßnahmen und Messtechnik

Die hier dargestellten Untersuchungen stammen aus einer größeren Versuchsanlage mit den beiden Anbaufolgen Winterraps-Winterweizen-Wintergerste sowie Mais-Weizen. Jede Fruchtart der Anbaufolgen wurde in jedem Jahr auf einer ca. 0,33 ha (50 m x 65 m) großen Teilfläche an-

gebaut. Hier werden nur die Ergebnisse aus der Fruchtart Mais berichtet.

Der zweite Versuchsfaktor war die Bodenbearbeitung. Die Versuchsanlage wurde 1997 auf einer seit 1988 pfluglos bestellten Ackerfläche angelegt. Es wurden drei unterschiedliche Varianten untersucht: Das konventionelle Bestellverfahren mit jährlich wendender Pflugfurche, das konservierende Bestellverfahren mit nicht wendender flacher Bodenbearbeitung (Mulchsaat) und das Direktsaatverfahren ohne jegliche Bearbeitung des Bodens. Die einzelnen Bearbeitungsvarianten wurden statisch auf denselben Parzellen durchgeführt, so dass die Bodeneigenschaften dem jeweiligen mehrjährig angewendeten Bewirtschaftungssystem entsprachen. Da die Optimierung dieser Bodenbearbeitungssysteme nicht Gegenstand der Untersuchungen war, wurden alle weiteren anbautechnischen Maßnahmen mit Ausnahme der Herbizidapplikation betriebsüblich und einheitlich durchgeführt.

Auf jedem Fruchtfolgefeld sind die drei Bestellverfahren in zwei Wiederholungen angelegt worden (8 m x 65 m = 520 m²). In jeder Wiederholung wurde eine Messparzelle (Versuchsplot: 3 m x 50 m = 150 m²) mit Zinkblechstreifen abgegrenzt. In jeder Messparzelle befanden sich 4 Maisreihen in Längsrichtung. Am hangabwärts gerichteten Ende der Messparzellen befand sich ein Ablauf, der zu den verschalteten Schutzhütten ("Messgruben") für die Messtechnik führte. Das Messsystem bestand aus 2 Kippwaagen, von denen eine mit einem Fassungsvermögen von 1 l je Kippung das gesamte Abflusswasser bis zu einer Menge von 8 l min⁻¹ aufnahm, die andere mit einem Fassungsvermögen von 3 l je Kippung funktionierte als Bypass bei höheren Wassermengen. Jede Kippung wurde gezählt und mit Uhrzeit gespeichert. Von der 1 l Kippwaage wurde der Inhalt einzelner Kippungen in einem festgelegten Rhythmus automatisch in 24 Probenflaschen (je 1000 ml) für die Analyse von Sediment-, Nährstoff- und Herbizidkonzentrationen abgefüllt. Damit ist eine exakt zeitaufgelöste Dokumentation des Abflussgeschehens möglich (SEYFAHRT et al. 1993).

Alle registrierten Abflussereignisse in Mais in den Jahren 1998-2002 sind in Tab. 4 aufgeführt. Die Messphase dauerte jährlich im Mais von der Aussaat (10.-13.5.) bis Ende Juli. Nach der Beendigung der Messphase wurden alle Versuchsplots, inklusive der Ablauf-, Rohr- und Mess-

Tab. 1: Niederschlagshöhen (mm 24 h⁻¹) in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit (Station Rüthen, 1951-1980) im Bereich des östlichen „Haarstranges“, Nordrhein-Westfalen
Levels of precipitation (mm 24 h⁻¹) in dependence on the recurrence period of individual rainfall events (Rüthen, 1951-1980), eastern area of the „Haarstrang“ region, Northrhine-Westfalia

Wiederkehrzeit (Jahre)	Niederschlagshöhe (mm 24 h ⁻¹)		
	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: DWD, Wetteramt Essen (1994)

Tab. 2: Wirkstoffmengen und spezifische Eigenschaften applizierter Herbizide (Präparat: "STENTAN") auf Parzellen mit Mais
Active substance quantities and specific characteristics of herbicides (commercial product "STENTAN") applied on field plots with corn

Wirkstoff	Applizierte Wirkstoff-Menge (g ha ⁻¹)	Sorption an Humus- und Tonbestandteilen	K _{oc} -Wert (L kg ⁻¹)	Halbwertszeit = DT ₅₀ -Zeit in Tagen (d)
Terbuthylazin	750	hoch	250	70
Metolachlor	1450	hoch	250	40
Pendimethalin	990	sehr hoch	> 16000	100

Quelle: Domsch (1992), Umweltbundesamt (2000)

Tab. 3: Mittlere Wiederfindungsraten applizierter Wirkstoffe im Wasser (gelöste Phase=WFRi, w) und Sediment (gebundene Phase=WFRi, s) in den Versuchsjahren mit Mais

Mean recovering rates of applied active substances dissolved in water (WFRi, w) and fixed on sediment (WFRi, s) for the experimental years with corn

Dotierte Wirkstoffe	Mittlere Wiederfindungsrate (%)	
	WFRi, w; (s<3%)*	WFRi, s; (s<3%)*
Terbuthylazin	69,6	73,0
Metolachlor	93,8	97,6
Pendimethalin	97,6	93,0

*(s<3%) = Standardabweichung der Messwerte

systeme, entfernt bzw. demontiert und dem Rotationsprinzip der Ackerkulturen folgend für jedes Versuchsjahr erneut installiert. In der Direktsaatvariante wurde auf die Messtechnik verzichtet, da dort nur mit geringem Oberflächenabfluss zu rechnen war. Stattdessen ist der gesamte Oberflächenabfluss in 750 l fassenden Nylontanks aufgefangen worden.

Eine Wetterstation am Versuchsstandort ermöglichte die Registrierung von Niederschlagsintensitäten in mm min⁻¹. Alle Messwerte wurden über einen Datalogger erfasst und

konnten mit Hilfe einer Chip-Karte ("Memory Card") ausgelesen werden.

Herbizidapplikation und Eigenschaften der angewandten Wirkstoffe

Für die Versuchsphasen mit Mais zwischen 1998-2002 ist das Präparat "STENTAN" mit den Wirkstoffen Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin (Tab. 2), mit Hilfe einer Parzellenspritze mit einer Aufwandmenge von 6 l ha⁻¹ appliziert worden. Die Anwendung erfolgte jährlich im Voraufverfahren zwischen dem 19. und 22. Mai (= 8-10 Tage nach der Maisaussaat).

Die Wirkstoffe Metolachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin unterscheiden sich ganz wesentlich in ihrer Abbaurate (DT-Werte) und im Sorptionsverhalten (K_{oc}-Werte) (GEISELHART 1994, KLIMSA 1996). Der DT₅₀-Wert (= disappearance time 50%) gibt die Zeit in Tagen bis zur Halbierung der ausgebrachten Wirkstoffmenge an. Der DT₉₀-Wert (= disappearance time 90%) kennzeichnet analog 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. 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.

