

Sonderheft 305
Special Issue



Landbauforschung
Völkensrode
FAL Agricultural Research

**Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur
Minderung von Bodenschadverdichtungen, Boden-
erosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide**

Joachim Brunotte

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

2007

**Landbauforschung Völkenrode - FAL Agricultural Research
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany**

landbauforschung@fal.de

Preis / Price: 14 €

**ISSN 0376-0723
ISBN 978-3-86576-029-6**

**Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung
von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off
und Mykotoxinbildung im Getreide**

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	3
2 Problemstellung, Ziele und Thesen	7
3 Problemlösungen	11
(Stand des Wissens anhand fremder Übersichts-literatur)	
3.1 Bodenschonung – Verminderung von Bodenschadverdichtungen	12
3.1.1 Verbreitung und Formen von Bodenschadverdichtungen	14
3.1.2 Auswirkungen von Bodenschadverdichtungen.....	16
3.2 Bodenschutz im engeren Sinne – Verminderung von Bodenerosion.....	21
3.2.1 Beschreibung und Folgen von Bodenerosion.....	22
3.2.2 Vermeidungsstrategien gegen Bodenerosion	26
3.3 Run off von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer.....	29
3.3.1 Eintragspfade und Stoffeigenschaften von Pflanzen- schutzmitteln (PSM)	30
3.3.2 Einfluss von Bodenbearbeitung und Bedeckung auf Ober- flächenabfluss, Makroporenfluss und Austrag über Drainagen.....	33
3.4 Mykotoxinbildung im Getreide.....	37
3.4.1 Entstehung von Mykotoxinen und gesetzliche Regelungen	38
3.4.2 Einflussfaktoren auf die Fusarium-Toxinbildung bei Getreide.....	42
4 Integrierte Bewertung der eigenen Feldversuche – Hypothesen und Ergebnisse	49
4.1 Bodenschonung durch schonende Lockerung	50
4.1.1 Status quo zum Bodengefüge bei der Landwirtschaft	50
4.1.2 Einfluss von Bodenbearbeitung und Befahrung auf morpholo- gische und funktionale Bodeneigenschaften zur Beschreibung von Bodenschadverdichtungen	55
4.1.3 Felduntersuchungen zur Überprüfung des Konzeptes 'Boden- schonendes Befahren': Auswirkung heutiger Agrartechnik auf bodenphysikalische Parameter	58
4.1.4 Befahrbarkeitssensor als Indikator für die Anpassung des Maschineneinsatzes an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden	66

4.2	Bodenschutz – Mulchsaat als Oberflächenschutz	73
4.2.1	Verbesserung der Bodenstruktur	75
4.2.2	Veränderung der Fahrzeugparameter und Arbeitsverfahren	90
4.3	Gewässerschutz – Minderung von Run off in Oberflächengewässer	93
4.4	Verbraucherschutz – Minderungsstrategien zur Mykotoxinbildung im Getreide.....	99
5	Konservierende Bodenbearbeitung zwischen Boden-, Gewässer- und Verbraucherschutz im Dialog nachhaltiger Bodennutzung	109
6	Zusammenfassung/Summary	122
7	Literaturverzeichnis	127
	Abkürzungen/Glossar	149
	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	155
	Danksagung	159

1 Einleitung

Böden bilden die dünne Haut der Erde – sie sind eine knappe nicht erneuerbare natürliche Ressource und nehmen in terrestrischen Ökosystemen eine zentrale Stellung ein. Deshalb hat 1997 die Enquete-Kommission des Bundestages "Schutz des Menschen und der Umwelt" als übergeordnetes Umweltziel „die Erhaltung bzw. Wiederherstellung der Funktionen von Böden als endliche Ressource“ formuliert. Bisher sind national, auf EU-Ebene und weltweit die Bodencharta vom Europarat (Europarat, 1972), die Weltbodencharta der FAO (FAO, 1982), die Weltbodenstrategie UNEP (UNEP, 1982) und in der EU-Kommission "Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie" (EU, 2002) angestoßen bzw. umgesetzt worden.

Der Boden ist nicht nur Pflanzenstandort, Lebensraum für Bodenorganismen und dient dem Menschen zu Siedlungszwecken, sondern hat darüber hinaus auch viele weitere Funktionen, z. B. als Grundwasserspeicher und als Puffer-, Filter- und Transformationssubstrat für alle Stoffe, die auf und in den Boden gelangen. Der Landwirt nutzt die Umweltgüter Boden, Wasser und Luft und stellt der Bevölkerung kostengünstige und hochwertige Nahrungsmittel zur Verfügung. Er steht damit in einer hohen Verantwortung gegenüber der Natur und der Gesellschaft.

Nachhaltige landwirtschaftliche Produktion basiert auf der

- Erhaltung und Verbesserung der Produktionsgrundlagen
- Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit in Verbindung mit der Stärkung der ländlichen Räume als Wirtschaftsstandorte und
- Erhaltung der Stabilität und Funktionssicherheit der sozialen Systeme in den ländlichen Räumen.

Das Prinzip der Nachhaltigkeit ist festgeschrieben durch den Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Weltkommission, 1987), durch den Umweltgipfel in Rio de Janeiro (UNCED, 1992) und u. a. auch dokumentiert durch die Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland (BMVEL, 2000).

Die umweltpolitischen Forderungen für den Produktionsfaktor Boden sind im **Bundes-Bodenschutzgesetz** (BBodSchG, 1998) konkretisiert, womit der Boden als drittes schutzwürdiges Medium neben Wasser und Luft gilt.

Zu den Leitbildern eines vorsorgenden Bodenschutzes gehört (wiss. Beirat Bodenschutz beim BMU "Ohne Boden – bodenlos", 2000), dass die Böden als knappe, nicht erneuerbare natürliche Ressource in ihrer Leistungsfähigkeit und ihrer natürlichen Funktion flächendeckend zu erhalten sind. Belastungen und Fehlnutzungen sind zu vermeiden. Die Böden stehen in enger Wechselbeziehung zum Naturhaushalt, zur menschlichen Ernährung und zur Volkswirtschaft. Durch ihre wichtigen Funktionen in den ökologischen Kreisläufen und in den sozioökonomischen Systemen (Buchwald & Engelhardt, 1999) zielt das BBodSchG u. a. auf die Erhaltung bzw. Wiederherstellung der Bodenfunktionen (KTBL, 1998) hin.

Von spezieller Bedeutung sind hier:

1. *natürliche Funktion* als

- Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen,
- Bestandteil des Naturhaushaltes mit Regelungsfunktion für Wasser- und Stoffkreisläufe und
- Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen durch Filter- und Puffereigenschaften zum Schutz des Grundwassers;

2. *Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte* und die

3. *Nutzungsfunktion* als

- Standort für land- und forstwirtschaftliche Nutzung und Produktion von landwirtschaftlichen Erzeugnissen,
- Fläche für Siedlung, Verkehr und Erholung und
- Rohstofflagerstätte.

Für den Landwirt steht die **Produktionsfunktion** im Vordergrund, da auf der Anbaufläche Nahrungs- und Futtermittel sowie nachwachsende Rohstoffe hergestellt werden. Da der Boden der wichtigste Produktionsfaktor ist, gelten die Anstrengungen der Landwirte vor allem der Erhaltung und Verbesserung der Fruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit der Böden.

Eng damit verknüpft ist die **Regelungsfunktion**. Sie umfasst Stoffumwandlungen, den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt sowie die Filterung und Pufferung von Stoffen und beeinflusst damit auch die Produktionsfunktion des Bodens.

Daneben ist die **Lebensraumfunktion** zu berücksichtigen. Sie wird durch Organismen beschrieben, die durch ihren Stoffwechsel und Energieumsatz für die Humusbildung und den Abbau organischer Substanz verantwortlich sind.

Der Landwirt greift mit einer Reihe von Maßnahmen in das komplexe Wirkungsgefüge "Boden-Wasser-Pflanze-Atmosphäre" ein: Fruchtfolgegestaltung, Lieferung von organischen Stoffen, Nährstoff- und Wasserzufuhr, Pflanzenschutzmitteleinsatz und Bodenbearbeitung. Ihm steht eine Reihe von hoch spezialisierten Maschinen, Geräten und Transportfahrzeugen zur Verfügung. Rationalisierungseffekte und Bodenschutzaspekte sind insbesondere beim Einsatz von Technik bei der Ernte und bei Feldtransporten sowie Verteilung organischer Dünger gut aufeinander abzustimmen. Dabei gilt es schädliche Nebeneffekte weitestgehend zu vermeiden, um dem Ziel nachhaltiger Landbewirtschaftung, leistungsfähig und zugleich umweltverträglich zu sein, gerecht zu werden. Die sich daraus ableitende Schutzbedürftigkeit gilt für die Bereiche Bodenschutz, Gewässerschutz und Verbraucherschutz.

Dabei sind folgende Gesetze und Verordnungen auf Bundes- und Landesebene zu beachten, wobei die wichtigsten im Folgenden kurz erläutert werden:

- Grundgesetz (GG):
"Am Gemeinschaftsgut Boden sind auch solche Funktionen zu schützen, die für die Gemeinschaft von Bedeutung sind." (Art. 20a; BRD, 1949).
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG):
Die Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen (§§ 7, 17) und die Abwehr daraus resultierender Gefahren (§§ 4, 17) sind in diesem Gesetz rechtlich geregelt. Die Vorsorgepflicht innerhalb der landwirtschaftlichen Bodennutzung wird durch die Einhaltung von Grundsätzen der guten fachlichen Praxis erfüllt. Dabei ist Bodenbearbeitung standortangepasst durchzuführen, sind Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion zu vermeiden, die biologische Aktivität des Bodens, der standorttypische Humusgehalt und naturbetonte Strukturelemente zu erhalten und zu fördern (BMU, 1998).
- Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz – PflSchG):
Zweck dieses Gesetzes ist es, Pflanzen, insbesondere Kulturpflanzen, vor Schadorganismen und nichtparasitären Beeinträchtigungen zu schützen, Pflanzener-

zeugnisse vor Schadorganismen zu schützen und Gefahren abzuwenden, die durch die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln oder durch andere Maßnahmen des Pflanzenschutzes, insbesondere für Gesundheit von Mensch, Tier und für den Naturhaushalt, entstehen können (BML, 1986).

- **Trinkwasserverordnung (TrinkwV):**
Zweck der Verordnung ist es, die menschliche Gesundheit vor den nachteiligen Einflüssen, die sich aus der Verunreinigung von Wasser ergeben, das für den menschlichen Gebrauch bestimmt ist, durch Gewährleistung seiner Genusstauglichkeit und Reinheit nach Maßgabe von Vorschriften zu schützen (BMU, 1986). Ergänzt ist die TrinkwV durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) zum Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe im Rahmen allgemeiner politischer Maßnahmen für den Süßwasserschutz (EG, 2000).
- **Mykotoxin-Höchstmengenverordnung (MHmV):**
Getreidebasierende Lebensmittel, inklusiv Säuglingsnahrung, deren Gehalt an den genannten Mykotoxinen die festgesetzten Höchstmengen einzeln oder in der Summe überschreitet, dürfen weder unvermischt noch nach Vermischung als Lebensmittel in den Verkehr gebracht oder zur Herstellung von Lebensmitteln verwendet werden (EU-Kommission, 2005).

Neben dem eigenen Interesse des Landwirts, Boden-, Gewässer- und Verbraucherschutz zu betreiben, hat der Gesetzgeber sich durch die aufgeführten Gesetze und einer Vielzahl von Verordnungen eingeschaltet, diesen Grundsätzen zukünftiger Landbewirtschaftung weiter Nachdruck zu verleihen.

Um die Akzeptanz weiter zu erhöhen, sind im Gesetz zur Umsetzung der Reform der gemeinsamen Agrarpolitik in Art. 2 (BRD, 2004), § 2 Grundanforderungen an die Betriebsführung und die Instandhaltung von landwirtschaftlichen Flächen gestellt. Dabei hat der Betriebsleiter, der Direktzahlungen beantragt hat,

1. seinen Betrieb nach den Grundanforderungen an die Betriebsführung nach VO (EG) Nr. 1782/2003 zu führen,
2. geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um seine landwirtschaftlichen Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand zu erhalten, insbesondere hinsichtlich des

- Schutzes des Bodens vor Erosion,
 - Erhaltes der organischen Substanz im Boden,
 - Erhaltes der Bodenstruktur,
3. das aus der landwirtschaftlichen Produktion genommene Acker- und Grünland so zu erhalten, damit auch zukünftig landwirtschaftliche Nutzung möglich ist.

Damit geht die Realisierung von Schutzmaßnahmen heute über den Status der Freiwilligkeit weit hinaus, da diese fester Bestandteil der Landbewirtschaftung sind und auch maßgeblich über die Einkommenssituation von Betrieben mitentscheiden. Vor diesem Hintergrund wird die Agrarforschung zukünftig neben Weiterentwicklung und Umsetzung praktischer Handlungsempfehlungen für gute fachliche Praxis bei der Landbewirtschaftung die Konkretisierung von Indikatorsystemen zur Beurteilung der Umweltwirkungen bereitstellen müssen. – Hierzu will die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

Die bei der Landbewirtschaftung entstehenden unerwünschten Nebeneffekte wie z. B. Bodenerosion, Bodenschadverdichtung, Pflanzenschutzmittelaustrag und Mykotoxinbildung im Getreide werden in ihrem Ausmaß bewertet und als Probleme klar formuliert.

2 Problemstellung, Ziele und Thesen

'Konservierende Bodenbearbeitung', mit den beiden Bausteinen schonende nicht wendende Lockerung und Mulchsaat, ist heute über die Erprobungsphase hinaus und aus technischer, wirtschaftlicher und administrativer Sicht fester Bestandteil nachhaltiger Landbewirtschaftung. Es geht nicht mehr um die Abwägung der Alternativen Pflug oder Mulchsaat, sondern vielmehr darum, 'Konservierende Bodenbearbeitung' standort-, fruchtfolge- und betriebsspezifisch zu optimieren. Die Anpassung der Fruchtfolge an die reduzierte Bearbeitungsintensität stellt nach wie vor ein Problem dar und ist oft mit marktpolitischen Aspekten nicht zu vereinbaren.

Liegt die Akzeptanz bei Mulchsaat von Reihenfrüchten zur Verminderung von Bodenerosion und Run off regional schon bei 70 % (siehe Abb. 25), wird die schonende Lockerung fruchtfolgespezifisch eher wenig umgesetzt. Während der Effekt

von organischen Rückständen zur Verminderung von Verschlammung, Run off und Bodenabtrag offensichtlich an der Bodenoberfläche zu erkennen ist, wird der Beitrag reduzierter Lockerung nach Tiefe und Intensität über die Fruchtfolge auf die Tragfähigkeit von Ackerböden in der Praxis bisher kaum gesehen. Zum einen können Bodenschadverdichtungen "im Verborgenen" entstehen, sind also nicht an der Oberfläche erkennbar, zum anderen wird die Bearbeitungsintensität in der Praxis immer noch zu häufig mit der Ertragshöhe in Verbindung gebracht, obwohl dies wissenschaftlich nicht belegt ist (Sommer, 1998). Da nur wenige Betriebe auf Lockerung verzichten und in der Regel bis auf Krumentiefe lockern, fallen zudem hohe Arbeitserledigungskosten an und stellen somit zunehmend ein Rentabilitätsproblem dar.

Die Notwendigkeit wendender Bodenbearbeitung wird zudem mit der tiefen Einmischung von Pflanzenrückständen in die Krume begründet, um das Infektionsrisiko für Krankheiten an der Oberfläche zu reduzieren und die Sätechnik funktions-sicher arbeiten zu lassen. Deshalb ist die Bodenbearbeitung mit Pflug insbesondere in Mais-Getreide- und getreidereichen Fruchtfolgen weit verbreitet. Das Vergraben organischer Rückstände mit dem Pflug sorgt kurzfristig für eine Reduzierung des Infektionsrisikos. Da im Folgejahr die Reststoffe jedoch wieder hochgepflügt werden, stellen sie erneut eine Infektionsquelle für das Getreide dar.

Die Bedeutung kurzer, gleichmäßig verteilter Vorfruchtreste für eine ordnungsgemäße Einarbeitung und schnelle Rotte wird in der Praxis deutlich unterschätzt. Auch treten weitere Präventivmaßnahmen wie Sortenwahl und Fruchtfolge hinter dem Ziel, Höchsterträge zu erreichen, weitestgehend zurück; die Rentabilitätsbetrachtung berücksichtigt vornehmlich Kosten und Erträge der einzelnen Frucht und vergisst die Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich Bodenschutz und Gesundheit von Getreide über die gesamte Fruchtfolge. Es fehlt der ganzheitliche Bewertungsansatz, der einen Abwägungsprozess vor dem Hintergrund einer 'Integrierten Landbewirtschaftung' darstellt.

Der 'Integrierte Landbau' bewertet die landwirtschaftliche Produktion nach der Langzeitwirkung, nach dem Nachhaltigkeitsprinzip und der Umweltsicherung. Ökologische, ökonomische und soziale Aspekte werden zu Landbausystemen zusammengeführt, die in die Praxis eingesetzt werden können (Diercks & Heitefuß, 1990;

Lütke Entrup & Oehmichen, 2000). Des Weiteren führt die Überlockerung der Krume durch den Pflug zu einer Verringerung der Tragfähigkeit. Dies kann insbesondere beim Befahren mit schweren Erntemaschinen und Transporteinheiten unter feuchten Bedingungen zu Bodenschadverdichtungen führen. Zum anderen bildet sich beim ständigen Fahren in der Furche eine Schlepperradsohle, die zu einer Barriere für Pflanzenwurzeln und Bodentiere werden kann.