Metolachlor [N-(2-Ethyl-6-methylphenyl)-N-(2-methoxy-1-methylethyl)-chloracetamid] ist ein reines Bodenher-

Tab. 4: Niederschlagsereignisse mit Oberflächenabfluss der Versuchsjahre 1998 -2002
Precipitation events with surface runoff during the experimental years 1998-2002

Jahr	Datum Beginn (h:min)	Menge (mm)	Niederschlag			
			Menge pro Plot (l 150 m ⁻²)	Dauer (h:min)	I _{max} (mm h ⁻¹)	I _{max} (mm min ⁻¹)
1998	21.06. (21:10)	5,2	780	00:16	54	0,9
	22.06. (01:04)	2,9	435	00:04	48	0,8
	22.06. (03:58)	2,9	435	00:10	36	0,6
	01.08. (21:12)	13,4	2010	01:42	30	0,5
1999	12.07. (19:15)	11,9	1785	00:24	108	1,8
	19.07. (22:08)	6,1	915	00:08	72	1,2
	20.07. (03:06)	5,2	780	01:22	30	0,5
2001	30.06. (16:01)	35,0	5250	03:09	84	1,4

bizid und wird über die Pflanzenwurzeln aufgenommen. Der Wirkstoff gehört zur Stoffklasse der Carbonsäureamide und beeinflusst vor allem das Zellwachstum von Pflanzen. Er kommt in Kombination mit weiteren boden- und blattaktiven Substanzen zum Einsatz (DOMSCH 1992, AKKAN et al. 2003). Bei mittleren K_{oc} -Werten (Tab. 2) besitzt Metolachlor Sorptionseigenschaften, die eine Verlagerung sowohl im Wasser (gelöste Phase) als auch im Sediment (gebundene Phase) 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 angewendet. Es verhindert die Samenkeimung und zerstört die Keimlinge oder bereits aufgelaufene Pflanzen unerwünschter Kräuter und Gräser (GEISELHART 1994). Mit einem K_{oc} -Wert über 16000 (Tab. 2) gehört dieser Wirkstoff zu den stark sorptiv gebundenen Stoffen und dürfte fast ausschließlich mit dem Erosionssediment in gebundener Phase 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. Nach den beschriebenen Sorptionseigenschaften (Tab. 2) kann der Wirkstoff sowohl in gelöster als auch in gebundener Phase verlagert werden.

Laboranalytik und Datenauswertung

Die im Feld gewonnen Boden-Wassersuspensionen der Abflussereignisse wurden mittels Zentrifugierung im Labor einer Phasentrennung unterzogen. Die Sedimentproben wurden luftgetrocknet und die Trockensubstanz ermittelt. Die Konservierung der flüssigen Phase erfolgte in Glasflaschen bei -25°C . Bei der Extraktion der Wirkstoffe ist in beiden Phasen zwischen neutralen (Pendimethalin, Terbuthylazin) und sauren Wirkstoffen (Metolachlor) unterschieden worden.

Zur Erfassung der Wirkstoffkonzentrationen in der gelösten Phase wurden ca. 150 ml der Wasserprobe unter Zugabe von H_2SO_4 (neutrale Stoffe) bzw. 30%iger HCl (saure Stoffe) mittels Vakuumbbox 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 bei ca. 4°C lichtgeschützt aufbewahrt. Die Extraktion der Wirkstoffe aus der gebundenen Phase erfolgte mit Aceton für die neutralen und mit Methanol für die sauren Wirkstoffe. Hierzu wurden 5 g luftgetrocknete Sedimentprobe mit 10 ml Aceton bzw. Methanol versetzt und 30 min bei 40°C im Ultraschallbad erwärmt. Die Erfassung der Wirkstoffkonzentrationen, sowohl in gelöster als auch in gebundener Phase, erfolgte mittels Hochdruckflüssigchromatographie (HPLC) und wurde in verschiedenen Spektralbereichen fotometrisch gemessen.

Das Untersuchungslabor des Fachbereichs Chemie der Universität Paderborn hat jährlich an Ringversuchen zur Qualitätssicherung zwischen dem Institut für Bodenkunde der Universität Bonn und dem Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen teilgenommen. Diese QS-Maßnahmen erfolgten mit einer Standardlösung und 3 präparierten Proben, bestehend aus einem Wasser/Bodengemisch mit jeweils unterschiedlichen Sediment- und Herbizidkonzentrationen. Beim Vergleich der gemessenen mit den vorge-

legten Stoffmengen im Wasser und Sediment wurden auch die Wiederfindungsraten der einzelnen Wirkstoffe nach der HPLC-Analyse errechnet (Tab. 3). Die Berechnung erfolgte nach Trennung und Aufarbeitung der Phasen mit anschließender Ermittlung der Wirkstoffanteile in gelöster und gebundener Phase. Aus diesen Daten ließen sich die Wiederfindungsraten (LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1997) wie folgt berechnen:

$$\text{WFR}_{i,s} = 100 m_{i,s}^{-1} (50 - 100 m_{i,w}^{-1} \text{WFR}_{i,w}^{-1})$$

mit:

$\text{WFR}_{i,s}$ = 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

$\text{WFR}_{i,w}$ = Wiederfindungsrate des Wirkstoffes i für Wasser in %

Die Wiederfindungsraten (Tab. 3) entsprachen den Analyseergebnissen der beteiligten Forschungslabors. Für die gelöste Phase der Wirkstoffe sind die Bestimmungsgrenzen der Wirkstoffkonzentrationen auf $0,1 \mu\text{g l}^{-1}$ und für die feste Phase auf $0,5 \mu\text{g kg}^{-1}$ Sediment festgelegt worden.

Die Absicherung der verschiedenen Eichgrade während der HPLC-Analysen ist durch eine automatische Korrelationsberechnung bei der Kalibrierung der Messgeräte zu Beginn jeder Analyse erreicht worden. Für die Berechnung der Stofffrachten nach Oberflächenabflussereignissen sind die Konzentrationen der einzelnen Probenahme-Intervalle den jeweiligen Abflussmengen zugeordnet worden. Aus den Frachten in gelöster und gebundener Phase wurde über gewogene Mittelwerte die Frachtsummen an abgetragenem Boden und Wirkstoffen für jedes Abflussereignis der Bodenbearbeitungsvarianten gebildet.

Ergebnisse

In der Nacht vom 21. auf den 22. Juni 1998 wurden drei Niederschlagsereignisse auf dem Standort registriert (Tab. 4). Das erste Ereignis (21.06.) zeigte nur auf einer der Wiederholungen der konventionellen Bodenbearbeitung geringen Oberflächenabfluss (Abb. 3), führte aber zu einer deutlichen Vernässung der Oberfläche, die die Infiltrationsleistung herabsetzte. Der Ablauf der folgenden zwei Niederschlagsereignisse (22.06.) wird in den Abb. 1 und 2 dargestellt. Dort sind der kumulierte Niederschlag sowie der Oberflächenabfluss für die Wiederholungen des konventionellen Bestellverfahrens und des Verfahrens mit konservierender Bodenbearbeitung dargestellt. Es wird deutlich, dass nach ca. 1 mm Niederschlag der Oberflächenabfluss in beiden Wiederholungen des konventionellen Bestellverfahrens innerhalb von 2 Minuten einsetzte und bis kurz nach Regenende anhielt (Abb. 1). Dabei unterschieden sich die Wiederholungen deutlich. Die Ursache für die Unterschiede zwischen den Wiederholungen lag in einer kaum sichtbaren Fahrspur der Saatbettbereitung, die in nur einer Wiederholung vorhanden war. Die Wiederholungen des konservierenden Bestellverfahrens zeigten einen übereinstimmenden Abfluss, jedoch mit einer drastisch verminderten Abflussmenge im Vergleich zum konventionellen Bestellverfahren. Drei Stunden später, um ca. 4:00 Uhr am 22.06., löste ein weiteres Niederschlagsereignis von gleicher Regensumme und ähnlicher max. Intensität, jedoch mehr als doppelter Niederschlagsdauer im Vergleich zu dem vorangegangenen Ereignis, erneut Oberflächenabfluss aus (Abb. 2). Wie nach dem Ereignis um ca. 1:00 Uhr trat erneut Oberflächenabfluss

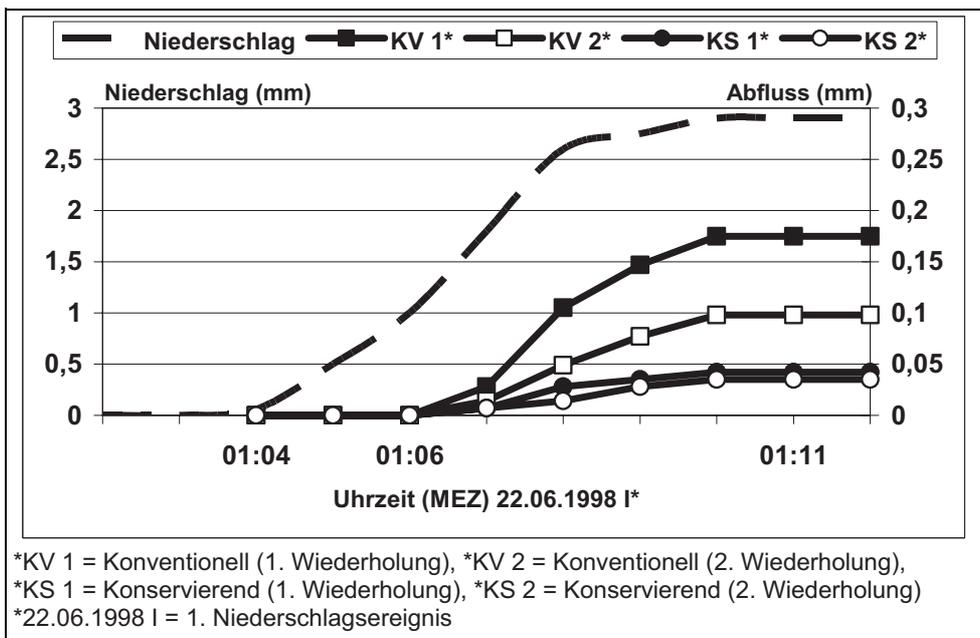


Abb. 1: Kumulierter Niederschlag und Oberflächenabfluss am 22.06.1998 (1. Niederschlagsereignis) auf den Wiederholungen (n=2) der Bestellverfahren "konventionell" und "konservierend" (Mulchsaat) im Mais. Cumulative precipitation and surface runoff from field plots (n=2) with corn under conventional and conservation tillage on 22 June 1998 (1st rainfall event)

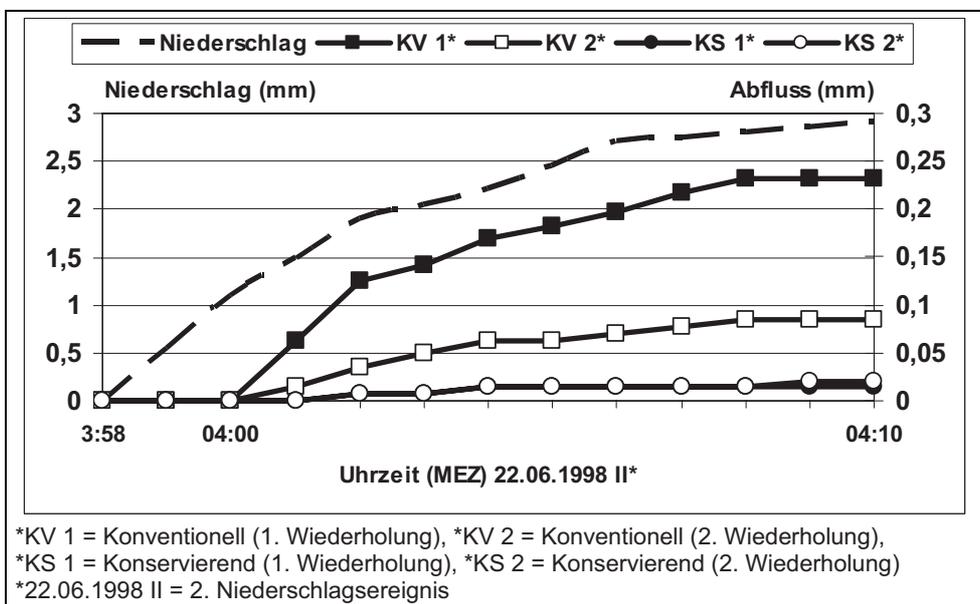


Abb. 2: Kumulierter Niederschlag und Oberflächenabfluss am 22.06.1998 (2. Niederschlagsereignis) auf den Wiederholungen (n=2) der Bestellverfahren "konventionell" und "konservierend" (Mulchsaat) im Mais. Cumulative precipitation and surface runoff from field plots (n=2) with corn under conventional and conservation tillage on 22 June 1998 (2nd rainfall event)

nach ca. 1 mm Niederschlag in den Wiederholungen der konventionellen Variante auf. In der 1. Wiederholung der konventionellen Variante (KV 1) wurde der Abfluss mit 0,24 mm (8,3% vom Niederschlag) ermittelt, während er in der 2. Wiederholung (KV 2) dieser Variante bei 0,08 mm (2,8% vom Niederschlag) lag (Abb. 2). In den zwei Wiederholungen der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung (KS 1 und KS 2) betrug der Oberflächenabfluss jeweils 0,02 mm bzw. 0,7% vom Niederschlag (Abb. 2).

Ausgehend von den zentralen Versuchsfragen konnte der relative Oberflächenabfluss im Vergleich zur Niederschlagssumme für jedes Bestellverfahren in den Versuchsjahren mit Abflussereignissen im Mais berechnet werden (Abb. 3). In der Legende ist das Ereignisdatum mit Angabe des dabei gefallenen Niederschlags angegeben. Von den 8 Ereignissen, die in den 5 Untersuchungsjahren in der Pflugvariante Oberflächenabfluss auslösten, floss nur bei drei Ereignissen in der Variante mit konservierendem Bestellverfahren („Mulchsaat“) Wasser oberflächlich ab. In der Variante mit Direktsaatverfahren konnte bei keinem Ereignis Abfluss nachgewiesen werden. Auch wird deut-

lich, dass mit Ausnahme des Ereignisses vom 30.06.2001 die Niederschlagssumme nur einen geringen Einfluss auf die Höhe des Abflusses hatte, sondern die Niederschlagsintensität (Abb. 1-3, Tab. 4).

Die Abtragsmengen des Bodens auf den Maisparzellen summieren sich für die vier Oberflächenabflussereignisse des Jahres 1998 auf $0,19 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für das konventionelle Verfahren (Abb. 4, Tab. 5). Beim konservierenden Bestellverfahren betrug der Bodenverlust mit $0,02 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nur 11,7% des Verlustes bei Pflugeinsatz. Die Minderungswirkung beträgt also 89,3%. Im Versuchsjahr 1999 wurde ein Bodenabtrag von $0,02 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ beim konventionellen Verfahren ermittelt. Im Versuchsjahr 2001 stieg der Bodenabtrag mit $1,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ beim konventionellen Bestellverfahren auf mehr als das 6fache gegenüber dem des Jahres 1998 an. Beim Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung reduzierte sich der Abtrag auf $0,18 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Dies ergab eine Minderungswirkung um etwa 83,6% gegenüber der Variante mit Pflugeinsatz.