Eine Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen kann bodenseitig zum einen durch weniger Lockerung und damit geringeres Porenvolumen und zum anderen durch Abtrocknen des Bodens erreicht werden. Das Streben nach Kosteneinsparung fordert dagegen hohe Auslastungsgrade und lässt ein Warten auf trockenere Bodenbedingungen oft nicht zu – evtl. auftretender Schaden bei Bewirtschaftung unter feuchten Bodenbedingungen, z. B. durch Mindererträge der Folgefrucht, wird bisher in keiner Kalkulation berücksichtigt und wird z. B. in Maschinengenossenschaften vom einzelnen Landwirt getragen. Geräteseitig kann Vorsorge durch breite Reifen, reduzierten Reifennendruck und spurversetztes Fahren realisiert werden. Es fehlen bisher jedoch optimierte Einsatzstrategien, die Standort, Witterung und Gestaltung sowie Auslastung von Maschinen berücksichtigen und in einem Regelkreislauf zusammenfassen.

Eine standortspezifische Einsatz- und Bearbeitungsstrategie, wie sie im BBodSchG gefordert ist, die gleichzeitig Bodenerosion und Bodenverdichtungen mindern und Bodenstruktur, Humus und biologische Aktivität fördern soll, liegt heute mit all ihren Wechselbeziehungen nicht vor. Um diesen hohen Anspruch zu erfüllen, ist solch ein Lösungsansatz vor dem Hintergrund der 'Integrierten Landbewirtschaftung' auszuarbeiten. Dabei hat ein Abwägungsprozess zwischen Bodenschutz, Gewässerschutz und Verbraucherschutz stattzufinden mit der Erkenntnis, dass ein Restrisiko trotz optimaler Vorsorgestrategie bestehen bleiben kann.

Vor diesem Hintergrund sind die Ziele der vorliegenden Arbeit – gestützt auf Problemlösungen aus der Literatur und mehrjährige eigene Feldversuche – wie folgt zu skizzieren:

- Darstellung der Vorteile 'Konservierender Bodenbearbeitung' – mit dem Baustein schonende Lockerung – für vorbeugende Vermeidung von Bodenschadverdichtung insbesondere im Unterboden.

- Die Bedeutung 'Konservierender Bodenbearbeitung' – mit dem Baustein Mulchsaat – für die Minderung von Bodenabtrag durch Wasser.
- Nachweis des Einflusses 'Konservierender Bodenbearbeitung' auf das Ausmaß von Run off in Oberflächengewässer.
- Schlussfolgerungen aus den Auswirkungen 'Konservierender Bodenbearbeitung' auf erhöhtes Infektionsrisiko für Pflanzenkrankheiten einerseits und erwünschtem Bodenschutz andererseits.
- Ableitung einer Strategie für 'Integrierte Landbewirtschaftung' basierend auf den Konzepten 'Konservierende Bodenbearbeitung' und 'Bodenschonendes Befahren'.

Aus den in den Zielen aufgezeigten komplexen Zusammenhängen werden neun Thesen vorangestellt, die aus der folgenden Literaturübersicht (Kapitel 3) abgeleitet sind und im Ergebniskapitel (Kapitel 4) diskutiert werden:

- (1) Die technische Entwicklung in der Landwirtschaft hat zu einer Steigerung von Flächen- und Arbeitsproduktivität geführt mit der Sorge, den Boden in seinen wichtigen Funktionen möglicherweise zu schädigen.
- (2) Der Landwirt greift mit der Bodenbearbeitung in das Bodengefüge ein und verändert damit die Porenstruktur und das Bodenleben. Dies hat Einfluss auf Ober- und Unterboden durch Veränderung von Lagerungsdichte und Bodenfunktionen.
- (3) Das Konzept 'Bodenschonendes Befahren' verbindet bodenphysikalische, fahrzeugtechnische und arbeitswirtschaftliche Aspekte zur Schonung des Bodens.
- (4) Die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden bestimmt die Auswahl von Handlungsempfehlungen aus dem Maßnahmenkatalog für 'Bodenschonendes Befahren'. Die aufwändige Untersuchung von bodenphysikalischen Parametern ist bestenfalls zur Validierung von Indikatoren, nicht aber zur Erfolgskontrolle von Vorsorgemaßnahmen geeignet. Ein Befahrbarkeitssensor zur Anzeige der aktuellen Verdichtungsempfindlichkeit ist für ein flexibles Einsatzmanagement erforderlich.
- (5) Mulchsaat mit/ohne Lockerung
 - erfüllt die acker- und pflanzenbaulichen Anforderungen durch eine gleichmäßige Verteilung und Einarbeitung der Reststoffe zum Strukturaufbau und zur Verrottung,

- erfüllt die Anforderungen des Bodenschutzes durch eine standortspezifische Bodenbedeckung zum Verschlammungsschutz und zur Erosionsminderung und
 - verlangt eine Kosten-Nutzen-Analyse bei zusätzlicher Risikominderung durch Zwischenfruchtanbau.
- (6) Mulchsaat erreicht in Verbindung mit günstigen Fahrzeugparametern, wie Breitreifen und geringen Reifeninnendruck, auch in stark befahrenen Bereichen, wie den Fahrgassen, Minderung linienhafter Erosion und Erhaltung von biologischer Aktivität.
- (7) 'Konservierende Bodenbearbeitung' erreicht durch organische Rückstände an der Oberfläche
- einen Bremseffekt für abfließendes Wasser,
 - gesteigerte Infiltration durch von Regenwürmern geschaffene Makroporen und
 - bei Berücksichtigung bestimmter Rahmenbedingungen keinen erhöhten Wirkstoffaustrag durch Makroporenfluss.
- (8) Durch 'Konservierende Bodenbearbeitung' ist ein erhöhtes Infektionsrisiko für Pflanzenkrankheiten durch die Pflanzenrückstände an der Bodenoberfläche gegeben – technische, acker- und pflanzenbauliche Präventivmaßnahmen helfen, Mykotoxine im Getreide zu reduzieren.
- (9) 'Konservierende Bodenbearbeitung' ist ein standort- und fruchtfolgespezifisches Bewirtschaftungsproblem, das langfristig die Förderung der Bodenfertbarkeit verfolgt und dabei unerwünschte Nebeneffekte wie Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxine im Getreide zu vermeiden sucht.

3 Problemlösungen

Mit der Nutzung der Böden durch den Menschen werden Funktionen oftmals über Gebühr in Anspruch genommen durch Versiegelung, Rohstoffverbrauch und industriellen Schadstoffeintrag. Auch bei der Landbewirtschaftung sind Böden Gefährdungen ausgesetzt, wie Verschlammung, Erosion, Verdichtungen und Schadstoffeintrag von Betriebsmitteln. Bodenbearbeitung stellt dabei den massivsten

Eingriff in das Bodengefüge dar, der zu den genannten Gefährdungen führen kann. Die Gesellschaft trägt neuerdings der Schutzbedürftigkeit des Bodens Rechnung durch das 1998 verabschiedete Bodenschutzgesetz, das den Boden neben Wasser und Luft zum dritten schutzwürdigen Medium erklärt. In den 26 Paragraphen des Gesetzes geht es hauptsächlich um stofflichen Bodenschutz (z. B. Altlastensanierung) und nur in § 17 um physikalischen Bodenschutz bei landwirtschaftlicher Bodennutzung.

Im Sinne des Gesetzes wird "Bodenschutz" also bereichsübergreifend verwendet als "Bodenschutz im weiteren Sinne". Um nun Ursache, Ausmaß von Gefährdung und Gegenmaßnahmen klarer zuordnen zu können, werden für die beiden Hauptproblembereiche der Landbewirtschaftung folgende **Definitionen** eingeführt:

- "Bodenschutz" im engeren Sinne befasst sich mit dem Oberflächenschutz vor Verschlämmungen und Bodenerosion.
- "Bodenschonung" befasst sich mit dem Schutz von Krume und Unterboden vor Bodenschadverdichtungen.

3.1 Bodenschonung – Verminderung von Bodenschadverdichtungen

Die **Entwicklung** der letzten 50 Jahre in der Landwirtschaft ist dadurch geprägt, dass Arbeitsproduktivität und Flächenleistung enorm angestiegen sind. Durch die Kopplung von Arbeitsgängen, durch Vollernter mit großen Arbeitsbreiten und durch z. T. lange Schläge haben die Gesamtmassen und damit die Radlasten von Traktoren, Erntemaschinen und Transportfahrzeugen zugenommen. Daraus erwächst grundsätzlich die Sorge, den Boden in seinen Funktionen zu schädigen (Bolling & Söhne, 1982; Dürr et al., 1985; Soane & van Ouwerkerk, 1994; Lebert et al., 2004), was insbesondere für den Unterboden problematisch wird, da er von Reparaturmaßnahmen kaum erreicht wird. Vor diesem Hintergrund ist ihm besondere Aufmerksamkeit zu schenken (Håkansson et al., 1987; Horn et al., 2000).

Auf der anderen Seite haben technische Entwicklungen dazu geführt, dass die notwendigen Feldarbeitstage, die Anzahl der Überrollungen, das Leistungsgewicht und der Reifeninnendruck gesunken sind (Olfe, 1993; Schulze-Lammers et al., 2001; Weissbach, 2003).

Die Bodenfunktionen zu schonen, liegt schon immer im ökonomischen und ökologischen Interesse des Landwirts und wird über das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) auch neuerdings vom Gesetzgeber gefordert. Nach § 17 wird die Vorsorgepflicht durch die Einhaltung der Grundsätze zur "**Guten fachlichen Praxis**" erfüllt, das heißt, "Bodenverdichtungen sollen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks, so weit wie möglich vermieden werden". Zu prüfen ist, ob zum Schutz des Bodens Vorsorgemaßnahmen ausreichend sind oder durch Verordnungen zur Gefahrenabwehr unterstützt werden müssen (Sommer, 2003; Lebert et al., 2004).

Ob es zu einer Gefährdung der Bodenfunktionen kommt, hängt von der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden ab und inwieweit die technischen Entwicklungen, wie z. B. Breitreifen und bodenschonende Fahrwerke, eine ausreichende Minderung des Bodendrucks herbeiführen. Da es sich bei Bodenschadverdichtungen um ein sehr komplexes Problem handelt, sind gefordert: eine klare Definition, Vorstellungen über die regionale Verbreitung, Auswirkungen auf Bodenfunktionen und anwendungsorientierte Vorsorgemaßnahmen.

Definition

- **Bodenverdichtung** ist definiert als eine Zunahme der Bodendichte (in g/cm^3) infolge – im vorliegenden Fall – mechanischer Belastung (Scheffer & Schachtschabel, 1979).
- Als **Bodenschadverdichtung** wird diejenige Bodenverdichtung bezeichnet, deren Gefügeveränderungen negative, bleibende Auswirkungen auf Funktionen des Bodens haben: die *Produktionsfunktion* (Pflanzenertrag, Kosten u. a.), die *Regelungsfunktion* (Infiltration, Stoffumsatz u. a.) und die *Lebensraumfunktion* (Bodenleben u. a.) (Dumbeck, 1986; Harrach & Vorderbrügge, 1991; Sommer & Brunotte, 2003; siehe auch Sommer & Brunotte, 2003).

Für Problemanalyse und -lösungen ist eine **klare Unterscheidung** erforderlich:

1. Mechanische Bodenbelastung wird mit Radlast (in t) oder Kontaktflächen-druck in der Berührungsfläche Laufwerk/Boden (in kPa) angegeben.

2. Die Folgen einer Belastung sind während des Befahrens mechanische Spannungen (senkrecht gerichtete Normalspannung, tangential gerichtete Scherspannung) (Söhne, 1953) im Boden, die Bodenbeanspruchung.
3. Wenn die Bodenbeanspruchung die Eigenstabilität des Bodengefüges übersteigt und zu schädlichen Bodenveränderungen führt, entstehen Bodenschadverdichtungen (Horn, 1981a, b).

In der Vergangenheit hat man versucht, die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand mit dem "optimalen Porenvolumen" für unterschiedliche Böden zu beschreiben und zu starke Abweichungen als 'Bodenschadverdichtungen' zu kennzeichnen (Czeratzki, 1972; Petelkau, 1984).

Das **optimale** Porenvolumen gibt es nicht. Entscheidend für das Wachstum sind die direkten Einflussgrößen wie Bodenwasserhaushalt, Luft, Wärme und mechanischer Widerstand. Nur schwach aggregierte sandige Böden haben eine enge Beziehung zwischen Lagerungsdichte und pflanzenbaulich relevanten Bodenparametern. Bodendichtewerte sind nur bodenart- und bearbeitungsspezifisch zu interpretieren (Hartge & Sommer, 1980; Mc Keyes, 1985). Deshalb kommt dem aktuellen Bodenzustand beim Befahren große Bedeutung zu.

3.1.1 Verbreitung und Formen von Bodenschadverdichtungen

Für Auswahl und Ausmaß von Vermeidungsstrategien ist die Brisanz von Bodenschadverdichtungen von entscheidender Bedeutung. Sowohl die regionale Verbreitung wie auch das Vorkommen in Ackerkrume und Unterboden entscheiden über Vorsorge bzw. Gefahrenabwehr. Für Europa liegen Schätzungen vor, wonach 33 Mio. ha bereits Degradierungserscheinungen infolge Verdichtung aufweisen (Soane & van Ouwerkerk, 1994). Die Angaben werden in der Regel unterteilt nach Horizonten im Profil: *Krumenverdichtung*, *Krumenbasisverdichtung* und *Unterbodenverdichtung*.

Maschinen mit schmalen Reifen und hohem Reifeninnendruck können insbesondere bei feuchten Bedingungen zur Beeinträchtigung der Ackerkrume (= **Krumenverdichtung**) führen. Besonders kritisch sind Zugarbeiten mit hohem Schlupf zu sehen. Dabei kann es auch zu Inneraggregat-Verdichtungen kommen (Vorhees et al., 1979; Werner & Thämert, 1989). Die Bodenbearbeitungsmaß-

nahmen reparieren diese Verdichtung in der Regel, bedürfen aber der Unterstützung von Pflanzenwurzeln und Witterung, um Primärpartikel wiederherzustellen. Innere Verdichtung ist allein durch Lockerung schwer zu beseitigen (Frede, 1982).

Schadverdichtungen an der Krumbasis entstehen durch häufiges Fahren in der Furche beim Pflügen (Ruhm, 1983; Sommer, 1998b). Feuchte Bedingungen und hoher Schlupf verschärfen dies Problem. Nach Schätzungen liegen für das Rheinland auf 40 % der Ackerflächen Schlepperradsohlenverdichtungen (= **Krumbasisverdichtung**) vor (König, 2004). Für die Neuen Bundesländer ist für 1989 angegeben, dass auf etwa 40 % der Ackerfläche bewirtschaftungsbedingte Krumbasisverdichtungen unterschiedlicher Mächtigkeit und Ausprägung vorliegen (Dürr et al., 1994).

Schwere Maschinen erhöhen bei hoher Bodenfeuchte und/oder durch häufiges Befahren die Gefahr von **Unterbodenschadverdichtungen** (Horn et al., 1991; Dürr et al., 1994; Lebert et al., 2004). Schadverdichtungen können aber nicht generell nachgewiesen werden (Diserens et al., 1998; Gysi, 2001; Schäfer-Landefeld et al., 2003). Aufwändige mechanische Lockerung in Verbindung mit Zwischenfruchtanbau kommt als Reparaturmaßnahme in Frage (Brunotte, 2001).

Neben Ackerböden weist Prochnow (1999) für **Grünland** auf Niedermoor-Standorten die Tragfähigkeit nach. Dabei liegt die kritische Fahrspurtiefe, bei der die Grasnarbe durchbricht bei 7 cm. Schlupf von 10-20 % führt zu Ertragsdepressionen. Da keine Reparaturmaßnahmen wie im Ackerbau mit der Bodenbearbeitung möglich sind, ist der vorsorgenden Bodenschonung besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Bodenschadverdichtungen können grundsätzlich anhand eines Indikatorsystems identifiziert werden (Lebert et al., 2004). Die Identifikation erfolgt aus der Kombination der drei Parameter (Luftkapazität, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Feldgefügeansprache, siehe Tab. 4), so dass die Überschreitung eines einzelnen noch kein sicheres Indiz für einen Gefügeschaden ist. Dies gilt sowohl für die Produktionsfunktion, wie für die Regelungsfunktion.

3.1.2 Auswirkungen von Bodenschadverdichtungen

Bodenschadverdichtungen tangieren die drei wichtigsten Funktionen *Produktions-*, *Regelungs-* und *Lebensraumfunktion*. Der Landwirt beobachtet sie am Wuchs seiner Pflanzen, an tiefen Spuren oder am stehenden Wasser auf der Oberfläche.

Die Auswirkungen von Bodenschadverdichtungen auf den Ertrag (→ **Produktionsfunktion**) findet man in einer umfassenden Literaturrecherche bei Dürr et al. (1994). Auf Produktionsflächen Ertragsdepressionen nachzuweisen, ist sehr schwierig, da in der Regel der unbefahrene Bereich (= nicht wieder neu befahren) als Kontrolle nicht vorhanden ist. Ertragsverluste auf stark befahrenen Teilstücken, wie Fahrgassen und Vorgewende sind untersucht (Lebert et al., 2004; Schwark, 2005).