Hinsichtlich des Austrages der Wirkstoffe Metolachlor, Pendimethalin und Terbutylazin in $\text{mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in der ge-

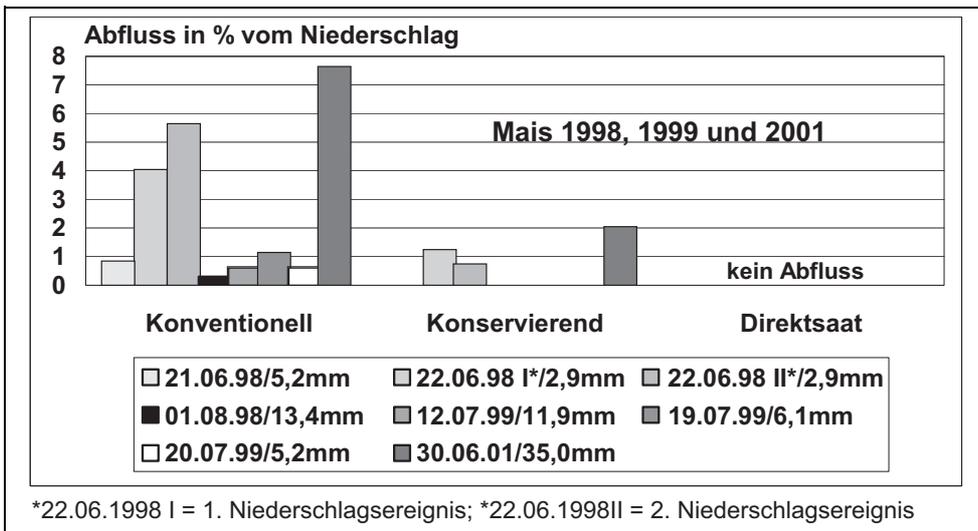


Abb. 3: Relativer Oberflächenabfluss im Vergleich zur Niederschlagshöhe bei drei Bestellverfahren (n=2) auf Parzellen mit Mais
Surface runoff percentage of precipitation under three types of tillage (n=2) on field plots with corn

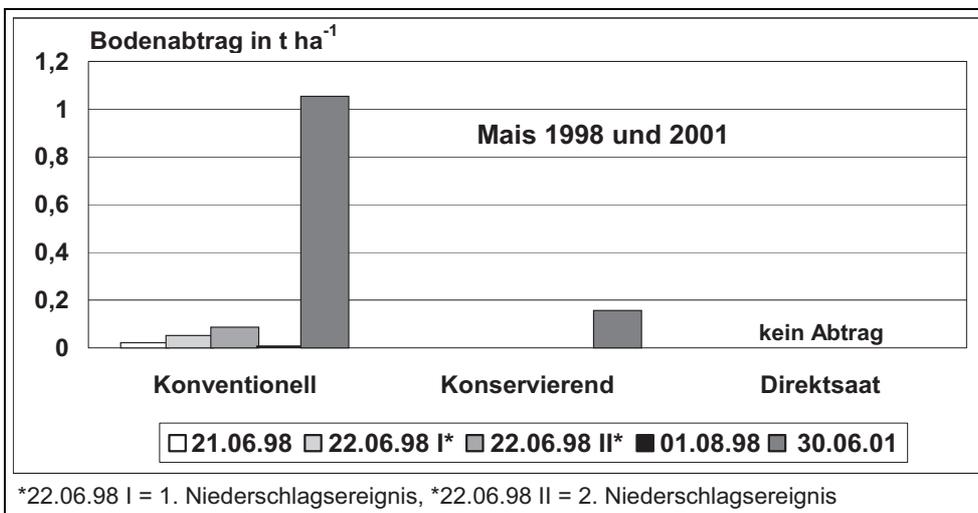


Abb. 4: Bodenabtrag bei drei Bestellverfahren (n=2) auf Parzellen mit Mais
Soil loss under three types of tillage (n=2) on field plots with corn

lösten sowie in der gebundenen Phase des Oberflächenabflusses bilden sich die spezifischen Eigenschaften der Wirkstoffe ab. Bis maximal $0,81 \text{ g ha}^{-1}$ an Metolachlor sind im Jahr 2001 in der Pflugvariante ausgetragen worden, gegenüber $0,21 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. In der Pflugvariante spielt darüber hinaus der sedimentgebundene Wirkstoffaustrag eine gewichtige Rolle im Gegensatz zur Variante mit konservierender Bodenbearbeitung. Der relative Austrag an Metolachlor betrug je nach Ereignisjahr $0,002$ - $0,06\%$ der Applikationsmenge ($0,03$ - $0,81 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Ganz anders verhält sich der Austrag von Pendimethalin (Abb. 5). Dieser Wirkstoff wurde aufgrund seiner chemischen Eigenschaften ausschließlich in gebundener Phase mit dem Erosions sediment ausgetragen. Der gelöste Austrag an Pendimethalin tendierte gegen Null, da die gemessenen Konzentrationen im Abflusswasser oft an der analytischen Nachweisgrenze ($<0,01 \mu\text{g l}^{-1}$) lagen. Die Frachtsummen dieses Wirkstoffes sind beim konventionellen Bestellverfahren mit maximal $0,59 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2001) errechnet worden. Beim Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung lag die Frachtsumme für das gleiche Jahr bei $0,11 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, das entspricht einer Minderung um 81 - 100% . Der höchste Wirkstoffaustrag wurde bei Terbutylazin (Abb. 5, Tab. 5) berechnet. Für das Ereignisjahr 2001 sind bis zu $1,18 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (davon $0,9 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in der gelösten Phase) Terbutylazin in der Pflugvariante ausgetragen worden, während es in der Variante mit konservierendem Bestellverfahren $0,11 \text{ g ha}^{-1}$

a^{-1} waren. Der relative Austrag an Terbutylazin betrug je nach Ereignisjahr $0,005$ - $0,16\%$ der Aufwandmenge. Hinsichtlich des Wirkstoffaustrages bleibt festzuhalten, dass es vor allem die leicht löslichen Wirkstoffe waren, die zu den höchsten Frachtsummen im Oberflächenabfluss eines Versuchsjahres geführt hatten, und zwar unabhängig von den Bestellverfahren.

Beim Vergleich der mittleren Wirkstoffkonzentrationen in der gelösten Phase sowie in der gebundenen Phase zeigte sich 1998 eine weitgehende Übereinstimmung der Konzentrationen zwischen dem konventionellen und konservierenden Bestellverfahren (Abb. 6). Im Jahr 2001 traten in der gebundenen Phase in der konservierend bestellten Variante etwas höhere Mittelwerte der Konzentrationen von Metolachlor und Pendimethalin auf. Bei Terbutylazin waren nach konservierender Bearbeitung die Konzentrationen sowohl in der gebundenen als auch in der gelösten Phase geringer als nach Pflugeinsatz (Abb. 8).

Entsprechend der Sorptionseigenschaften waren die während der Abflussereignisse eines Jahres gemessenen Konzentrationen für Pendimethalin in der gelösten Phase um ein Vielfaches niedriger als bei Metolachlor und Terbutylazin, in den Jahren 1999 und 2001 wurde bei Pendimethalin die Nachweisgrenze unterschritten. Die höchsten Wirkstoffgehalte von Pendimethalin in der gebundenen Phase lagen zwischen 300 und $700 \mu\text{g kg}^{-1}$ Boden (Abb. 6-8). Mit Gehalten zwischen 90 und $440 \mu\text{g kg}^{-1}$ für Metolachlor, sowie zwischen 50 und $290 \mu\text{g kg}^{-1}$ für Terbu-

Tab. 5: Mittlerer Boden- und Herbizidaustrag (gelöst + gebunden) sowie Minderungswirkung konservierender Bestellverfahren im Vergleich zum konventionellen Verfahren mit dem Pflug auf Parzellen mit Mais in den Versuchsjahren 1998, 1999 und 2001
Mean soil and herbicide losses (dissolved + with sediment) and their reduction due to conservation tillage systems in comparison to conventional tillage on field plots with corn in the experimental years 1998, 1999 and 2001

	Konventionell (Pflug, n=2)		Konservierend (n=2)		Minderung zu Pflug rel. (%)	Direktsaat Kein Abfluss
	Austrag		Austrag			
	absolut	rel. (%)	absolut	rel. (%)		
1998						
Bodenabtrag	0,19 t ha ⁻¹		0,02 t ha ⁻¹		89,3	
Terbutylazin (750 g ha ⁻¹)*	0,17 g ha ⁻¹	0,022	0,04 g ha ⁻¹	0,005	78,8	
Metolachlor (1450 g ha ⁻¹)*	0,16 g ha ⁻¹	0,011	0,03 g ha ⁻¹	0,002	83,9	
Pendimethalin (990 g ha ⁻¹)*	0,10 g ha ⁻¹	0,010	0,02 g ha ⁻¹	0,002	85,0	
1999						
Bodenabtrag	0,02 t ha ⁻¹		Kein Abfluss		100	Kein Abfluss
Terbutylazin (750 g ha ⁻¹)*	0,04 g ha ⁻¹	0,006			100	
Metolachlor (1450 g ha ⁻¹)*	0,08 g ha ⁻¹	0,005			100	
Pendimethalin (990 g ha ⁻¹)*	0,06 g ha ⁻¹	0,005			100	
2001						
Bodenabtrag	1,10 t ha ⁻¹		0,18 t ha ⁻¹		83,6	Kein Abfluss
Terbutylazin (750 g ha ⁻¹)*	1,18 g ha ⁻¹	0,155	0,11 g ha ⁻¹	0,015	90,7	
Metolachlor (1450 g ha ⁻¹)*	0,81 g ha ⁻¹	0,055	0,21 g ha ⁻¹	0,015	74,1	
Pendimethalin (990 g ha ⁻¹)*	0,59 g ha ⁻¹	0,060	0,11 g ha ⁻¹	0,010	81,4	

*Applikationsmengen

thylazin zeigte sich eine Abnahme der Stoffgehalte von Pendimethalin über Metolachlor zu Terbutylazin in der gebundenen Phase.

Die Schwankungsbreiten (Max.-Min. = Spannweite) der Konzentrationen während der Abflussereignisse waren in der gebundenen Phase deutlich größer als in der gelösten Phase. Höhere Streuungsmaße der Wirkstoffkonzentrationen traten vor allem im Versuchsjahr 1998 in der konventionell bearbeiteten Variante auf. Entsprechend sind die Standardabweichungen für die einzelnen Wirkstoffe beim konventionellen Bestellverfahren gegenüber dem Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung höher (Abb. 6). Dieser Vergleich fehlt für das Jahr 1999 (Abb. 7), während im Versuchsjahr 2001 der umgekehrte Fall auftrat, dass etwas höhere Standardabweichungen unter konservierender Bodenbearbeitung vorlagen (Abb. 8).

Lagen in der gelösten Phase die mittleren Konzentrationen an Terbutylazin am höchsten, so lagen sie für diesen Wirkstoff in der festen Phase am niedrigsten. Das war in allen Varianten festzustellen. Vergleicht man die einzelnen Untersuchungsjahre, dann sind im Jahr 1998 und 2001 höhere Konzentrationen bzw. Gehalte der drei Wirkstoffe gemessen worden. Auffällig war dabei der geringere zeitliche Abstand von Applikation und Abflussereignis. Im Versuchsjahr 1999 trat das erste Abflussereignis gegenüber den Jahren 1998 und 2001 um ca. drei bis vier Wochen später auf. Gemessene Höchstkonzentrationen der applizierten Wirkstoffe wurden mit Ausnahme des Wirkstoffes Metolachlor im Versuchsjahr 2001 immer in der konventionellen Bearbeitungsvariante ermittelt. Der Wirkstoff Terbutylazin hatte mit 98,8 µg l⁻¹ die höchsten Werte in der gelösten Phase, während in der gebundenen Phase beim Pendimethalin die höchsten Wirkstoffgehalte (980 µg kg⁻¹) gemessen wurden.

Die Ergebnisse des Oberflächenabflusses nach Niederschlagsereignissen belegen den erheblichen Einfluss der Bo-

denbearbeitung auf die Austragsmengen an Bodenmaterial und Herbiziden. Insbesondere die annähernd 100%ige Reduzierung der Boden- und Stoffausträge bei Anwendung des Direktsaatverfahrens ist nicht erwartet worden (Tab. 5). Die Feldstudie zeigte weiterhin, dass das Ausmaß an erosionsbedingten Boden- und Stoffausträgen bei Mais durch konservierende Bodenbearbeitung (Mulchsaat) am ausgewählten Versuchsstandort im Durchschnitt um 74-100% gegenüber dem konventionellen Bestellverfahren mit dem Pflug verringert werden konnte. In einigen Fällen, wie im Versuchsjahr 1999, konnte auch bei Anwendung von Mulchsaat ein 100%iger Schutz vor Oberflächenabfluss und Bodenabtrag gegenüber der Pflugvariante erzielt werden.

Diskussion

Die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Wiederholungen der Pflugvariante (Abb. 1, 2) belegen den großen Einfluss auch geringer Fahrspuren auf das Erosionsgeschehen. Fahrspuren sind integrale Bestandteile des konventionellen Bearbeitungssystems und lassen sich kaum vermeiden. Sie wirken als Initialpfade des Bodenabtrags und stellen die wichtigste Ursache für die höhere Streuung der Ergebnisse im konventionellen Bearbeitungssystem dar.