Daneben existiert eine Reihe von Belastungsversuchen, z. B. mit Panzer oder Radlader, um die Reaktion des Bodens auf Belastungen zu quantifizieren (Sommer et al., 1981; Mähner, 1999; Lebert et al., 2004). Radlasten, Reifeninnendrucke und Überrollhäufigkeiten weichen in diesen Versuchen aber stark von landwirtschaftlicher Praxis ab, so dass die Ergebnisse nicht auf Produktionsflächen zu übertragen sind. Lägen flächendeckend Schadverdichtungen vor, würde die jährliche Ertragssteigerungsrate von ca. 1,5 % durch Züchtung und Produktionstechnik kompensiert, und Ertragsdepression wäre die Folge.

Ertragsminderung durch Bodenschadverdichtungen kommt auf Teilflächen mit hoher mechanischer Belastung wie Fahrgassen und Vorgewenden vor. Auf Kernproduktionsflächen sind in Deutschland bisher keine Ertragsbeeinträchtigungen dokumentiert (Lebert et al., 2004).

Durch mechanische Belastung kommt es zu einer Umverlagerung der Poren. Die schnell drainenden Grobporen nehmen ab, so dass das Infiltrationsvermögen (→ **Regelungsfunktion**) gemindert ist. Die Kontinuität spielt dabei eine entscheidende Rolle (Ehlers, 1975; Dürr et al., 1994; Nieder, 1998).

Bodenschadverdichtungen schränken durch ein verengtes Porensystem hauptsächlich die Lebensmöglichkeiten nicht grabender Tiere (Springschwänze, Milben)

ein; anders dagegen bei Regenwürmern, die durch ihre grabende Tätigkeit sogar zu einer Lockerung verdichteter Böden beitragen (→ **Lebensraumfunktion**). Grundvoraussetzung ist dabei allerdings ein Nahrungsangebot an der Bodenoberfläche, wie es bei Mulchsaaten geschaffen wird (Larink et al., 1993; Larink, 1998).

Die Beurteilung von Bodenverdichtungen, insbesondere die schädlichen Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen sind bisher weltweit nicht systematisch nachgewiesen. Es hängt immer sehr stark von dem Einsatz von Technik und den jeweiligen Standortbedingungen ab, ob es zu einer Schädigung kommt mit negativen Auswirkungen auf Wirtschaftlichkeit und Umwelt. Deshalb gibt es eine Reihe von Bestrebungen, die Auswirkung von mechanischen Belastungen auf die Bodenstruktur mit Hilfe von Modellen und Modellierungen abzubilden.

Die **drei wichtigsten Konzepte** werden hier genannt und bewertet, da sie eine wichtige Rolle für die in dieser Arbeit entwickelten Lösungsansätze spielen. Auch werden sie oft als Basis für politische Entscheidungen genommen und fließen in Verordnungen ein. Bodenverformung kann mithilfe empirischer, halbtheoretischer und bodenmechanischer Modelle analysiert werden (O'Sullivan & Simota, 1995; Arvidsson et al., 2000). Sie bilden die Grundlage für die Abschätzung der *potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit* mit Hilfe von Bewertungssystemen:

(1) *Vorbelastungskonzept*

Aus der Gegenüberstellung von vertikalem Bodendruck (Druckbelastung) und Vorbelastung (Druckbelastbarkeit) wird, ein maximal tolerierbarer Kontaktflächendruck berechnet und daraus maximal tolerierbare Radlasten abgeleitet (Horn, 1981a, b; Lebert, 1981; ATV-DVWK, 2002). Die Bewertung der Befahrbarkeit von mechanischen Bodeninformationen und modellmäßigen Druckberechnungen herzuleiten, enthält Fehlerquellen (Lebert et al., 2004):

- Für die Druckberechnung wird eine starre, kreisrunde Last übertragende Kontaktfläche zugrunde gelegt – die Reifenverformung bleibt unberücksichtigt.
- Berechnungen des Bodendruckes sind nur für ein elastisches, homogenes und isotropes Medium möglich.

- Wechselnde Bodenfeuchten werden nicht berücksichtigt.
- Die Vorbelastung wird im seitlich begrenzten Druckversuch unter konsolidierten Bedingungen ermittelt – die Belastungsdauer beträgt bis zu 23 Stunden. Bei gleicher externer Belastung in der Praxis würde ein anderer Belastungspfad entstehen.
- Bei der Berechnung der Vorbelastung mit multiplen Regressionsgleichungen wird die Unschärfe des Parameters noch verstärkt.
- Der so charakterisierte Gefügestand ist pflanzenbaulich unbewertet, und bereits geschädigte Bodenstruktur würde nicht als Strukturschaden erkannt.
- Es wird nur der vertikale Spannungseintrag berücksichtigt. Die Effekte von Scherbelastung und Knetung bleiben unberücksichtigt.

Bevor die Vorbelastung als Prüfkonzept anwendbar ist, sind die Vorhersagen des Modells einer bundesweiten Validierung zu unterziehen.

(2) *Konzept "Belastungsquotient"*

Der Belastungsquotient ist der Quotient aus Druckbelastung (in kPa) und Druckbelastbarkeit (in kPa). Die Druckbelastung wird, vergleichbar mit dem Vorbelastungskonzept, über ein Rechenmodell (nach Newmark, 1942; Söhne, 1953) berechnet. Sie ergibt sich aus der Fahrzeugmasse, dem Zugwiderstand, der Reifenaufstandsfläche und der Spannungsausbreitung im Boden. Die typischen Befahrungereignisse innerhalb eines Fruchtfolgejahres und die Überrollhäufigkeiten werden berücksichtigt (Eckart et al., 1999; Paul, 1999).

Die Druckbelastbarkeit gibt den Grenzwert für den maximalen vertikalen Bodendruck an, bei dem sich für den Oberboden eine Luftkapazität von 8 Vol.-% und im Unterboden von 5 Vol.-% ergibt (nach Ödometer-test). Belastungen, die größer als die Vorbelastung sind, werden solange toleriert, wie diese ökologische Schadensschwelle für den Lufthaushalt nicht unterschritten ist. Dieses Konzept enthält in den Modellannahmen hinsichtlich der Berechnung des Bodendruckes und im Laborversuch ähnliche Fehlerquellen wie das Vorbelastungskonzept, so dass die Prognosen auch im Feldversuch validiert werden müssen (Lebert et al., 2004).

(3) *Konzept "Schadverdichtungsgefährdungsklassen"*

Dies Konzept schätzt für Standortverhältnisse der Grundmoränenlandschaft die potenzielle Verdichtungsgefährdung ab. Substratspezifische "Bereiche der optimalen Lagerungsdichte" für die Ackerkrume sind in langjährigen Vegetationsversuchen nachgewiesen (Petelkau et al., 2000). Grundlage der Richtwerte für die zulässige Bodenbelastung durch Fahrwerke bilden umfangreiche Kompressions- und Scherversuche. Die Böden sind nach ihrer differenzierten Belastbarkeit in fünf Schad-Verdichtungs-Gefährdungsklassen (SVGK) eingeteilt. Im Sinne der Vorsorge sollten Landmaschinen und Transportfahrzeuge die zulässige Fahrwerksbelastung (Kontaktflächendruck, Radlast, Überrollhäufigkeit) im jeweils vorliegenden Bodenfeuchtezustand einhalten.

SVGK ist als Krumenschutzkonzept für Grundmoränenlandschaften anwendbar. Als Schutzkonzept für den Unterboden ist es nicht zu verwenden, da die bodenphysikalischen Zusammenhänge der Gefügebildung und deren Auswirkungen auf die Bodenstabilität nicht berücksichtigt werden (Lebert et al., 2004).

Mit empirischen Modellen wird versucht, das Gefährdungspotenzial für Bodenschadverdichtungen abzuschätzen. Daraus entwickelte und vorgeschlagene Richtwerte (zur Radlast und zum Kontaktflächendruck) sind theoretischer Natur und müssen sich unter Praxisbedingungen einer umfassenden Validierung und Erfolgskontrolle unterziehen. Insgesamt sind zur Erhaltung der Bodenfunktionen langfristig **Indikatoren** zur Beurteilung und Bewertung erforderlich – auch von Handlungsempfehlungen.

Das hat auch der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2000 angemahnt: "... Richtwerte und praktische Hilfen - auch für die Überwachung ..." (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, 2000). Nach von Münchhausen & Nieberg (1997) werden Umweltindikatoren als "Parameter verstanden, die auf der Basis statistischer Daten über den Zustand der Umwelt und über menschliche Produktionsaktivitäten entwickelt werden. Mithilfe von Indikatoren werden Daten in politikrelevante Informationen transformiert".

Zur Bewertung des Einflusses schädlicher Bodenveränderungen auf die Bodenqualität unterscheiden Piorr et al. (2000) zwischen vier Gruppen von Indikatoren:

- Gruppe 1 liefert die Grundlage zur Abschätzung der potenziellen Gefährdung,
- Gruppe 2 zielt auf den Nachweis langfristig abnehmender Bodenqualität hin,
- Gruppe 3 enthält solche zur Bodenbelastung und Bodenbelastbarkeit, und
- Gruppe 4 kontrolliert den Erfolg von Schutzmaßnahmen.

Um nach § 17 BBodSchG die Vorsorgepflicht durch die Einhaltung guter fachlicher Praxis zu erfüllen, ist eine Reihe von technischen und ackerbaulichen Lösungen entwickelt worden (BMVEL, 2001; VDI, 2005). Diese Ansätze werden fruchtfolge-, standort- und betriebsspezifisch zu einem Konzept für '**Bodenschonendes Befahren**' zusammengeführt (Sommer, 1998a). Das Konzept für 'Bodenschonendes Befahren' setzt sich aus drei Bausteinen zusammen, die alle zu dem Ziel führen, den Bodendruck zu verringern. Bausteine mit konkreten **Handlungsempfehlungen** werden hier nur aufgezählt, ohne sie zu kommentieren, da sie einen wesentlichen Bestandteil im Ergebniskapitel darstellen.

1. Verbesserung der Belastbarkeit des Bodens

- Nicht wendende, schonende Bodenlockerung ('Konservierende Bodenbearbeitung') statt Pflugfurche durchführen.
- Wenn der Pflug erforderlich wird, dann Onland-Pflügen praktizieren.
- Lockerung auf das notwendige Maß in der Fruchtfolge beschränken.
- Bodenbearbeitungs-, Ernte- und Transportarbeiten bei günstiger Bodenfeuchte durchführen.
- Ausreichend organischen Dünger und Kalk ausbringen.

2. Anwendung und Weiterentwicklung technischer Möglichkeiten

- Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche durch Zwillingsräder, Breitreifen oder Gummibandlaufwerke vornehmen.
- Radial- statt Diagonalfreifen verwenden, um mit geringerem Reifeninnendruck eine größere Kontaktfläche zu erzielen.
- Lastabhängige Reifendruckregelanlage einsetzen, um immer mit dem niedrigsten Reifeninnendruck fahren zu können.
- Fahrwerke als 3-Rad, 5-Rad oder mit Knickgelenk auswählen, um die Last auf breiter Fläche abzustützen und Mehrfachüberrollungen zu verringern.

- Anbaugeräte durch Aufsattel- und Anhängegeräte ersetzen, um Radlast zu reduzieren.
- Allradantrieb, Differentialsperre und Schlupfregelung verwenden, um Schlupf zu mindern.
- Zapfwellen angetriebene Eggen einsetzen, um in einer Überfahrt einen saarfertigen Acker zu bekommen und Mehrfachüberrollungen zu vermeiden.
- Integralschlegler am Rübenvollernter verwenden, um das Vorgewende zu schonen.

3. Anpassung von Arbeitverfahren

- Arbeitsgänge zusammenlegen: Grund-, Sekundärbodenbearbeitung und Saat auf den Köpfrödebunker (KRB) mit Integralschlegler direkt folgen lassen.
- Schlagkraft vorhalten, wenn wenige Feldarbeitstage zur Verfügung stehen.
- Kampagneleistung von Erntemaschinen reduzieren, um nach Niederschlägen zu pausieren.
- Stabilisierung der Bodenstruktur durch Sommerpflugfurche mit Zwischenfruchtanbau.
- Trennung von Spur- und Anbaufläche vornehmen: Fahrgassenanbau auch bei Reihenfrüchten ermöglicht den Einsatz breiter Reifen bei Pflegearbeiten über die gesamte Fruchtfolge.

Handlungsempfehlungen richten sich nach der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden aus, wenn es um die Auswahl von Fruchtfolgen und langfristigen Maschineninvestitionen geht. Mittel- und kurzfristig entscheidet der Betriebsleiter über die Lockerungsintensität und den an die aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit angepassten Maschineneinsatz (Petelkau, 1998; Sommer et al., 2001a; Spiess & Diserens, 2001).

3.2 Bodenschutz im engeren Sinne – Verminderung von Bodenerosion

Unter **Bodenerosion** (Bodenabtragung) werden alle Vorgänge der flächen- und linienhaften Verlagerung von Bodenmaterial verstanden, die vom (land)wirtschaftenden Menschen über das naturgegebene Maß hinaus beschleunigt und meist von Wasser oder Wind bewirkt werden (Frielinghaus, 1997a, b; Werner, 1999).

Bodendegradierung als dauerhafte Schädigung oder Verlust von Bodenfunktionen ist ein globales Problem. Weltweit sind 15 % der Landoberfläche degradiert, davon 56 % durch Wasser- und 28 % durch Winderosion. Europaweit ist an der Degradierung die Wassererosion mit 52 % beteiligt (Oldmann et al., 1991; Frielinghaus & Bork, 1999). Im Mittelmeerraum führen $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ zu einer Schädigung der Meeresökosysteme (Kommission der EG, 2002). Für Deutschland wird angenommen, dass im langjährigen Mittel bei regional großer Variation $8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ durch Erosion verloren gehen. Dies entspricht einer gleichmäßigen Minderung der Krümmenmächtigkeit um 0,5 mm (Auerswald & Schmidt, 1986). In Niedersachsen sind 10 % der Ackerfläche potenziell erosionsgefährdet (Schäfer et al., 2003).

3.2.1 Beschreibung und Folgen von Bodenerosion

Der **erosionsauslösende Prozess** ist die Oberflächenverschlammung (Derpsch et al., 1988; Roth, 1995). Dabei sprengt die hohe Energie der Regentropfen Feinmaterial von Bodenaggregaten ab und schleudert es umher (= *Splash*). Dieses Material verstopft die Wasser führenden Poren, Oberflächenabfluss beginnt, wenn die Niederschlagsmenge höher als die Infiltrationsleistung ist. Gelöstes Bodenmaterial und durch abfließendes Wasser gelöster Boden bilden die Bodenerosion. Diese kann als flächenhafte Erosion, als Rillenerosion (= 2-10 cm tief), als Rinnenerosion (= 10-40 cm tief) oder als Grabenerosion (>40 cm tief) erfolgen (Richter, 1998).

Vor dem Hintergrund der Zielsetzung für Bodenschutz ist zu klären, inwieweit es durch Erosion zu einer Schädigung von Bodenfunktionen kommt. Eine zentrale Rolle spielt dabei die **Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG)** nach Wischmeier & Smith (1978), modifiziert von Schwertmann et al. (1987) für süddeutsche Verhältnisse. Die Gleichung schätzt mithilfe von Faktoren den langjährig mittleren Bodenabtrag in Tonnen je Hektar:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

R = Regen- und Oberflächenabflussfaktor

K = Bodenerodierbarkeitsfaktor

LS = Topographiefaktor

C = Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor

P = Erosionsschutzfaktor

Das Ergebnis gibt an, ob ein für den Standort tolerierbarer Grenzwert für den Bodenabtrag überschritten wird. Zugrunde liegt die Gründigkeit nach der Reichsbodenschätzung. Das Ertragspotenzial darf in 300-500 Jahren nicht entscheidend vermindert sein. So gibt der Quotient Bodenzahl (BZ/8) den Toleranzwert an, der weit über dem Wert der Bodenneubildungsrate von $<1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ liegt. Problematisch bei dieser Abschätzung ist, dass keine linienhafte Erosion berücksichtigt wird, die mitunter 50 % der Gesamterosion ausmachen kann (Sanders & Mosimann, 2005).

Um das Toleranzwertkonzept richtig umzusetzen, hätte eine Messung der Erosion zu erfolgen. Obwohl dies sehr aufwändig und mit großen Fehlern behaftet ist (NLÖ, 2003), wurden in der Vergangenheit im Feld- und Labormaßstab unter natürlichem wie künstlichem Niederschlag wiederholt Messungen zur Bodenerosion durchgeführt (Brunotte, 1990; Roth, 1992; Mollenhauer & Ortmeier, 1995; Schmidt et al., 2003). Gegenüber Pflugfurche konnte bei Mulchsaat mit Saatbettbereitung (20-30 % Bedeckungsgrad) der Abtrag auf im Mittel 38 % und bei Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (>50 % Bedeckungsgrad) auf 10 % reduziert werden. Insgesamt werden allerdings von der ABAG die Einflussfaktoren auf Bodenerosion recht gut beschrieben, so dass die Gleichung Grundlage für Kartenwerke zur Beschreibung der potenziellen Wassererosionsgefährdung in den Bundesländern Bayern, Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Thüringen ist.

Vielerorts werden die ABAG-Grunddaten ergänzt:

- in Nordrhein-Westfalen mit digitalen Bodenkarten, digitalen Geländemodellen und digitalen Niederschlagskarten (= EMIL) (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, 2004),
- in Niedersachsen mithilfe des NIBIS (= Niedersächsisches Boden- und Informationssystem) zu Gefährdungstufen der Bodenfruchtbarkeit (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 2003).