Die im Feldversuch gewonnenen Ergebnisse sind vergleichbar mit denen von SCHMIDT et al. (1997), die Bodenabtragsmessungen zwischen konventionellem und pfluglosem Ackerbau unter natürlichen Bedingungen im mittelsächsischen Hügelland bewerteten. Der Vorteil der pfluglosen Bearbeitungssysteme zeigte sich am Versuchsstandort besonders bei Starkniederschlägen. Diese Beobachtung machten auch MÜLLER & LÜTKE ENTRUP (2001) während ihrer Versuche auf Großparzellen in Nordrhein-Westfalen. Das bedeutet, dass gerade bei Mais in der Zeit zwischen Mai

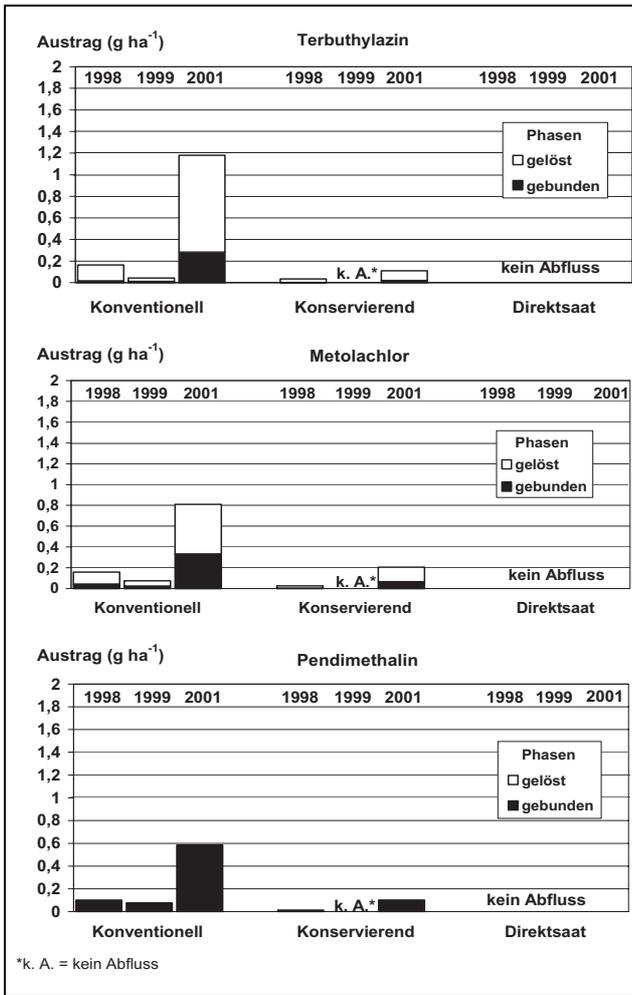


Abb. 5: Wirkstoffaustrag durch Oberflächenabfluss bei drei Bestellverfahren (n=2) auf Parzellen mit Mais (Applikation: Terbutylazin 750 g ha⁻¹, Metolachlor 1450 g ha⁻¹, Pendimethalin 990 g ha⁻¹)
Herbicide loss from surface runoff under three types of tillage on field plots with corn (Application: terbutylazin 750 g ha⁻¹, metolachlor 1450 g ha⁻¹, pendimethalin 990 g ha⁻¹)

und dem Bestandesschluss im Juli ein wirksamer Schutz vor Wassererosion und damit einhergehendem Austrag von Herbiziden erzielt werden kann. Die für die Messzeiträume hochgerechneten Bodenabträge in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung reduzierten sich um mehr als 80% im Vergleich zur konventionell bearbeiteten Variante. Die gesamten Bodenverluste in den durch Oberflächenabfluss betroffenen Versuchsjahren mit Mais summierten sich auf der Pflugvariante auf bis zu 1,5 t ha⁻¹ a⁻¹ (Abb. 4). Damit liegt der berechnete Bodenverlust unterhalb der nach der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) errechneten Toleranzgrenze für den Versuchsstandort. Allerdings 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.

KLEIN et al. (2001) kamen bei ihren Feldversuchen mit Oberflächenabflussmessungen im Mais unter konventioneller Bearbeitung für die gleichen Wirkstoffe in derselben Aufwandmenge des Präparates von 6 l ha⁻¹ wie im eigenen Feldversuch auf relative Herbizidausträge, die ähnlich hoch bei 0-1% der applizierten Wirkstoffmenge waren. Dabei hatte Terbutylazin mit 0,9% im ersten Versuchsjahr

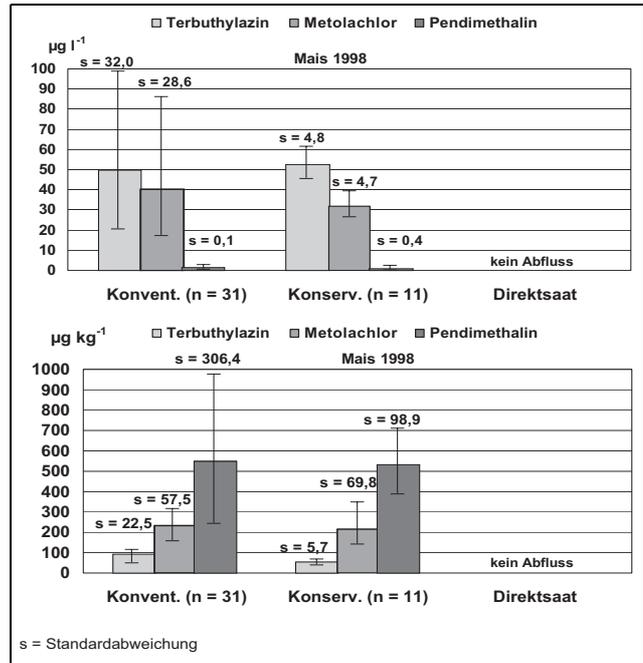


Abb. 6: Mittlere Konzentrationen und Spannweiten an Terbutylazin, Metolachlor und Pendimethalin in der gelösten Phase (µg l⁻¹) sowie in der gebundenen Phase (µg kg⁻¹) des Oberflächenabflusses bei drei Bestellverfahren (n=2) auf den Parzellen mit Mais 1998
Mean concentrations and ranges of terbutylazin, metolachlor and pendimethalin, dissolved (µg l⁻¹) and fixed on sediment (µg kg⁻¹) from surface runoff under three types of tillage (n=2) on field plots with corn in 1998

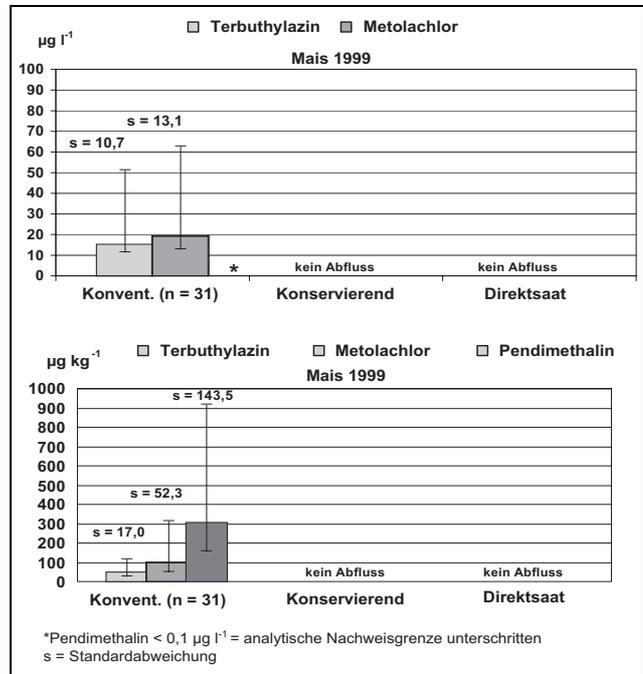


Abb. 7: Mittlere Konzentrationen und Spannweiten an Terbutylazin, Metolachlor und Pendimethalin in der gelösten Phase (µg l⁻¹) sowie in der gebundenen Phase (µg kg⁻¹) des Oberflächenabflusses bei drei Bestellverfahren (n=2) auf den Parzellen mit Mais 1999
Mean concentrations and ranges of terbutylazin, metolachlor and pendimethalin, dissolved (µg l⁻¹) and fixed on sediment (µg kg⁻¹) from surface runoff under three types of tillage (n=2) on field plots with corn in 1999

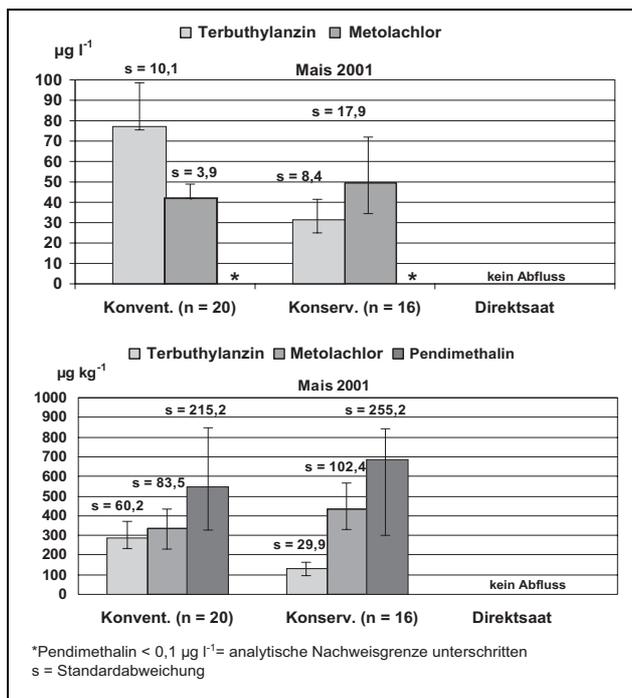


Abb. 8: Mittlere Konzentrationen und Spannweiten an Terbutylazin, Metolachlor und Pendimethalin in der gelösten Phase ($\mu\text{g l}^{-1}$) sowie in der gebundenen Phase ($\mu\text{g kg}^{-1}$) des Oberflächenabflusses bei drei Bestellverfahren ($n=2$) auf den Parzellen mit Mais 2001

Mean concentrations and ranges of terbuthylazin, metolachlor and pendimethalin, dissolved ($\mu\text{g l}^{-1}$) and fixed on sediment ($\mu\text{g kg}^{-1}$) from surface runoff under three types of tillage ($n=2$) on field plots with corn in 2001

die höchste relative Austragsmenge und Pendimethalin (0,57%) zusammen mit Metolachlor (0,58%) die niedrigste. Im zweiten Versuchsjahr wurde Metolachlor mit 0,32% der Applikationsmenge im Oberflächenabfluss nachgewiesen. Pendimethalin wurde hingegen mit 0,09% ausgetragen. Zu wesentlich höheren Austragsmengen an Herbiziden kamen ROSNER & KLIK (2001) in ihren Feldversuchen mit Mais, Zuckerrüben und Sonnenblumen bei unterschiedlichen Bestellverfahren. Sie berechneten relative Austragsmengen an Wirkstoffen im Durchschnitt von 1-6% im Jahr. Dabei verringerte sich der Herbizidaustrag in der Variante mit konservierender Bodenbearbeitung um ca. 70%, während er sich beim Direktsaatverfahren nur um ca. 54% reduzierte. In diesen Versuchen konnte nicht geklärt werden, warum die Direktsaatvariante schlechteren Schutz vor Oberflächenabfluss und Stoffaustrag bot. Allerdings handelte es sich bis auf Pendimethalin um andere Wirkstoffe mit unterschiedlichen Aufwandmengen und Eigenschaften. REDDY et al. (2001) untersuchten Austräge an Metolachlor bei differenzierter Bodenbearbeitung. Bei Anwendung des Direktsaatverfahrens war nur noch 20% des Austrages an Metolachlor gegenüber dem konventionellen Verfahren zu verzeichnen. Die relativen Austräge waren jedoch mit bis zu fast 9% der Applikationsmenge ungleich höher. Bei Feldversuchen mit konventionellem Bestellverfahren in Kanada berechneten NG & CLEGG (1997) einen Verlust an Metolachlor von nur 0,03% der Applikationsmenge durch Oberflächenabfluss. LANG & HURLE (1997) maßen weit weniger hohe Spitzenkonzentrationen ($30 \mu\text{g l}^{-1}$) bei Terbutylazin in gelöster Phase als in den eigenen Feldversuchen nachgewiesen wurde. Dagegen erhielten sie deutlich höhere Spitzenkonzentrationen an Terbutyl-

azin und Pendimethalin in gebundener Phase. In Freilandversuchen mit Mais in Bayern kamen SCHÜLEIN et al. (1996) zu ähnlich hohen Wirkstoffkonzentrationen an Terbutylazin in gelöster Phase. Sie wiesen jedoch nach, dass Terbutylazin nur mit einem geringen Anteil an der Applikationsmenge in ein Fließgewässer gelangte. Wesentlich höhere Konzentrationen in gelöster Phase fanden KORSAETH et al. (1997), KÖRDEL & KLÖPPEL (1997) sowie HAIDER & AUERSWALD (1997) bei Regensimulationsversuchen mit Isoproturon. Sie erhielten Spitzenkonzentrationen von mehreren Hundert bis $1000 \mu\text{g l}^{-1}$ in der gelösten und gebundenen Phase des Oberflächenabflusses. Beide gingen von einem „worst case-Ansatz“ aus, bei dem hohe bis sehr hohe Niederschlagsintensitäten simuliert wurden, mit maximaler zugelassener Aufwandmenge an Herbiziden und nur 1-2 h nach Applikation einsetzender Beregnung. 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 in der gelösten Phase. Alle Versuche zeigten aber - die Eigenen mit eingeschlossen - dass trotz relativ geringer Herbizidausträge von ackerbaulich genutzten Flächen hohe Spitzenkonzentrationen im Oberflächenabfluss auftraten und durch vermehrten Austrag von konventionell bearbeiteten Ackerflächen zur Gewässerbeeinträchtigung führen können.

Nach 5-jähriger Feldstudie über das Ausmaß von Oberflächenabflussereignissen bei 3 verschiedenen Bestelltechniken kann insgesamt festgehalten werden, dass die Herbizidausträge einzelner Versuchsjahre sich in allen Varianten auf niedrigem Niveau bewegten. Auf den pfluglosen Bearbeitungsvarianten konnte das Ausmaß an Boden- und Herbizidaustrag insgesamt und während Einzelereignissen zwischen 74 und 100% reduziert werden. Trotz des im Vergleich zu anderen Feldstudien eher geringen Verlustes an Herbiziden, 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 auffälligen Konzentrationsunterschiede. Ohne registrierten Oberflächenabfluss in 5 Jahren blieb die Variante mit Direktsaat. Das Austragsniveau von Bodenmaterial ($1,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) durch Oberflächenabfluss auf der konventionell bearbeiteten Variante muss hingegen als nicht tolerabel bezeichnet werden. Die hohen Ton- und Humusgehalte im Oberboden des auf der Feldversuchsfläche vorherrschenden Bodentyps hatten keine deutlich mindernde Wirkung gegen Verschlämzung und Bodenabtrag auf der Pflugvariante. Der Herbizidaustrag ist durch pfluglose Bestelltechniken zu verringern. Bedeutsam ist die Betrachtung der Stoffkonzentrationen im Abflusswasser und -sediment während eines Abflussereignisses. Hier besteht die Gefahr einer Belastung der Oberflächengewässer, wenn bis zum Gewässereintrag von Stoffen keine Verdünnungseffekte eintreten. Vor diesem Hintergrund kommt der konservierenden Bodenbearbeitung sowie der Direktsaat aufgrund ihrer gegenüber konventionell bearbeiteten Ackerflächen hohen Minderungswirkung von Boden- und Stoffaustrag eine große Bedeutung zu. Die Feldstudie hat gezeigt, dass pfluglose Bestelltechniken im Ackerbau durch ihren flächenhaften Strategieansatz das Ausmaß des Verlustes an herbiziden Wirkstoffen auf ein Minimum reduzieren können.