Darüber hinaus werden folgende Ansätze zur Abschätzung der Erosion verwendet:

- In Sachsen wird das physikalisch begründete Modell EROSION 2D/3D verwendet, weil der Einfluss von Niederschlag, Topographie und Bodenbearbeitung auf das Erosionsausmaß besser als in der ABAG erfasst wird (Schmidt et al., 1996).

- In den Neuen Bundesländern liegen Datenbanken der MMK (mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung (Liebenroth et al., 1983) vor.
- Darüber hinaus existieren:
 - DVWK 239: Bodenerosion durch Wasser (DVWK, 1996),
 - E DIN 19798: Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser (Min. für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, 2004) und
 - Agrarstatistiken, die das Kulturartenverhältnis wiedergeben. Bedeckung durch Mulchsaat wird dabei nicht berücksichtigt.

Bei den **Folgen von Bodenerosion** unterscheidet man zwischen Onsite- und Offsite-Schäden. Bei **Onsite-Schäden** (= Schäden flächenintern) geht es auf der Fläche kurzfristig um die Vernichtung von Pflanzen und mittel- und langfristig um die Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit durch eine verminderte Wasserspeicherkapazität und Ertragsfähigkeit, ein reduziertes Filter- und Puffervermögen und eine verringerte Funktion der Böden für Grund- und Hochwasserschutz (Wesolek et al., 1992; Richter, 1998; Frielinghaus et al., 1999; Deutscher Bundestag, 2004). Durch Boden- und Nährstoffverlagerung nimmt die Heterogenität auf den Flächen zu und macht eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung erforderlich.

Offsite-Schäden (= Schäden flächenextern) beschreiben außerhalb der Fläche den Eintrag von Boden, Nähr- und Schadstoffen in Gewässer und können z. T. am Bewuchs und an Zeigerpflanzen abgelesen werden (Frielinghaus et al., 1997). Schätzungen von Werner et al. (1991) zu den diffusen Stickstoff- und Phosphoreinträgen in Nord- und Ostsee führten 38 % der P-Einträge auf den durch Erosion bedingten Bodenabtrag und 12,7 % auf den Oberflächenabfluss zurück. Bei Stickstoff waren 5,3 % durch Erosion und 3,7 % durch Abfluss bedingt.

Grundlage für die Bewertung liefert auch der Gewässer- und Biotopschutz. Die hier formulierten Qualitätsziele können direkten Einfluss auf Qualitätsziele der Fläche nehmen. Deshalb sind zukünftig auch Bewirtschaftungsauflagen von Seiten der EU-Wasserrahmenrichtlinie zu erwarten (EG, 2000; NLÖ, 2003). Da es sich hauptsächlich um stoffliche Komponenten handelt, kann hier das Prinzip der "Critical Loads" angewendet werden (EG, 2000; NLÖ, 2003). In der Trinkwasserverordnung (BMU, 2001) sind Grenzwerte für Stickstoff und Pflanzenschutzmittel angegeben.

Die Ursachen für Bodenerosion sind in den letzten 30 Jahren hinreichend erforscht. Treffen steile, lange Hänge, erosive Niederschläge im Jugendstadium von Reihenkulturen und eine unbedeckte Ackeroberfläche zusammen, können verheerende Erosionsschäden entstehen. An dieser Stelle werden Indikatorsysteme zur Risikoabschätzung gesucht: inwieweit kann die Belastung durch Landnutzung unter der standortspezifischen Belastbarkeit gegenüber Risiken (= potenzielle Gefährdung) niedrig gehalten werden?

Das Bundes-Bodenschutzgesetz fordert in § 2 Abs. 3: **schädliche Bodenveränderungen** sind "Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen". Der Begriff "schädliche Bodenveränderungen" beinhaltet sowohl stoffliche Einträge als auch bodenphysikalische Veränderungen (z. B. durch Erosion). In § 17 Abs. 2 wird gefordert, die Fruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens zu erhalten und zu verbessern: "**Bodenabträge** sind durch standortangepasste Nutzung, insbesondere durch Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse sowie der Bodenbedeckung, möglichst zu vermeiden" (BMU, 1998).

Um Bodenschutz gegen Erosion umsetzen zu können, verfolgt das Gesetz drei Strategien (Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz beim BMU, 2000):

(1) **Vorsorge**

Ziel ist, bereits das Entstehen von schädlichen Bodenveränderungen im Vorfeld zu verhindern. Vor diesem Hintergrund ist auch die ABAG allein nicht zielführend. Für die landwirtschaftliche Bodennutzung wird die Vorsorgepflicht durch die Umsetzung der "**guten fachlichen Praxis**" erfüllt (§ 7 allgemeine Vorsorgepflicht).

(2) **Gefahrenabwehr**

Hier geht es um die Abwehr einer schädlichen Bodenveränderung, wenn der Schadenseintritt sehr wahrscheinlich ist. Es werden oft Prüf- und Maßnahmenwerte aus dem stofflichen Bodenschutz verwendet (Tenholtern & Feldwisch, 2004). Die Übertragbarkeit auf den nichtstofflichen Bodenschutz gestaltet sich mitunter schwierig.

(3) **Sanierung**

Hier sind bereits eingetretene Schäden im Onsite- und Offsite-Bereich zu sanieren und im Anschluss mit Maßnahmen vorzubeugen.

3.2.2 Vermeidungsstrategien gegen Bodenerosion

Welche Handlungsempfehlungen sind heute zu geben, um ein Höchstmaß an Vorsorge zu gewährleisten? Die Prozesse an der Bodenoberfläche (Helming, 1992; Hecker, 2002) spielen dabei eine entscheidende Rolle:

1. Die Energie der Niederschläge ist zu brechen. Das heißt, die Oberfläche ist vor dem Aufprall der Regentropfen zu schützen und der Oberflächenabfluss ist zu bremsen.
2. Die Wasseraufnahmefähigkeit von Krume und Unterboden ist zu verbessern. Dies gelingt durch grobe Poren mit hoher Kontinuität. Weiter ist das Zusammenfließen von Wasser, insbesondere in Fahrspuren, zu vermeiden.
3. Das Bodengefüge ist zu stabilisieren, so dass Fahrverkehr nicht negativ auf die Bodenstruktur wirkt.

Die Maßnahmen zur Minderung von Bodenerosion (KTBL, 1998; BMVEL, 2001) sind zu unterteilen in:

- allgemeine acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen,
- teilflächigen Bodenschutz,
- ganzflächigen Bodenschutz,
- flur - und kulturtechnische Maßnahmen.

Mit **acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen** wird für eine Stabilisierung der Bodenstruktur gesorgt. Dazu gehören ausreichende Kalkversorgung, ausgeglichene Humuswirtschaft, Bearbeiten und Befahren bei nicht zu feuchtem Bodenzustand, reduzierte Bearbeitungsintensität mit rauer Ackeroberfläche (Helming, 1992), Vermeiden von Spurrinnen an der Oberfläche, nicht zu einseitige Fruchtfolgen und bei mäßiger Hangneigung hangparalleles Arbeiten (Buchner & Köller, 1990; BML, 1991; BML, 1992; KTBL, 1998; BMVEL, 2001; Lütke Entrup & Gröblichhoff, 2001).

Zum **teilflächigen Bodenschutz** gehören Maßnahmen wie Untersaaten, z. B. bei Mais, höhenlinienparallele Streifeneinsaaten von Getreide in Reihenfrüchten und Streifenanbau von erosionsfördernden und -hemmenden Früchten, die zu einer Verkürzung der erosiven Hanglänge beitragen (BML, 1991; Diez, 1994; Schmidt, 1994; Sommer, 1998b).

Der **ganzflächige Bodenschutz** zielt hauptsächlich auf die Verminderung der Oberflächenverschlammung ab. Das Belassen von Ernte- und/oder Zwischenfruchtresten an der Oberfläche in Verbindung mit einer Mulchsaat mit/ohne Saatsbettbereitung oder Direktsaat bricht die Energie der Regentropfen, sorgt für eine erhöhte Infiltration und ist Bremswirkung für hangabwärts laufendes Wasser (Brunotte, 1990; Tebrügge, 1994; Frielinghaus, 1998; Schmidt et al., 1999). Der Einfluss des Bedeckungsgrades auf Verschlammung und Erosion wird von Roth (1992, 1995) beschrieben.

Die **flur- und kulturtechnischen Maßnahmen** können nur langfristig über Flurneuordnung und Flurgestaltung umgesetzt werden. Dabei ist insbesondere die erosionswirksame Hanglänge zu verkürzen (BML, 1991; Schmidt, 1994; Frielinghaus, 1998).

Zur Bewertung des Problems "Oberflächenabfluss/Bodenerosion" wie auch der Maßnahmen zur Minderung sind Indikatorsysteme erforderlich. Indikatoren (= Zustandsvariablen) sind u. a. ein Hauptinstrument der Agrarumweltberichterstattung, da sie komplizierte Sachverhalte gut darstellen. Dies ist erforderlich, um Maßnahmen der Bodennutzung zur **guten fachlichen Praxis** dem Standort und dem Risiko anzupassen und kontrollierbar zu machen.

Auf OECD-Ebene umfassen die Agrarumweltindikatoren drei Schwerpunkte (Dachverband Agrarforschung, 2003):

- (1) Umweltressourcen,
- (2) Trends in der Umweltbelastung,
- (3) Landwirtschaftliches Umweltmanagement und Ressourceneffizienz.

Dort, wo keine Datensätze zur Beschreibung des Ausmaßes von Bodenerosion vorliegen, muss ein indikatorbasiertes Monitoring (Bannik et al., 2004) zur Risiko-

abschätzung (Frielinghaus & Bork, 1999) erfolgen. Während beim stofflichen Bodenschutz (Altlasten, Schadstoffe) das "Critical-load-Konzept" anwendbar ist, werden für den nichtstofflichen Bereich (physikalische und biologische Parameter) "critical states" bzw. "critical losses" verwendet. Die Enquetekommission des Bundestages fordert ein geeignetes Indikatorsystem. Die Schutzziele unterschiedlicher Intensität richten sich nach der standortspezifisch erfolgten Indikation der **Belastbarkeit der Böden** und der **Belastung durch unangepasste Landnutzungssysteme**. Als Grundlage für die Entwicklung von Schutzkonzepten dient das "Pressure-State-Response"- (= Belastung-Zustand-Reaktion-)Konzept der OECD (2001).

Für das Problem Bodenerosion wird die Belastbarkeit der Standorte (= potenzielle Erosionsgefährdung) mit dem Erosionsrisiko, das sich aus der Bodennutzung ergibt (= Nutzungsrisiko), verknüpft, so dass die tatsächliche Erosionsgefährdung abschätzbar ist (Frielinghaus et al., 2000). Aus der sich daraus ergebenden Risikoeinstufung können die notwendigen Schutzmaßnahmen (acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen, teilflächiger Bodenschutz, ganzflächiger Bodenschutz, kulturtechnische Maßnahmen) abgeleitet werden.

Maßnahmen zum Bodenschutz werden in der Praxis vornehmlich angenommen, wenn die Rentabilität im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren gegeben ist. So sollte 'Konservierende Bodenbearbeitung' im Mittel der Jahre ertragsgleich mit Pflugbearbeitung sein. Treten durch den Anbau von Zwischenfrüchten zunächst höhere Kosten auf, können diese durch den Gründüngungseffekt über höhere Erträge ausgeglichen werden (Brunotte, 1990). Dies gelingt in der Regel bei Mulchsaaten mit/ohne Saatbettbereitung zu Reihenfrüchten, wie Zuckerrüben, Mais und Kartoffeln. Direktsaat fällt insbesondere auf nassen, humusarmen Böden ertraglich zurück. Brunotte & Wollenweber (2004) erläutern dies für den Zuckerrübenanbau.

Wird allein mit Rückständen der Vorfrucht gearbeitet, ist am ehesten mit einer Einsparung von Kosten bei der Bodenbearbeitung zu rechnen. Weil Reihenfrüchte im Frühjahr ausgesät werden, ist auf einen verzögerten Strohabbau durch reduzierte Bearbeitungsmaßnahmen zu achten – bei Feldaufgang und Unkrautbekämpfung treten keine Schwierigkeiten auf. Anders dagegen bei Winterungen.

Standortspezifisch und jahresbedingt können bei der Etablierung der Folgefrucht durch viel unverrottetes Stroh Probleme beim Feldaufgang, bei der Unkrautbekämpfung und bei Krankheiten auftreten.

Es gibt zu Pflug-, Mulch- und Direktsaatverfahren eine Reihe von Untersuchungen, die neben Bodenschutzeffekten auch die Ertragsentwicklung und die Kosten berücksichtigen (Brunotte, 1990; Buchner & Köller, 1990; Buchner, 1997; Linke, 1998; Sommer, 1998b; Schmidt, 1999; Brunotte & Wagner, 2001; Lütke Entrup & Gröblichhoff, 2001; Wegener, 2001). Die Betrachtungsweise ist jedoch sehr punktuell und ordnet nur die direkten Kosten den Erträgen zu. Eine Berücksichtigung ganzer Fruchtfolgen und die monetäre Bewertung der Bodenschutzeffekte fehlen in der Regel.

3.3 Run off von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer

Die positiven Wirkungen vom Bodenbedeckungsgrad auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion sind in Kapitel 3.2 und werden in Kapitel 4.2 deutlich herausgestellt. Dies suggeriert zunächst eine Reduktion der im Abflusswasser gelösten Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel. Die Abflussminderung liegt begründet in der erhöhten Infiltrationsrate von Bodenbearbeitungsverfahren mit verringerter Eingriffsintensität in den Boden, wie Mulch- und Direktsaat. Für die verbesserte Infiltration sind biogene Vertikalporen mit hoher Kontinuität verantwortlich, die allerdings auch die Gefahr des Transportes von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln über Drainagen in die Gewässer in sich bergen. Vor diesem Hintergrund ist eine detaillierte Betrachtung der Einflussfaktoren erforderlich, um eine differenzierte Beurteilung der Austragspfade nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung vornehmen zu können (siehe Abb. 26). Dabei wird das Austragsverhalten einzelner Wirkstoffe nur beispielhaft angesprochen.

3.3.1 Eintragspfade und Wirkstoffeigenschaften von Pflanzenschutzmitteln (PSM)

Die **Gesamteinträge in die Oberflächengewässer in Deutschland** setzen sich zusammen aus diffusen Einträgen, wie Abtrift (Ripke et al., 2001) und Run off aus Oberflächenabfluss und Drainagen und aus punktuellen Einträgen, wie Hof-

abfließen oder Kläranlagen (Bach et al., 2000; Lütke Entrup et al., 2002; Erlach et al., 2004). Von Relevanz auf landwirtschaftlichen Flächen sind vor allem die ausgebrachten Herbizide, weil sie zum Teil auf unbewachsenen Boden bzw. während der Jugendentwicklung der Kulturpflanzen appliziert werden und damit einem erhöhten Austragsrisiko unterliegen. Für Insektizide und Fungizide gilt dies nicht in dem Maße, da die Ausbringung in weiterentwickelte Pflanzenbestände erfolgt und wenig Wirkstoff auf den Boden gelangt.

Nach Akkan et al. (2003) werden in Deutschland jährlich 35.000 t PSM auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt, davon 16.000 t Herbizide. Nach einer Studie des Umweltbundesamtes (UBA), wo eine Schätzung der Einträge 42 Wirkstoffe aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer in Deutschland berücksichtigt, entfällt der größte Anteil mit 70-90 % auf die Hofabläufe (Frede et al., 1998; Schiller & Gatzweiler, 1998). Durch das Reinigen der Pflanzenschutzgeräte können die Mittel ungehindert in die Gewässer gelangen. Untersuchungen von Frede et al. (1998) und Bach et al. (2000) zeigen, dass in regionalen Wassereinzugsgebieten durch Beratung eine Reduzierung der Hofabläufe um 80 % zu erreichen war. Dagegen können Kläranlagen nicht deutlich zu einer Reduktion von Pflanzenschutzmitteln beitragen (Fischer et al., 1998).

Auf die diffusen Eintragspfade fallen 10-30 % und haben damit eine untergeordnete Bedeutung. Dennoch sind im Sinne einer hohen Trinkwasserqualität alle Anstrengungen zu unternehmen, um auch hier ein Höchstmaß an Vorsorge zu betreiben. Dafür ist die Bedeutung der einzelnen Eintragspfade zu analysieren (**Tab. 1**). Innerhalb der diffusen Einträge nimmt Run off durch Oberflächenwasser etwa 60 %, Run off durch Drainagen ca. 10 % und durch Abtrift etwa 20 % ein. Die im Rahmen der UBA-Studie modellierten Werte wurden mit tatsächlichen Messungen in einer Region in Hessen verglichen. Die Hälfte der modellierten Werte liegt in der Bandbreite von 20-500 % der Messungen. Tendenziell wurden die diffusen Gewässereinträge mit dem Modell DRIP (= Drainage- und Run off-Input von Pflanzenschutzmitteln) eher überschätzt.

Die klare Zuordnung von Frachten bzw. die prozentuale Verteilung von Frachten auf die unterschiedlichen Eintragspfade ist immer wieder durch Feldversuche auf Groß- bzw. Kleinparzellen unter natürlichen bzw. künstlichen (Regensimulation)

Bedingungen erfolgt (Aderhold & Nordmeyer, 1994; Beisecker, 1994; Frede et al., 1994; Fischer et al., 1995; Haider & Auerswald, 1997; Kördel & Köppel, 1997; Bach et al., 2000; Reese-Stähler et al., 2001; Lütke Entrup et al., 2002). Dabei liefert Starkregensimulation in der Regel keine wirklichkeitsnahen Abtragsdaten. Parzellenversuche berücksichtigen nur den Austrag am Ende der Parzelle und sind damit ungeeignet zur Bestimmung des quantitativen Gewässereintrages. Bei PSM-Frachtmessungen in Gewässern sind die Eintragspfade nicht eindeutig zu bestimmen (Bach et al., 2000; Lütke Entrup et al., 2002).