Literatur

AKKAN, Z., H. FLAIG & K.-H. BALLSCHMITER, 2003: Pflanzenbehandlung- und Schädlingsbekämpfungsmittel in der

- Umwelt. Emissionen, Immissionen und ihre human- und ökotoxikologische Bewertung. Schmidt, Berlin.
- AUERSWALD, K., E. NILL & U. SCHWERTMANN, 1991: Verwitterung und Bodenbildung als Kriterien des tolerierbaren Bodenabtrages. Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch **68**, 609-627.
- BACH, M., A. HUBER & H.-G. FREDE, 2001: Input pathways and river load of pesticides in Germany – A national scale modelling assessment. *Water Science Technology* **43** (5), 261-268.
- BACH, M., B. RÖPKE & H.-G. FREDE, 2005: Pesticides in rivers – Assessment of source apportionment in the context of WFD. European Water Management Online – Official Publication of the European Water Association, 1-14.
- BUCHNER, W., 2000: Erosion dauerhaft abwehren. *Mais* (4), 144-148.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL, HRSG.), 2001: Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. BMVEL, Bonn, Berlin.
- DOMSCH, K.-H., 1992: Pestizide im Boden - Mikrobieller Abbau und Nebenwirkungen auf Mikroorganismen. VCH, Weinheim.
- EUROPEAN CONSERVATION AGRICULTURE FEDERATION (ECAAF) & GESELLSCHAFT FÜR KONSERVIERENDE BODENBEARBEITUNG (GKB) (HRSG.), 1999: Konservierende Bodenbearbeitung in Europa: Umweltrelevante, ökonomische und EU politische Perspektiven. <http://www.ecaf.org/aleman/aleman.htm>
- FREDE, H.-G., P. FISCHER & M. BACH, 1998: Reduction of herbicide contaminations in flowing waters. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **161**, 395-400.
- FRIELINGHAUS, M., G. HÖFLICH, M. JOSCHKO, H. ROGASIK & H. SCHÄFER, 1997: Auswertung eines Langzeitexperimentes zur konservierenden Bodenbearbeitung von Sandböden und Einschätzung des Erfolgs. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **41**, 383-402.
- GEISELHART, C., 1994: Abbau- und Transportverhalten von Pflanzenschutzmitteln unter Pflanzenbeständen. Diss. Univ. Hohenheim.
- HAIDER, J. & K. AUERSWALD, 1997: Prozesse bei der Pflanzenschutzmittelverlagerung mit Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* **330**, 7-18.
- HUBER, A., M. BACH & H.-G. FREDE, 2000: Pollution of surface waters with pesticides in Germany: Modelling non-point source inputs. *Agriculture Ecosystem Environment* **80**, 191-204.
- KLEIN, C., S. PÄTZOLD & G. W. BRÜMMER, 2001: Einfluss von Vegetationsfilterstreifen auf Pflanzenschutzmittelausträge mit dem Oberflächen- und Zwischenabfluss. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **96** (2), 627-628.
- KLIMSA, K.-G. 1996: Sorption, Verlagerung und Abbau von ausgewählten Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen in Böden unterschiedlichen Stoffbestandes mit und ohne Mulch - Labor- und Freilanduntersuchungen. *Bonner Bodenkundliche Abhandlungen* **18**. Institut für Bodenkunde, Univ. Bonn.
- KÖRDEL, W. & H. KLÖPPEL, 1997: Runoff-Versuche an Großparzellen. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* **330**, 7-18.
- KORSAETH, A., P. MÜLLER-BERGHÖFER, K. MOLLENHAUER, P. FISCHER, M. BACH & H.-G. FREDE, 1997: Der Einfluss von organischer Bodenbedeckung auf den Oberflächentransport von Isoproturon. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **160**, 519-523.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (HRSG.), 1997: Analysevorschrift für die Probenvorbereitung zur Bestimmung ausgewählter Herbizide in Wasser und Boden. Unveröffentlichter Bericht des Dezernates 331.3., Düsseldorf.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE (HRSG.), 2003: Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz - Ausgabe 2003. Münster.
- LANG, S. & K. HURLE, 1997: Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer durch Runoff. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* **330**, 7-18.
- LÜTKE ENTRUP, N., 1996: Bodenbearbeitung, Bodenbelastung und Bodenverbesserung. In: PAHL, M. (Hrsg.): Bodennutzung, Bodenschädigung und Bodensanierung. Universität-GH Paderborn und Westfälisches Umweltzentrum, Paderborn (WUZ).
- MÜLLER, I. & N. LÜTKE ENTRUP, 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 (wiss. Begleitung)“, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen.
- NG, H. Y. F. & S. B. GLEGG, 1997: Atrazine and Metolachlor losses in runoff events from an agricultural watershed: The importance of runoff components. *The Science of the Total Environment* **193**, 215-228.
- REDDY, G. B., C. W. RACZKOWSKI, M. R. REYES & 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. & D. C. FLANAGAN (Eds.) 2001: Soil erosion research for the 21ST century. Proceedings of the international Symposium by the American Society of Agricultural Engineers, 669-672.
- ROSNER, J. & A. KLIK 2001: Wirkstoffabtrag bei konventionell, konservierend und direkt bewirtschafteten Ackerflächen. 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein in Irnding, Österreich, 219-220.
- SCHMIDT, W., A. MICHAEL & J. SCHMIDT, 1997: Ergebnisse von Bodenabtragsmessungen auf konservierend bestellten Ackerflächen als Beratungsgrundlage für wassererosionsmindernde Anbauverfahren in Sachsen. *VDLUFA-Schriftenreihe* **46**, Kongressband, 675-678.
- SCHÜLEIN, J., W. E. GLÄSSGEN, N. HERTKORN, P. SCHRÖDER, H. SANDERMANN & A. KETTRUP, 1996: Detection and identification of the herbicide isoproturon and its metabolites in field samples after a heavy rainfall event. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* **65**, 193-202.
- SEYFARTH, M., D. DEUMLICH, M. FRIELINGHAUS, K. HELMING & H. PFÜTZENREUTER, 1993: Messsystem zur automatischen Registrierung des Oberflächenabflusses und zur abflussabhängigen Probennahme. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **37**, 379-385.
- SOMMER, C., 1999: Konservierende Bodenbearbeitung - ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. *Bodenschutz* (1), 15-19.
- UMWELTBUNDESAMT (HRSG.), 2000: Schätzung der Einträge von Pflanzenschutzmitteln aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer Deutschlands. Schmidt, Berlin.

Eingegangen am 20. Juni 2006;
angenommen am 24. Februar 2008

Anschrift der Verfasser: Dr. Frank Erlach, Prof. Dr. Norbert Lütke Entrup, Dr. Franz Ferdinand Gröblichhoff, Fachbereich Agrarwirtschaft, Fachhochschule Südwestfalen, Lübecker Ring 2, D-59494 Soest