Tab. 1: Pflanzenschutzmitteleinträge in die Oberflächengewässer in Deutschland aus diffusen Quellen; Mittelwerte und Spannbreiten der Modellschätzung, summiert über 42 Wirkstoffe; Bezugsjahr 1993/94 (Bach et al., 2000)

Eintragspfad	Wirkstoffeintrag in [kg/a] in Oberflächengewässer		
	untere Grenze Vertrauensbereich*	mittlere Schätzung	obere Grenze Vertrauensbereich*
Run off	1.500	9.060	19.400
Drainagen	60	1.490	16.100
Abdrift	410	3.350	6.300
Insgesamt**	2.000	13.900	41.800

* Summe der minimalen/maximalen Schätzergebnisse bei Variation der jeweils sensitivsten Eingabeparameter: Berechnung für Dichlofluanid mit $DT_{50} = 18$ d und für Propineb mit $DT_{50} = 8$ d.

** gerundet

Der Zeitpunkt und das Ausmaß von Starkregenereignissen können nicht vom Landwirt beeinflusst werden, ist aber von entscheidender Bedeutung für das Austragsverhalten (Frank et al., 1982; van Hoof et al., 1992; Kimbrough & Litke, 1996; Griffin et al., 1997; Sadeghi & Isensee, 1997; Kreuger, 1998; Düring & Hummel, 1999). Sowohl beim Oberflächenabfluss, als auch beim Makroporenfluss kommt es insbesondere bei leicht wasserlöslichen Wirkstoffen zum Austrag, wenn das Starkregenereignis kurzfristig auf die Applikation folgt (Timmermann & Mokry, 1990; Watts & Hall, 1996; Kördel & Klöppel, 1997; Lennartz et al., 1997; Sadeghi & Isensee, 1997; Trojan & Linden, 1998; Mazzoncinii et al., 1999; Lütke Entrup et al., 2002).

Schlüssel für die Herbizidverlagerung ist die niederschlagsinduzierte Verlagerung im Vergleich zur Herbizid-Applikation. Dabei spielen die Standortbedingungen

(Klima- und Bodenverhältnisse) und das Ausmaß des Starkregenereignisses eine größere Rolle, als die Stoffeigenschaften wie Abbau- und Sorptionseigenschaften (Schneider et al., 1997; Bach et al., 2000).

Das Rückstandsverhalten der Pflanzenschutzmittel (PSM) in verschiedenen Kompartimenten der Umwelt (= Persistenz) ist sehr komplex, da es von dynamischen Prozessen gesteuert wird (**Abb. 1**). Wirkstofftyp, Applikationsmethode und Witterungsbedingungen nehmen gemeinsam Einfluss. Der Boden spielt eine wichtige Rolle, als Filter-, Puffer- und Transformationssystem dem Stoffkreislauf "Schadstoffe" zu entziehen und damit den Naturhaushalt zu entlasten.

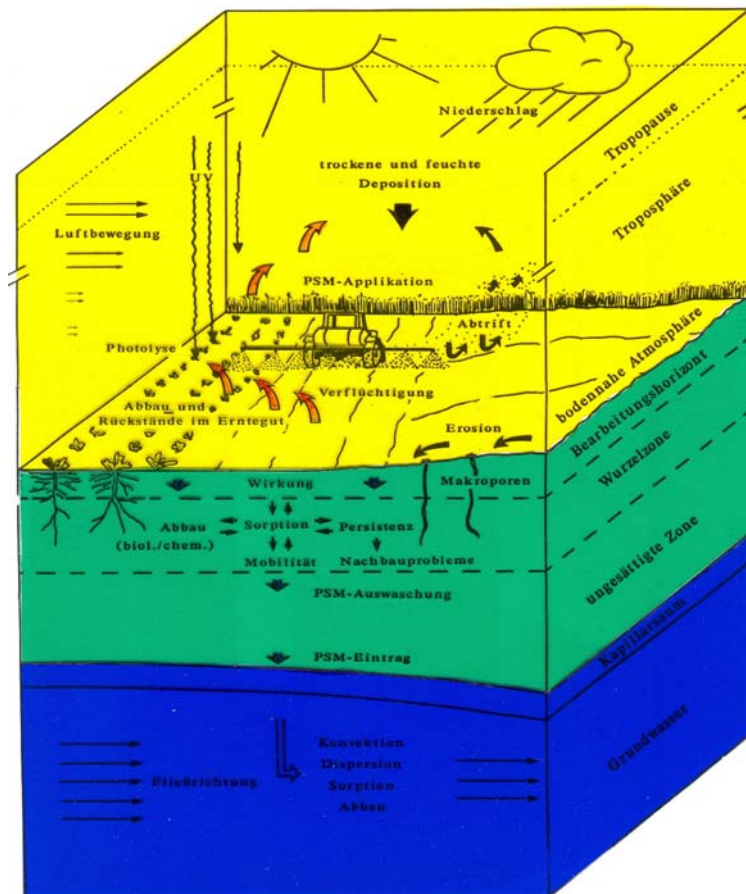


Abb. 1: Rückstandsverhalten: PSM-Dynamik in Agrarökosystemen (aus Pestermer, Springer Umweltlexikon, 2000)

Die Bodenbearbeitung nimmt auf die genannten Funktionen einen entscheidenden Einfluss. Insgesamt sind für die Verringerung eines PSM im Agrarökosystem Prozesse wie

- biotische und abiotische Abbauvorgänge,
- Verflüchtigung (= Abtrieb),

- Versickerungsverhalten,
 - Festlegen und Freiwerden (Ad- und Desorption)
- verantwortlich (aus Pestemer, Springer Umweltlexikon, 2000).

Löslichkeitsunterschiede haben keinen quantitativen Niederschlag in den Gesamtausträgen, da ständig Verteilungsprozesse zwischen fester und flüssiger Phase stattfinden. Die chemisch/physikalischen Eigenschaften der Wirkstoffe bestimmen die Löslichkeit und die Bindung an Sedimente. Substanzen, die in der Krume zu 80-90 % an den Boden gebunden sind, sind bei Erosion nur zu 10-20 % an Sediment gebunden. Stark an Bodensedimente sorbierte Wirkstoffe (= hoher K_{oc} -Wert, Wasserlöslichkeit < 1 mg/l) werden in ihrem Austragsverhalten entscheidend von erosionsmindernden Bodenbearbeitungsverfahren beeinflusst (Haider & Auerswald, 1997).

Niederschläge hoher Intensität kurz nach Applikation sind hinsichtlich Auswaschungsrisiko ungünstig, da keine Zeit für Stoffdiffusion im Aggregat-Innenbereich besteht. Nur die Matrixrandbereiche von präferentiellen Fließwegen sind als mögliche Sorptionsfläche nutzbar. Hohe Fließgeschwindigkeiten nach intensiven Niederschlägen führen zu keiner Gleichgewichtseinstellung zwischen gelöster und sorptiver Phase (Lennartz et al., 1997). Abschwemmung von PSM hängen hauptsächlich von Standortbedingungen und Erosionsereignissen ab und weniger von Stoffeigenschaften.

3.3.2 Einfluss von Bodenbearbeitung und Bedeckung auf Oberflächenabfluss, Makroporenfluss und Austrag über Drainagen

Während der Einfluss von Starkregenereignissen und Stoffeigenschaften auf das Austragsausmaß relativ isoliert betrachtet werden kann, ist der Einfluss von Bodenbearbeitung, Oberflächengestaltung, Bodeneigenschaften und Porenstruktur nur in seiner Wechselwirkung zu analysieren.

Die Maßnahmen der Bodenbearbeitung beeinflussen den Bodenbedeckungsgrad mit organischen Rückständen. Pflanzenreste mindern die Oberflächenverschlammung und beugen somit Oberflächenabfluss und Bodenerosion vor. Weiter beeinflusst organische Substanz die Aktivität der Regenwürmer, insbesondere die des

Lumbricus terrestris, der vornehmlich die biogenen Vertikalporen mit hoher Kontinuität schafft (Ehlers, 1975; Edwards et al., 1992; Friebe & Henke, 1992). In diesen Makroporen kann Niederschlagswasser mit/ohne gelöste Agrochemikalien transportiert werden. Die oft nicht klar beschriebenen Rahmenbedingungen, wie Standort, Bodenbearbeitung und Applikationsbedingungen, lassen tendenzielle Aussagen über den Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren oft nicht erkennen.

Zur Klärung dieser Frage wurden in der Vergangenheit oft Berechnungsversuche mit Atrazin durchgeführt. Dabei war die ausgetragene Wirkstoffmenge von Direktsaat (DS) im Vergleich zu Pflug geringer, allerdings mit höherer Konzentration (Masse et al., 1996). Insgesamt haben Feldversuchen gezeigt, dass es bei DS zu keinen PSM-Austrägen durch Oberflächenabfluss und Bodenerosion kam, nach Pflug jedoch zu erheblichen Austrägen (Kenimer et al., 1987; Sauer & Daniel, 1987; Foy & Hiranpradit, 1989; Sander et al., 1989; Blevins et al., 1990; Hall & Mumma, 1990; Heatwole et al., 1991; Czapar et al., 1994; Düring & Hummel, 1994; Mazzoncini et al., 1999; Smith et al., 2001; Rosner & Klik, 2005).

Auch gibt es in der Literatur widersprüchliche Aussagen darüber, inwieweit 'Konservierende Bodenbearbeitung' und Direktsaat im Vergleich zu konventioneller Bodenbearbeitung mit Pflug einen mindernden Effekt auf den Austrag von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln haben (Sadeghi & Isensee, 1977; Logan et al., 1987; Schneider et al., 1997; Isringhausen et al., 1999).

In ihrem Austragsverhalten werden unter den Bodenbearbeitungsverfahren in der Regel Pflug, Mulchsaat und Direktsaat miteinander verglichen. So hat eine jüngere, umfangreiche Feldstudie in Nordrhein-Westfalen (Lütke Entrup et al., 2002) für Mais, Winterweizen und Winterraps folgende Tendenzen aufgezeigt:

- Bodenbedeckungsgrad (BD) >30 % mindert Oberflächenabfluss und Bodenerosion um 70 %. Bei BD >70 % tendieren Abfluss und Abtrag gegen Null. Bei Winterraps bedeutete DS Null erosionsgefährdete Tage, Mulchsaat 14 Tage und Pflug 46 Tage.
- Oberflächenabflüsse in der Pflugvariante betragen 0,1-3,2 % des gefallen Niederschlages mit max. 16 %. Allerdings waren die Hangcharakteristika nicht sehr kritisch hinsichtlich Gefährdung.

- Bei Mulchsaat konnten Boden- und Stoffausträge um 60-100 % reduziert werden (Erlach et al., 2004).
- Bei Direktsaat trat kein Oberflächenabfluss auf.
- Die Maisherbizide wurden zwischen 4 % (Pendimethalin) und 96 % (Terbuthylazin) im Run off-Wasser gefunden. Bei Raps waren durchschnittlich 80 % der Herbizidanteile im Run off-Wasser.
- Bei Mais nach Pflugfurche wurden Austräge von Metazachlor, Pendimethalin und Terbuthylazin im Run off bis 0,3 % (Terbuthylazin) der applizierten Menge gefunden. Metazachlor im Raps betrug 0,3 % der applizierten Menge im Run off. Im Getreide wurde Chlortoluron mit 0,001 % und Isoproturon mit 0,002 % der applizierten Wirkstoffmenge im Run off-Wasser gefunden.

Der Eintragungspfad Oberflächenabfluss gegenüber Drainage (schwach und stark sorbierte Wirkstoffe) zeigte ein höheres Austragsverhalten, unabhängig von den Bearbeitungsvarianten. Düring & Hummel (1999) weisen nach, dass Regenmuster und Applikationszeit in Abhängigkeit von Niederschlägen die Herbizidbewegung mehr beeinflussen als Bodenbearbeitungssysteme.

Neben Präventivmaßnahmen gegen Run off auf der Fläche ist die Anlage von Uferandstreifen möglich. **Die Schutzwirkung von Randstreifen** für die Verminderung von PSM-Einträgen aus diffusen Quellen in Gewässer wird von einigen Autoren als gering bis sehr gering bewertet. Eine Effizienzsteigerung ist nur durch die Kombination aus ganzflächigem Bodenschutz und Uferandstreifen größerer Breite zu erreichen (Bach & Frede, 1997; Lang & Hurle, 1997; Schiller & Gatzweiler, 1998).

Haupttransportpfad für die Drainagen sind Makroporen (Abb. 1), die unter folgenden Bedingungen den Stofftransport fördern. Erfolgt eine Abnahme des Matrixpotenzials im Unterboden vor der Aufsättigung des Oberbodens, so liegt ein deutliches Indiz für das Auftreten von Makroporenfluss vor. Das heißt, ohne die Kenntnis der tatsächlichen Wasserbewegung können Makroporenfluss und Infiltrationsverhalten nicht beurteilt werden (Beisecker, 1994). Mithilfe von Tracern (Bromid) wurde der erhöhte Makroporenfluss von DS (= Direktsaat) nachgewiesen (Richter et al., 1996). Verminderte Verschlammung und eine Vielzahl zur Oberfläche offener Makroporen, die hydraulisch wirksam sind, sind verantwortlich dafür.

Die von Regenwürmern, insbesondere dem *Lumbricus terrestris*, geschaffenen Makroporen weisen eine hohe Stabilität und Langlebigkeit auf (Graff & Hartge, 1974). Sie haben einen Durchmesser von 2-11 mm und erreichen oft eine Anzahl von >100 Gängen/m². Unter Wald und Grünland machen sie 50 % des Grobporenvolumens aus und damit 1-8 % des Gesamtporenvolumens (Aderhold, 1995) bzw. 0,32 bis 5 %, wie es von anderen Autoren bestätigt wird (Trojan & Linden, 1998).

Grundsätzlich unterscheidet man beim Makroporenfluss zwischen "preferential flow" und "bypass flow" (Tyler & Thomas, 1977; Baker, 1987; Beisecker, 1994; Frede et al., 1994). Von "**präferentiell**em Fluss" spricht man, wenn der Ausgangswassergehalt nahe der Feldkapazität liegt. In der Regel ist das Verlagerungsrisiko als "mittel" einzustufen, da ein Teil des Wirkstoffes mit präferentiellem Fluss bereits verlagert ist und sich damit die Vorrücktiefe der Infiltrationsfront verringert. Präferentieller Fluss kann aufgrund der Sättigung des Porensystems auch nach Pflugfurche entstehen.

"**Bypass-Fluss**" liegt vor bei geringer Anfangsfeuchte und wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix übersteigt – diese Art von Makroporenfluss ist nur bei Direktsaat (DS) möglich. Ein hohes Verlagerungsrisiko besteht, wenn Wirkstoffe gerade ausgebracht und im Niederschlagswasser gelöst sind. Wenn PSM bereits in der Bodenmatrix enthalten sind, dann ist das Verlagerungsrisiko bei DS < Pflug, da ein Teil des Niederschlages an der Bodenmatrix vorbei schnell in die Tiefe gelangt und die Vorrücktiefe und Vorrückgeschwindigkeit der Infiltrationsfront von DS < Pflug ist. In Bezug auf Nährstoffe bedeutet dies eine verlängerte Verfügbarkeit (Beisecker, 1994; Aderhold, 1995). Die Wechselwirkungen zwischen Stoffeigenschaften und Mobilitätsfaktoren führen zu einer schwierigen Quantifizierung von differenziertem Austragspotenzial von Herbiziden und Nährstoffen über präferentielle Fließwege bei pfluglosen Verfahren (Lütke Entrup et al., 2002).

Eindeutig überwiegt die nachgewiesene Austragsminderung über den Pfad Oberflächenabfluss und Bodenerosion. Über den **Drainageabfluss** werden hauptsächlich lösliche Stoffe ausgetragen. Bei den Nährstoffen ist eine Stickstoffverlagerung kritischer als Phosphor (Harris et al., 1995; Frede et al., 1998).

Feldstudien liefern nur eine begrenzte Möglichkeit, Stoffausträge aus drainenden Flächen zu quantifizieren. Der Verlagerung wirkt das Abbauverhalten entgegen. Die Abbaugeschwindigkeit von Herbiziden ist durch verstärkte mikrobielle Tätigkeit in Mulch- und Direktsaatvarianten erhöht (Düring & Hummel, 1994; Lütke Entrup et al., 2002). Dadurch ergibt sich unter bestimmten Rahmenbedingungen ein geringerer Makroporenfluss.

Regenwurmgänge, insbesondere die vom *L. terrestris*, weisen nicht nur eine erhöhte Kontinuität der Gänge aus, sondern die Röhren sind auch mit einer Tapete von Polysacchariden, Tonteilchen, organo-mineralischen Komplexen und Huminstoffen ausgestattet (Graff, 1984; Edwards et al., 1990; Aderhold, 1995). Dies führt zu einer gewissen Sorption und Filterung der Wirkstoffe an den Wandungen mit der Fähigkeit zum Abbau. Edwards et al. (1992) stellten fest, dass Alachlor beim Durchströmen eines Bodenblocks mit künstlichen RW-Gängen noch mit 69 % der Ausgangskonzentration, beim Durchströmen von echten RW-Röhren noch mit 18 % vorlag. Bei Atrazin waren es 46 % bei künstlichen und 11 % bei echten Gängen.

Das Abbauverhalten jahreszeitlich betrachtet, ist im Herbst eingeschränkt, da oft die notwendigen Temperaturen für eine hohe Abbaurate fehlen (Dohnberg, 2000). Hinzu kommen die hohen Sickerwassermengen über Winter. Laborversuche zeigen optimale Abbaubedingungen bei 60 % Feldkapazität (FK) und 25 °C (Timmermann & Morky, 1990). Die Wirkstoffeigenschaften sind mittel- und langfristig von der chemischen Industrie bei der Entwicklung der PSM zu beeinflussen und stellen damit auch einen wesentlichen Faktor in den Vermeidungsstrategien dar.

3.4 Mykotoxinbildung im Getreide

Neben der Erzielung nachhaltiger Erträge ist die Entwicklung der Landwirtschaft in den letzten 20 Jahren dadurch geprägt, Arbeitserledigungskosten zu reduzieren und Bodenschutzanforderungen zu berücksichtigen. Dies hat zu einer Ausdehnung pflugloser Anbauverfahren geführt, die insbesondere auf Hohertragsstandorten bei enger Fruchtfolge und ungünstigen Witterungsbedingungen während der Blüte das Risiko für die Ausbreitung von Schimmelpilzen der Gattung 'Fusarium' erhöhen können.

Auf verstärkten Ährenbefall von Weizen mit *Gibberella zeae* (*Fusarium graminearum*) nach Maisanbau haben Hoffer et al. schon 1918 in den USA hingewiesen (Hoffer et al., 1918). Das Fusarium-Toxin T 2 ist am längsten bekannt und hat 1920 in der Sowjetunion zu zahlreichen Todesfällen geführt. In den USA, Kanada, Australien, Asien und Europa sind Fusarien die verbreitetsten Mykotoxinbildner (European Commission, Scientific Committee on Food, 1999; Dehne, 2002; Bartels & Rodemann, 2003).

In Deutschland ist vor allem die starke Zunahme des Maisanbaus von 120.000 ha (1960) auf 1,2 Mio. ha (1999) für die Verbreitung des Pilzes verantwortlich. Heute sind es bereits 1,7 Mio. ha (ca. 15 % der Ackerfläche), und es ist durch den Bau von Biogasanlagen mit einem weiteren Anstieg der Maisflächen auch in viehschwachen Regionen zu rechnen (Eder, 2000; Rintelen, 2000).

3.4.1 Entstehung von Mykotoxinen und gesetzliche Regelungen

Die **Folgen von Pilzinfektionen der Getreideähre** können vielfältig sein:

- ▶ Durch Fusarien kommt es in der Ähre zum Schadbild der "partiellen Taubährigkeit". Dies kann durch Kümmerkorn und einem zu geringen Tausendkorngewicht zu Ertragsdepressionen bis zu 45 % führen (Homdork et al., 2000; Nitzsche et al., 2002; Rodemann & Bartels, 2004; Hirschfeld et al., 2005). Infolge von Myzelwachstum im Korn wird der Mehlkörper zersetzt, und die Qualitätseigenschaften werden beeinträchtigt. Die Ausscheidung von extrazellulären Pilzenzymen führt durch Abbau von Stärke (Gliadine, Glutenine) zu niedermolekularen Stoffen mit einer Beeinträchtigung der Backeigenschaften. Insgesamt werden die Qualitätsparameter wie Fallzahl, Sedimentationswert, Back- und Brauqualität und Volumenausbeute verringert (Nitzsche et al., 2002; Tischner & Doleschel, 2003; Rodemann & Bartels, 2004).
- ▶ Die Aufnahme von Pilzgiften mit der Nahrung oder dem Futter kann zur toxischen Wirkungen bei Mensch und Tier führen. Dabei kann es zu akuten und chronischen Vergiftungen kommen mit Symptomen bzw. Wirkungen wie Erbrechen, geringer Leistung, Gewichtsverlust, Immunsuppression und Fruchtbarkeitsstörungen (Dänicke & Oldenburg, 2000; Dehne et al., 2002; Masloff & Seling, 2005).

Fusariumpilze bilden eine Vielzahl von Mykotoxinen, die sich unterschiedlichen chemischen Stoffgruppen zuordnen lassen. Die wichtigste Klasse sind die Trichothecene, die in vier Typen (A bis D) unterschieden werden. Wichtigste Verbindungen vom Typ B sind das Desoxynivalenol (DON), das 3-Acetyl-DON, das 15-Acetyl-DON und das Nivalenol (NIV). Die zweite Gruppe wird durch das Zeralenon (ZON) repräsentiert (Offenbächer, 2002).

In Deutschland kommen *Fusarium graminearum* und *Fusarium culmorum* am häufigsten auf Getreide vor und sind die hauptsächlichen Verursacher des Ährenbefalls (**Abb. 2**). Die Pilze entwickeln sich sowohl in lebenden als auch auf abgestorbenen Pflanzenresten fort. *F. graminearum* ist in der Lage geschlechtliche Fruchtkörper (Perithezien) zu bilden, in denen Ascosporen heranreifen. Diese werden aktiv aus den Fruchtkörpern herausgeschleudert und über den Wind verbreitet. Darüber hinaus können ungeschlechtliche Konidien über Regenspritzer zur Ausgangsinfektion der unteren Blätter führen. Auf diesem Wege kann ein Befall über die Blattetagen erfolgen.

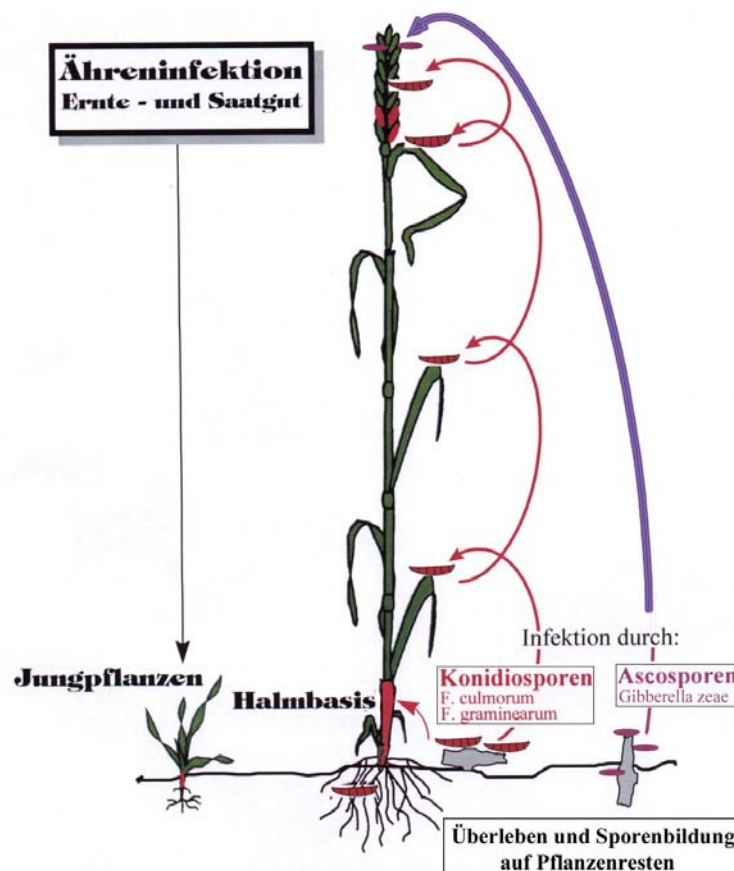


Abb. 2: Infektionswege der Fusarien (Weinert, 1995)

Optimal für eine Ähreninfektion sind Temperaturen um 25 °C, hohe Luftfeuchte und Niederschläge während der Blüte (Oldenburg, 2004). Der Pilz wächst in das Ährchen ein und kann nach Erreichen der Spindel die Leitbahnen für Wasser und Nährstoffe unterbrechen, so dass die partielle Taubährigkeit entsteht. Beim Auskeimen der Sporen bildet der Pilz Toxine – das Desoxynivalenol (DON) wird aufgrund der Häufigkeit und Konzentration als das Leittoxin angesehen (Offenbacher, 2002; Rodemann & Bartels, 2004; Schnieder, 2005).

Fusarium graminearum und *Fusarium culmorum* rufen in der Ähre die gleichen Symptome hervor. Allerdings bildet *F. culmorum* keine flugfähigen Ascosporen, sondern ist dauerhaft im Boden und an Pflanzenresten vorhanden und kann von der Basis über Internodien nach oben wachsen. Diese Art der Infektion kann zurzeit nicht bekämpft werden. Nach Leisse & Puhl (1994) ist allerdings die systemische Infektion der Ähre durch die Halmbasis noch nicht bewiesen (Snijders, 1990; Leisse & Puhl, 1994; Wegener & Wolf, 1995; Kropf & Schlüter, 2005).

Die Versorgung der Bevölkerung mit gesunden Nahrungsmitteln pflanzlicher und tierischer Herkunft gehört zu den Hauptaufgaben der Landwirtschaft. Gesetzliche Rahmenbedingungen vor dem Hintergrund eines vorsorgenden Verbraucherschutzes haben dafür zu sorgen, dass unerwünschte Substanzen nicht in die Nahrungsmittelkette gelangen. Auf der Grundlage des Lebensmittel- und Bedarfsgegenstandesgesetzes (§ 9: Ermächtigung zum Schutz der Gesundheit) kann in Deutschland über Verordnungen eine Gefährdung der Gesundheit durch Lebensmittel verhütet werden (Masloff & Seling, 2005). Am 12. Februar 2004 trat in Deutschland eine Änderung der **Mykotoxin-Höchstmengen-Verordnung** und Diätverordnung in Kraft. Die Höchstwerte für verarbeitetes Getreide lagen unter den derzeit festgelegten Werten der EU. Inzwischen tritt eine VO der EU-Kommission in Bezug auf Fusarientoxine am 1. Juli 2006 in Kraft. Sie berücksichtigt auch unverarbeitetes Getreide (**Tab. 2**). Deutschland wird sich dieser Regelung anschließen (EG, 2005).

Sehr viele offene Fragen existieren noch bei der Probenahme und der Wahl der Analysemethoden. Eine aktuelle Übersicht liefert Krska et al. (2001). Bisher können DON und ZON im Labor mittels einfachen immunologischen Tests (ELISA) als auch mit aufwändigen chromatographischen Verfahren (HPLC) bestimmt werden. Da ab

Sommer 2006 die Höchstmengen auf Rohware ausgedehnt werden, sind Schnelltests erforderlich. Die bisher vorhandenen Schnellmethoden wie NIRS, Bildanalyse oder Farbbonitur stellen keine sichere Beurteilung der quantitativen Belastung von Partien bei der aufnehmenden Hand dar (Schwabe et al., 1993; Krska et al., 2001; Offenbächer, 2002; Masloff & Seling, 2005; Munzert & Lepschy, 2005).

Tab. 2: Höchstgehalte für Fusarientoxine in Lebensmitteln (EG, 2005)

Wirkstoff	Lebensmittelgruppe	Höchstmenge ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	
		BRD*	EU**
Deoxynivalenol (DON)	Unverarbeitetes Getreide außer Hartweizen, Hafer und Mais	—	1.250
	Unverarbeiteter Hartweizen und Hafer	—	1.750
	Getreidemehl	500	750
	Brot, feine Backwaren, Kekse, Getreidesnacks und Frühstückszerealien	350	500
	Teigwaren (trocken)	—	750
	Getreidebeikost und andere Beikost für Säuglinge und Kleinkinder	100	200
Zearalenon (ZON)	Unverarbeitetes Getreide außer Mais	—	100
	Getreidemehl, ausgenommen Maismehl	50	75
	Brot, feine Backwaren, Kekse, Getreidesnacks und Frühstückszerealien	—	50
	Getreidebeikost und andere Beikost für Säuglinge und Kleinkinder	20	20
Fumonisine (B ₁ und B ₂)	Maiserzeugnisse zum direkten Verzehr, ausgenommen Cornflakes	500	—

* Nationale Höchstmengenverordnung: in Kraft getreten am 12.02.2004

** Verordnung der EU-Kommission in Bezug auf Fusarientoxine: gilt ab 01.07.2006

3.4.2 Einflussfaktoren auf die Fusarium-Toxinbildung bei Getreide

Da das Desoxynivalenol (DON) als Leittoxin angesehen wird, beziehen sich die folgenden Ausführungen auf dieses Mykotoxin und dessen Einfluss auf die Beeinträchtigung von Weizen, als wichtigste Getreideart für Nahrungs- und Futtermittel. Eine mögliche Mykotoxinbelastung des Erntegutes hängt von einer Reihe von Faktoren ab:

- Vorfrucht von Weizen (Mais, Getreide, Blattfrucht),
- Bodenbearbeitung zu Weizen (nicht wendend, wendend),
- Weizen-, Maissorte (anfällig, nicht anfällig),

- Bestandesführung (N-Düngung, Einsatz von Halmverkürzern),
- Fungizideinsatz bei Ährenbehandlung (Strobilurin-, Azoleinsatz),
- Witterung zum Zeitpunkt der Weizenblüte (feucht, trocken).

Durch die sehr vielschichtigen Anforderungen heutiger Landwirtschaft (Ertrag, Qualität, Kosten, Bodenschutz) treffen unterschiedliche Risikofaktoren zusammen – sie bestimmen die Höhe des Befallsrisikos. Um die Einflussfaktoren zu bewerten, werden im experimentellen Feldversuchswesen die Risikofaktoren bei natürlichem Infektionsdruck wie auch künstlich erfolgter Infektion mit infizierten Haferkörnern, Maisstängeln bzw. mit Sprühinfektion untersucht (Beck & Lepschy, 2000; Dänicke & Oldenburg, 2000; Schnieder, 2005). Die Einflussfaktoren werden zunächst isoliert betrachtet und dargestellt:

Vorfrucht von Winterweizen

Unter den Vorfrüchten stellt Mais den größten Risikofaktor dar – je mehr Reststoffe auf dem Acker verbleiben, wie z. B. bei Körnermais, umso höher ist das Infektionsrisiko. Bei Mais treten Fusarien häufig latent auf, ohne auffällige Erscheinungen. Die Infektion des Stängels wird durch Verletzungen, z. B. begünstigt durch den Maiszünsler, hervorgerufen. Kolbenfusariosen entwickeln sich aus Infektionen der Narbenfäden und Kolbenspitzen. Rückstände von Getreide, wie Weizen und Hafer, stellen ein geringes bis mittleres Infektionsrisiko, Blattfrüchte wie Raps, Zuckerrüben und Kartoffeln, ein sehr geringes Risiko dar.

Die Wirkung der Vorfrucht beschränkt sich nicht nur auf die Übertragung des Schaderregers über Pflanzenrückstände, sondern auch auf die Zeitdauer, wann die nächste Frucht in welcher Jahreszeit folgt. Die Verrottungsgeschwindigkeit organischer Substanz wird davon wesentlich geprägt. Durch ein sehr enges C/N-Verhältnis von 30-50:1 verrottet Maisstroh im Vergleich zu Getreidestroh relativ schnell. Frühreife, kurzstrohige Maissorten beschleunigen zusätzlich den Verrottungsprozess (Beck & Lepschy, 2000; El Titi, 2003; Mastel, 2004; Schmidt & Nitzsche, 2004; Stemann, 2004).

Behandlung von Ernterückständen und Bodenbearbeitung

Die Art der Bodenbearbeitung nimmt direkt Einfluss auf die Menge an Pflanzenrückständen an der Bodenoberfläche. Die zunächst einfachste Lösung, das Infek-

tionsrisiko zu reduzieren, scheint der Einsatz des Pfluges, da er die Pflanzenreststoffe in den Boden einwendet. Deshalb fordern die landwirtschaftliche Beratung, der Vertragsanbau und der ökologische Landbau häufig den Pflugeinsatz. Die Industrie reagiert darauf mit der Entwicklung neuer Pflüge, die mit großer Arbeitsbreite und flacher Tiefe kraftstoffsparend eingesetzt werden können oder die sich durch besonders große Durchgänge auszeichnen, um z. B. auch hohe Mengen an Körnermaisrückständen zu beseitigen (Brunotte, 2005; Höner, 2005). Allerdings werden im folgenden Jahr pflanzliche Rückstände z. T. unverrottet wieder hochgepflügt und erhöhen den Infektionsdruck für den Weizen.

Bei nicht wendender Bodenbearbeitung kann bereits mit dem ersten Anbaujahr ein hoher Infektionsdruck bestehen. Um diesen zu reduzieren, sind eine Nachzerkleinerung der Maisreste mit einem Schlegelhäcksler und evtl. eine zusätzliche N-Düngung hilfreich, den Rotteprozess und den Abbau durch Mikroorganismen und Regenwürmer in dem zur Verfügung stehenden Zeitfenster zu beschleunigen. Dies mindert die Lebensgrundlage für die Schadorganismen. Liegen nach strohreichen Sorten hohe Rückstandsmengen vor, ist eine etwas tiefere Einarbeitung, z. B. mit Grubberscheibeneggenkombinationen, vorzunehmen. Die Wiederholung dieses Arbeitsganges beschleunigt die Rotte und reduziert das Infektionsrisiko, so dass z. T. keine höheren DON-Gehalte im Vergleich zum Pflug gemessen wurden (El Titi, 2003; Schlüter et al., 2003; Schmidt & Nitzsche, 2004; Stemann, 2004).

Sortenwahl bei Weizen und Mais

Eine vollständige Resistenz bei **Weizensorten** gegen Fusariosen wurde bisher nicht gefunden. Durch konventionelle Züchtung konnte bisher das Resistenzniveau erhöht werden. Es wird zwischen morphologischen und physiologischen Resistenzfaktoren unterschieden. Bei den morphologischen Komponenten fördern Kurzstrohigkeit, kompakte Ähren und Begrannung das Befallsrisiko mit Ährenfusariosen. Der Züchter kann jedoch besser die physiologische Resistenz (= Eindring-, Ausbreitungs- und Toxinabbau-Resistenz) nutzen. Die weniger anfälligen Sorten reagieren durch den höheren Gehalt phenolischer Verbindungen schneller mit dem Aufbau struktureller Abwehrkomponenten (Buchenauer & Kang, 2002). Auch wird versucht, transgenen Weizen mit so genannten AFP-(Antifungal Protein-)Genen zu erstellen (Gross, 1989; Hakimi et al., 1997; Zimmermann, 2000; Miedaner & Schneider, 2002).

Im Sortenprüfwesen werden die Sorten mit unterschiedlichen Risikofaktoren kombiniert und einer natürlichen bzw. künstlichen Inokulation ausgesetzt. Zur Kennzeichnung der Sortenanfälligkeit erfolgt in den Landessortenversuchen eine Ährenbonitur, deren Einstufung in der Bundessortenliste zu finden ist. Mielke et al. (2000) und Wosnitza (2000) stellen eine hohe positive Korrelation ($r = 0,84-0,89$) zwischen Ährenbonitur und DON-Gehalten auf Hochbefallsstandorten fest. Gesicherte Aussagen zu Abhängigkeiten können allerdings nur bei wenig anfälligen (Stufe 2, 3) und hoch anfälligen Sorten (Stufe 6, 7) getroffen werden. Die Sorten mittlerer Ausprägung zeigen kein einheitliches Resistenzverhalten.

Durch Züchtungsfortschritt sind in der Sortenzulassung 2001-2002 kurzstrohige Sorten mit niedriger Befallseinstufung (Cubus, Enorm, Tommi) zugelassen und vereinen damit zwei gewünschte Sorteneigenschaften. Auch kombinieren die Sorten 'Centrum' und 'Hermann' hohen Ertrag und geringe Anfälligkeit für Ährenfusarien (Stufe 2) (Bartels & Rodemann, 2003; Rodemann, 2003).

Inwieweit die **Maissorte** in ihren Eigenschaften Lagerneigung bzw. Stängelfäule die Mykotoxingehalte im Winterweizen beeinflusst, ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Als Baustein einer Gesamtstrategie sind in dieser Richtung weitere Untersuchungen erforderlich (Dänicke & Oldenburg, 2000; El Titi, 2003; Mastel, 2004).

Bestandesführung – Einfluss von Düngung und Wachstumsreglereinsatz

Kann die Widerstandskraft der Pflanzen gegen Pilzbefall durch N-Düngung und Wachstumsreglereinsatz erhöht werden? Hohe Stickstoff- und Wasserversorgung regen zwar Wachstum an, führen aber zu weichem, krankheitsanfälligen Gewebe und erhöhen das Lagerrisiko (Klinghagen & Frahm, 2002; Ellner, 2006) – können also befallsfördernd in Bezug auf Ährenfusarium wirken. Sowohl überhöhte als auch zu niedrige Stickstoff-Versorgung kann einen Fusariumbefall begünstigen (Obst, 1988). In neueren Untersuchungen wiesen Oldenburg & Bramm (2004) keinen Einfluss der N-Düngung auf die DON-Gehalte der Ernteprodukte nach. Anders dagegen Heier et al. (2005), die bei überzogener N-Düngung einen Anstieg des Mykotoxin-Gehaltes feststellten.

Oerke et al. (2002) zeigen in Felderhebungen, dass eine höhere N-Düngung, Wachstumsreglereinsatz und Blattfungizide den Befall förderten – verursacht durch höhere Bestandesdichten, kurzstrohige Sorten, eine bessere Blattgesundheit und eine längere Abreife. In den Vergleichsvarianten mit geringerer Anbauintensität

und vielgliedriger Fruchtfolge, wie sie im **ökologischen Landbau** realisiert werden, wurde eine geringere Belastung des Weizens gemessen.

Auch andere Versuchsansteller beschreiben, dass ökologisch angebaute Weizen weniger Befall und geringere Kontamination mit Mykotoxinen zeigten als konventionell angebaute. Dies liegt in der aufgelockerten Fruchtfolge ohne Maisanbau und in der Bodenbearbeitung ausschließlich mit Pflug begründet (Schönbeck, 1979; Obst, 1988; Bahle & Leist, 1997; Dänicke & Oldenburg, 2000; Birzele et al., 2002; Klinghagen & Frahm, 2002; Oerke et al., 2002; Paulsen et al., 2004; Heier et al., 2005).

Fungizideinsatz in der Blüte

Sind alle pflanzenbaulichen Abwehrmaßnahmen realisiert, kann das Fungizid den Risikofaktor Witterung zusätzlich abschwächen und führt zu einer Reduzierung des DON-Gehaltes. Ist keinerlei Vorsorge erfolgt, stößt das Fungizid schnell an seine Grenzen. Bislang gibt es allerdings kaum Arbeiten, die die Interaktion zwischen Fungizidwirkungsgrad und produktionstechnischen Maßnahmen belegen (Obst & Gammel, 2000; von Kröcher, 2004). – Insgesamt ist der kurative Einsatz von Fungiziden sicherer als der protektive. 60 % Wirkungsgrad wurden bei einem Ausbringen ein bis zwei Tage vor der Sprühinokulation der Ähren bis vier Tage danach erreicht (Obst et al., 1992; Mielke & Weinert, 1996).

Unter den Fungiziden eignen sich Azole mit den Wirkstoffen Tebuconazol, Metconazol und neuerdings Prothioconazol und Spiroxamine mit einem etwas längeren Anwendungsfenster. Nach vorgezogener Fahrenblattbehandlung kann eine gezielte Blütenbehandlung erfolgen, wenn aufgrund des Witterungsverlaufs ein Infektionsschub rechtzeitig erkannt wird (Stemann, 2004). Azole hemmen das Myzelwachstum und reduzieren die DON-Gehalte. Dabei belegt Oldenburg et al. (1999), dass bei hohen DON-Kontaminationen der Fungizideinsatz zu 65 % Reduzierung, bei mittleren bis niedrigen DON-Gehalten zu 30-35 % Minderung führt. Tischner & Doleschel (2003) weisen Reduzierungen von 40-70 %, Oerke et al. (2002) von 50-60 % und Bartels & Rodemann (2003) bei künstlicher Infektion von annähernd 80 % und unter Praxisbedingungen >50 % nach. Nach Jahn (1994), Pontzen & Mauler-Machnik (1994), Oldenburg et al. (1999) und Matthies et al. (2000) können unter Praxisbedingungen die DON-Werte um >50 % gemindert werden.

Der Einsatz von Strobilurin-Wirkstoffen wie Azoxystrobin, Kresoxim-Methyl, Epoxiconozol und Fenpropimorph führen durch den Greeningeffekt zu einer verlängerten Blühdauer und können damit das Toxin-Risiko erhöhen (Lienemann et al., 2000; Obst & Gammel, 2000; Ellner, 2004; von Kröcher, 2004).

Witterung

Einen wesentlichen Einfluss auf Mykotoxin-Kontaminationen haben Witterungsfaktoren, in die allerdings nicht steuernd eingegriffen werden kann. Ein Fusarienbefall wird besonders durch Niederschlag und Temperatur zum Zeitpunkt der Blüte beeinflusst – dabei spielt nicht die Niederschlagsmenge, sondern der Zeitpunkt eine Rolle (Sutton, 1982).

Von den Fusariumarten dominiert unter diesen Bedingungen *Fusarium graminearum*. Ein hohes Infektionsrisiko besteht, wenn vom Ährenschieben bis Ende Blüte an einem Tag mindestens 5 mm Regen fallen und Tagesdurchschnittstemperaturen über 18°C registriert werden. Insgesamt sind Blattnässeperioden von ca. fünf Tagen mit Niederschlägen und warmfeuchte Abschnitte befallsfördernd. Für die weitere Ausbreitung auf der Ähre und die Toxinbildung im Korn ist die Witterung von Blüte bis Abreife entscheidend. So hat es in der Vergangenheit Jahre mit hohem Fusariumdruck gegeben wie 1987, 1991/93/98/99 und 2002. Durch den großen Einfluss der Witterung existiert nur eine unzureichende Prognosemöglichkeit, so dass ein hohes Maß an Vorsorge erforderlich ist (Beck et al., 1997; Obst & Bechtel, 2000; Klingenhagen & Frahm, 2002; Tischner & Doleschel, 2003).

Das Zusammenspiel von Einflussfaktoren auf die Mykotoxinbildung bei Getreide

Liegt nur einer der genannten Risikofaktoren vor, ist eine entspannte Befallssituation gegeben. Die unterschiedliche Kombination von Risikofaktoren, kann jedoch einen hohen Befallsdruck auslösen. Im Rahmen eines Fusarium-Monitorings in Bayern, einer Region mit viel Maisanbau, wurden in sieben Jahren annähernd 1.700 Weizenproben aus Praxisbetrieben, wie auch von Versuchsflächen auf Fusarienbesatz und DON-Gehalt untersucht. Da die unterschiedlichen Gruppierungen nicht normalverteilt sind, eignen sich für die statistische Analyse nur die Zentralwerte (= Mediane). Ungeachtet der Weizensorte, zeigte die Vorfrucht Mais eine extrem befallsfördernde Wirkung – dabei war das Toxinrisiko nach Körnermais

signifikant höher als nach Silomais. Einen geringen DON-Risikofaktor wiesen die Vorfrüchte Getreide, Raps, Kartoffeln, Zuckerrüben und Leguminosen auf (**Abb. 3**) (Beck & Lepschy, 2000). Das DON-Befallsrisiko im Weizen nach Maisvorfrucht ist nach nichtwendender Bodenbearbeitung um das 4- bis 5-fache höher als nach Pflugfurche. Bei allen anderen Vorfrüchten konnte kein Unterschied zwischen konventioneller und 'Konservierender Bodenbearbeitung' festgestellt werden.

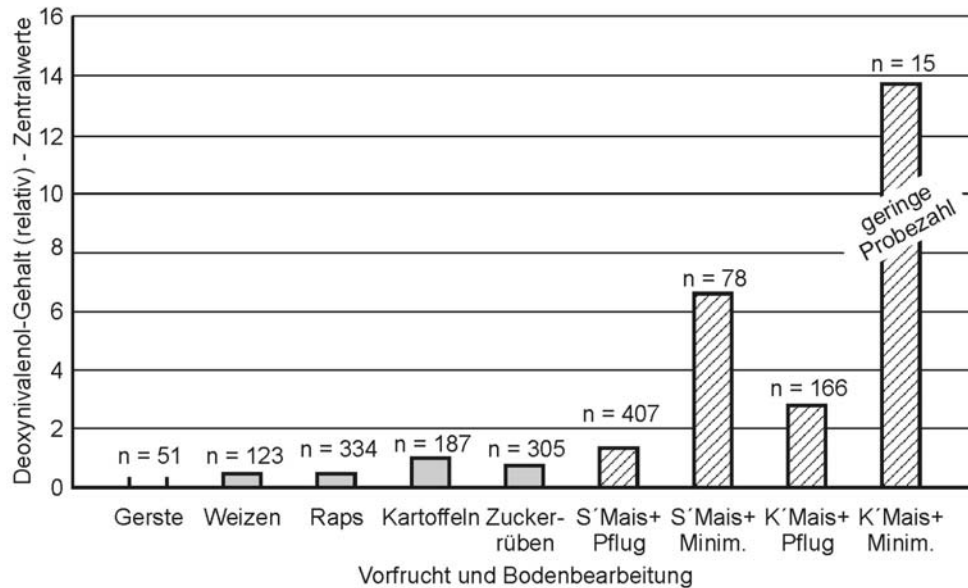


Abb. 3: DON-Gehalt von Winterweizen (Ernte 1993-1999) in Abhängigkeit von Vorfrucht und Bodenbearbeitung (nach Beck & Lepschy, 2000)

Aus über 3.200 Proben wurden mit einem mathematisch-statistischen Modell die Beiträge einzelner Risikofaktoren zum gesamten Toxinrisiko abgeleitet und eine Wichtung hinsichtlich Risikowahrscheinlichkeiten vorgenommen. Dabei werden bei einer Kumulierung von Risikofaktoren die Toxin-Gehalte multiplikativ erhöht:

- Vorfrucht Mais = 2,0-2,1,
- nichtwendende Bodenbearbeitung nach Mais = 3,8-4,0,
- anfällige Sorte = 1,4-1,9,
- infektionsfördernde Wirkung zur Weizenblüte = 2,1-2,7,
- Einsatz von Strobilurin-Präparaten wie Amistar, Juwel, Juwel Top = 2,1 (Bauer, 2000).

Ellner (2002) weist die Abhängigkeit von Vorfrucht, Bodenbearbeitung und Weizensorte nach und kommt zu dem Schluss, dass eine Kombination von Risikofaktoren wie Maisvorfrucht, nichtwendende Bodenbearbeitung, anfällige Weizensorte und

Niederschläge in der Blüte zu einem starken Anstieg der DON-Gehalte führt. Die Sorte wirkt reduzierend, kann jedoch durch andere Faktoren überlagert werden.

Schmidt & Nitzsche (2004) stellen den Sorteneinfluss im Verbund heraus. Gering anfällige Sorten sind nur dann Basis für eine Fusarium-Reduktion, wenn sie mit anderen befallsmindernden Maßnahmen kombiniert werden. Direktsaat nach Körnermais würde den positiven Beitrag einer Sorte kompensieren. Deshalb ist für nichtwendende Bodenbearbeitung nach Mais ein Nachhäckeln der Maisrückstände erforderlich, um sie "mundgerecht" einem schnellen Abbau durch Regenwürmer zuzuführen. Dies, kombiniert mit einer intensiven Einmischung und einer eventuellen Stickstoff-Düngung, fördert die Rottegeschwindigkeit und reduziert die DON-Gehalte erheblich. Nach Pflugfurche kommt es z. T. im 2. Jahr zu großem Infektionsrisiko.

Die Wechselwirkungen von Vorfrucht, Bodenbearbeitung, Sorte und Fungizideinsatz in einer Zuckerrüben-Weizen-Fruchtfolge auf Großflächen untersuchten Koch et al. (2004a) und Pringas (2005):

- Die DON-Konzentration einer hoch anfälligen Sorte war nach Vorfrucht Weizen sehr viel höher als nach Zuckerrüben.
- Nach Zuckerrüben bestand zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren Pflug, Mulchsaat und Direktsaat kein Unterschied.
- Nach Weizenvorfrucht führte die Mulchsaat zu einem tendenziell höheren und Direktsaat zu einem deutlich höheren Wert gegenüber Pflug.
- Bei Mulchsaat war der DON-Gehalt bei einer gering anfälligen Sorte nur tendenziell erhöht, bei einer anfälligen Sorte signifikant erhöht.
- Der Fungizideinsatz verminderte den DON-Gehalt nur bei Anbau einer hoch anfälligen Sorte signifikant.

Aufgrund der neuen Grenzwerte der EU gibt von Kröcher (2004) klare Sortenempfehlungen beim Vorliegen unterschiedlicher Risikofaktoren:

- Grundsätzlich sollten Sorten der Stufe 6 und 7 (BSA, 2005) nicht mehr zum Anbau kommen.
- Steht Mais als Vorfrucht oder wird Mulchsaat praktiziert, sollten Sorten mit Stufe 4 und geringer gewählt werden.
- Bei Direktsaat ist Stufe 3 und geringer auszuwählen.
- Bei Mais als Vorfrucht sollte keine Mulch-/Direktsaat praktiziert werden.

- Azolfungizide stoßen an ihre Grenzen, wenn Maisvorfrucht und Mulchsaat Weizen kombiniert werden – die DON-Gehalte liegen z. T. bei 10 mg/kg. Nur bei DON-Werten von <2 mg/kg kann mit Fungiziden vermarktungsfähige Ware erzeugt werden.

Bei der Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Mykotoxinbildung in ihren Wechselbeziehungen, ist eine pauschale Verknüpfung der pfluglosen Bodenbearbeitung mit dem Auftreten von Ährenfusariosen und daraus resultierender Belastung des Erntegutes durch Fusariumtoxine nicht zu belegen. Erst aus dem Zusammenreffen mehrerer Risikofaktoren kann ein erhöhter Befall durch Ährenfusariosen und damit eine zunehmende Mykotoxinbelastung des Erntegutes resultieren.

Da die Witterung als maßgeblicher Einflussfaktor nicht zu kalkulieren ist und eine gezielte Fungizidmaßnahme nur eine Reduzierung des DON-Gehaltes von 50-60 % erreichen kann, sind im Sinne der Vorsorge alle technischen, acker- und pflanzenbaulichen Präventivmaßnahmen auszuschöpfen (Mauler-Machnik, 2000; Tischner & Doleschel, 2003; Rodemann & Bartels, 2004; Stemann, 2004; Hirschfeld et al., 2005; Schnieder, 2005).

4 Integrierte Bewertung der eigenen Feldversuche – Hypothesen und Ergebnisse

'Konservierende Bodenbearbeitung' ist ein Lösungsansatz nachhaltiger Pflanzenproduktion. Vier Teilbereiche wurden in Feldversuchen untersucht:

- A. Bodenschonung** durch schonende Lockerung (Kapitel 4.1),
- B. Bodenschutz** – Mulchsaat als Oberflächenschutz (Kapitel 4.2),
- C. Gewässerschutz** – Minderung von Run off in Oberflächengewässer (Kapitel 4.3),
- D. Verbraucherschutz** – Vermeidungsstrategien zur Mykotoxinbildung im Getreide (Kapitel 4.4).

4.1 Bodenschonung durch schonende Lockerung

Das Thema Bodenschadverdichtung wird zurzeit hauptsächlich auf wissenschaftlicher und politischer Ebene diskutiert. Es stellt weniger eine Relevanz für den Praktiker dar, weil es an der Oberfläche nicht so offensichtlich wie Bodenerosion in Erscheinung tritt, und die negativen Auswirkungen, z. B. auf den Ertrag, nicht gleich zu spüren sind. Der Mit-/Ohne-Vergleich fehlt, so dass die Ertragsentwicklung ohne Befahrung nicht bekannt ist. Der Fortschritt in Züchtung und Produktionstechnik suggeriert ein ständiges Wachstum und überdeckt damit mögliche unerwünschte Nebeneffekte von Bodenschadverdichtungen. Dennoch gibt es Anzeichen, die auf eine Beeinträchtigung der Bodenfunktionen hinweisen (siehe Literaturübersicht Kapitel 3.1), so dass alle Anstrengungen unternommen werden müssen, eine optimale Vorsorgestrategie zu entwickeln.

4.1.1 Status quo zum Bodengefüge bei der Landbewirtschaftung

Obwohl die technische Entwicklung seit 1950 die Steigerung der Nahrungsmittelproduktion und die Erleichterung der Arbeitsbedingungen zum Ziel hatte, hat es parallel schon immer Aktivitäten gegeben, die Veränderung der Bodenstruktur infolge des Technikeinsatzes zu untersuchen.

These 1: Die technische Entwicklung in der Landwirtschaft hat zu einer Steigerung von Flächen- und Arbeitsproduktivität geführt mit der Sorge, den Boden in seinen wichtigen Funktionen möglicherweise zu schädigen.

Wie bei Sommer et al. (2002) beschrieben, hat Ruhm (1983) auf 144 Standorten in Südniedersachsen 1952 und 1982 die Veränderung der Bodendichte untersucht. Er stellte fest, dass das Porenvolumen in der Krume aufgrund geringeren Spuranteils und intensiverer Lockerung ansteigt. Andererseits lag die Schlepperadsohle (= Krumbasisverdichtung) 10 cm tiefer und das Porenvolumen um 3 Vol.-% dichter (siehe Abb. 4). Eine Folge von ungünstigen Bedingungen beim Pflügen, wie Radschlupf und Bodenfeuchte.

In jüngster Zeit untersuchten Koch et al. (2002) auf Ackerstandorten in Bayern und Südniedersachsen unter Güllefahrzeugen und Zuckerrübenrodern bodenphy-

sikalische Parameter, wie Lagerungsdichte, Luftkapazität, Luftpermeabilität und Eindringwiderstand. Durch die Befahrung mit Gesamtlasten bis zu 40 t entstanden deutliche Verdichtungserscheinungen in der Ackerkrume, allerdings wurden im Unterboden keine gravierenden Schäden festgestellt (Schäfer-Landefeld et al., 2004).

Ehlers et al. (2003), die 10 Profile im Umkreis von Göttingen untersuchten, stellten ausgeprägte Krumbasisverdichtungen mit zunehmender Tiefe fest. Als minimale Porenvolumina der Löss-Parabraunerden wurden 35,5 Vol.-% gemessen, aufgrund z.T. feuchter Bodenbedingungen bei der 6-reihigen absetzigen Zuckerrübenenernte und Bodenbearbeitung.

Von einem Belastungsversuch mit Radlader (6 Überrollungen mit je 5 t Radlast, 4 bar Reifeninnendruck, Bodenfeuchte bei Feldkapazität) werden Radlastbegrenzungen von 5 t abgeleitet (Mähner, 1999).

Gieska et al. (2003) untersuchten in der Hildesheimer Börde sieben Ackerstandorte hinsichtlich Aggregatstabilität und Unterbodenverdichtung mithilfe der Lagerungsdichte bezogen auf die Proktordichte. Demnach sind die untersuchten Böden mehr oder weniger flächenhaft verdichtet, und die Krumbasisverdichtung hat zugenommen.

Um auf einer breiten Informationsplattform die Daten zum Gefügestand diskutieren zu können, sollte mit eigenen Untersuchungen an jene von Ruhm nach nunmehr 50 bzw. 20 Jahren angeknüpft werden. Für eine flächenhafte Aussage zum Problembereich Bodenschadverdichtungen wurden nahezu 100 Profilgruben (4.400 Stechzylinder in vier Bodenschichten) in ganz Südniedersachsen untersucht. Da die Lagerungsdichte allein als Indikator zur Bewertung des Gefüges von Unterböden nicht ausreicht (Lebert et al., 2006), wurden Porengrößenverteilung, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Luftleitfähigkeit bei pF 1,8 und 2,5 hinzugezogen.

Da von Ruhm nur Werte für das Porenvolumen vorliegen, werden zunächst die Mittelwerte mit Standardabweichung in **Abb. 4** eingetragen. Die Krume ist heute noch geringfügig lockerer als 1982. Die Schlepperradsole ist vergleichbar mit 1952, allerdings deutlich lockerer als 1982.

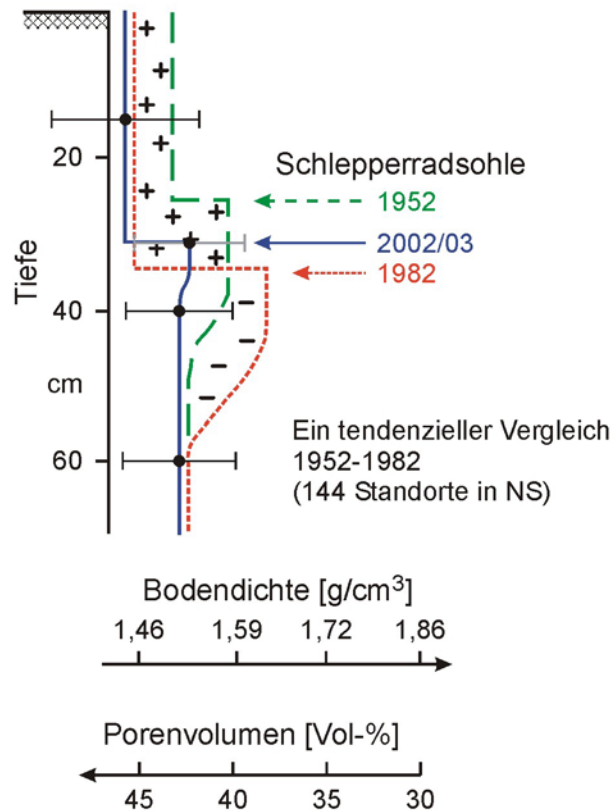


Abb. 4: Porenvolumen und Bodendichte als Funktion der Bodentiefe 1952 (---) und 1982 (...) nach Ruhm (1983) und nach Brunotte et al. (2005a) (—)

Zu berücksichtigen ist, dass Ruhm auch einige Sandstandorte mit untersucht hatte, die tendenziell in der Krumbasis etwas dichter lagern als die 2002 untersuchten Parabraunerden. Auch der Unterboden in 40 cm lagert weniger dicht, als 1952/1982. In 60 cm Tiefe hat es in den 50 Jahren keine Veränderung gegeben. Die Luftkapazität im Mittel aller Probennahmen liegt in der Krumbasis um 2,5 und im Unterboden um 3 Vol.-% höher als die Schadensschwelle von 5 Vol.-%. Mit diesen Werten lassen sich keine Unterbodenschadverdichtungen nachweisen.

Zur weiteren Beschreibung der Bodenfunktionen wird exemplarisch auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) zurückgegriffen (**Abb. 5**). Die Schlepperradsohle unterschreitet den Schwellenwert von 10 cm/d. Der Unterboden (40/60 cm) liegt über diesem Wert. Feuchte Bedingungen beim Pflügen (im Herbst 2001 → Untersuchung im Frühjahr 2002) haben eher niedrige Werte zur Folge. Die hier erstmalig vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Zunahme des Porenvolumens in der Ackerkrume für eine verbesserte bodenschonende Bestelltechnik steht. Die Gesamtmassen werden auf breite Reifen und Zwischenradpacker abgestützt.

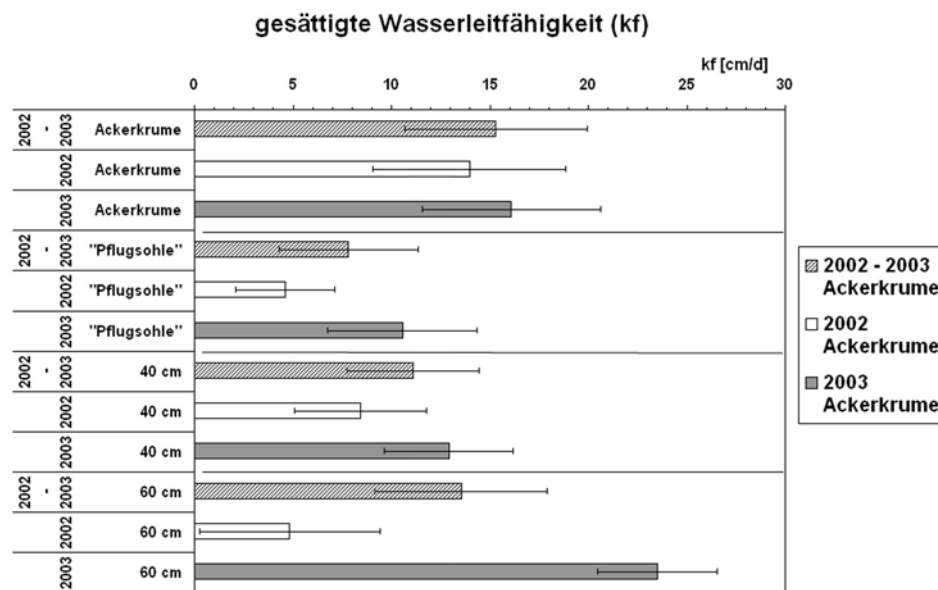


Abb. 5: Gesättigte Wasserleitfähigkeit der Staturerhebung "Bodenstruktur von Lössböden" in Südniedersachsen 2002 (Brunotte et al., 2005a)

Bis 1982 erfolgte im Sinne der Ertragssteigerung eine Krumenvertiefung mit dem Pflug, oft durchgeführt bei hohem Schlupf in der Furche. Bis 2002 wurde diese Krumenvertiefung aus Kostengründen leicht zurückgeführt und mit technischen Detailverbesserungen gekoppelt wie Radialreifen mit geringen Luftdrücken, Allradantrieb, Differentialsperre und Schlupfregelung. Hohe Schlagkraft ermöglichte zudem, bei günstigem Bodenzustand zu arbeiten. Auch half die Ausdehnung der Mulchsaat mit Zwischenfruchtanbau, die Krumenbasisverdichtungen abzubauen. Dort, wo noch kritische Werte auftreten, ist im Einzelfall die Funktionsfähigkeit im Sinne einer "gezielten Heterogenität" zu prüfen (Sommer, 1998b). Solange Krumenbasisverdichtungen die Bodenfunktionen nicht nachhaltig stören, verbessern sie die Tragfähigkeit der Böden (Tijink, 2003).

Ergänzt durch schonende Lockerung und den Einsatz bodenschonender Technik, war mit den dargestellten Untersuchungen keine Zunahme von Bodenschadverdichtungen im Unterboden nachzuweisen. Wenigen Extremwerten, die unter den Schadensschwellen liegen, muss im Einzelnen durch eine Betriebsanalyse nachgegangen werden. Die hier vorgestellte Bestandsaufnahme über die Verbreitung von Bodenschadverdichtungen im Ober- und Unterboden ist von entscheidender Bedeutung, da sie über die Brisanz des Themas entscheidet und darüber, ob "Gefahr in Verzug" ist oder Vorsorge durch ausgewogene Maßnahmen § 17 BBodSchG erfüllen kann.

Die Einschätzung über die Bedeutung des Themas ist in der wissenschaftlichen Landschaft sehr unterschiedlich. Eine flächendeckende Status-quo-Erhebung für Deutschland mithilfe von standardisierten Bodenuntersuchungen durchzuführen, ist vielen Wissenschaftlern ein zu hoher zeitlicher und finanzieller Aufwand. Vor diesem Hintergrund werden empirische Modellansätze zur Abschätzung der potenziellen Verdichtungsgefährdung herangezogen (Lebert et al., 2006). Die in diesen Konzepten ermittelten Richtwerte zum Schutz des Unterbodens zielen auf die maximal zulässige Belastung an der Bodenoberfläche ab (Konzepte Vorbelastung, Belastungsquotient und Schadverdichtungsgefährdungsklassen). Da z. B. geforderte maximal zulässige Radlasten im Feldversuch bisher nicht überprüft sind, stehen sie im Gegensatz zu den Auswirkungen heutiger hoher Radlasten auf den Bodengefügezustand.

Das Verlangen nach Richt- und Grenzwerten zur Kontrolle und Empfehlung von Maßnahmen steht außer Frage. Da es sich bei Bodenschadverdichtungen um ein sehr komplexes System handelt, sind die Parameter in ihrer Abhängigkeit sehr genau zu beschreiben und zu untersuchen. Dabei werden **ein** Parameter und **ein** Wert nicht zielführend sein (Lebert et al., 2006).

Die Wirkzusammenhänge von Bewertungsparametern sind bei Brunotte et al. (2005d) zusammengefasst: Bodenfunktionen, wie z. B. Wurzelwachstum oder Leitfähigkeitsfunktionen, sind beim Befahren zu schonen. Dies lässt einen bestimmten maximalen Bodendruck zu, der in der Kontaktfläche Reifen/Boden bzw. vom Reifeninnendruck nicht überschritten werden darf. Unter Verwendung bestimmter Reifen sind die maximal zulässigen Radlasten nach Reifentabelle automatisch begrenzt.

► Daraus leitet sich die **Schlussfolgerung für These 1** ab:

Das Problem Bodenschadverdichtungen ist sehr komplex und bedarf umfangreicher Untersuchungen in Feld und Labor. Auf landwirtschaftlichen Produktionsflächen sind bisher kaum gravierende Schadverdichtungen großflächig nachgewiesen. Allgemein festgelegte Grenzwerte werden der unterschiedlichen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden nicht gerecht.

4.1.2 Einfluss von Bodenbearbeitung und Befahrung auf morphologische und funktionale Bodeneigenschaften zur Beschreibung von Bodenschadverdichtungen

In der vorgestellten Statuserhebung hat durch die Zufallsstichprobe eine Vielzahl von Parametern wie Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, technische Ausrüstung der Maschinen und Managementfähigkeiten die Ergebnisse zum Bodengefüge beeinflusst. Durch Gruppenbildung können einzelne Einflussfaktoren weiter analysiert werden.

These 2: Der Landwirt greift mit der Bodenbearbeitung in das Bodengefüge ein und verändert damit die Porenstruktur und das Bodenleben. Dies hat Einfluss auf Ober- und Unterboden durch Veränderung von Lagerungsdichte und Bodenfunktionen.

Eine wesentliche Rolle für die Stabilität von Bodenstruktur spielt die Bodenbearbeitung. Selbst wenn neben der Ausweisung der Trockenrohdichte die Parameter zu Bodenfunktionen die Beurteilung des Strukturzustandes erleichtern, fehlen zur Identifikation von Kausalbeziehungen zwischen morphologischen und funktionalen Bodeneigenschaften Untersuchungen von Bodenkern-Proben mithilfe von Computertomographie und 3-D-Visualisation zu luftgefüllten Makroporen. Das Scannen von Bodenschichten hilft, Effekte von Bodenbearbeitungs-, Landnutzungs- und Managementsystemen deutlich herauszuarbeiten (Rogasik et al., 1994).

Der Landwirt greift mit der Auswahl des Bodenbearbeitungssystems, wie Pflug, Mulchsaat oder Direktsaat, unterschiedlich stark in das Bodengefüge ein und beeinflusst damit unterschiedlich stark den Strukturaufbau und das Bodenleben. Heisler et al. (1998) beschreiben die höheren Populationsdichten von Raubmilben, Collembolen und Regenwürmern nach 'Konservierender Bodenbearbeitung' im Vergleich zu Bodenbearbeitung mit Pflug. Bei gleichem oder höherem Niveau der Lagerungsdichte zeigt die Mulchsaat ein ausgeprägteres Makroporensystem mit deutlich höherer Kontinuität, Konnektivität und Tortuosität.

Die vertikal orientierten, gerichteten Grobporen spielen eine wichtige Rolle für den Wasser- und Gasaustausch, unabhängig von der Dichte der sie umgebenden

Bodenmatrix. Weiter erhöhen sie die Gefügestabilität, weil Strukturen gegenüber Druckbelastung umso stabiler sind, je ausgeprägter sie in Richtung der einwirkenden Belastungsimpulse ausgerichtet sind (Hartge & Sommer, 1980; Kirby & Blackwell, 1989; Blackwell et al., 1990; Ball & Robertson, 1994).

Für die biogenen Vertikalporen bis in 3 m Tiefe ist der *Lumbricus terrestris* verantwortlich, der hauptsächlich in den Mulchsaatvarianten gefunden wurde, da er auf Pflanzenrückstände an der Oberfläche als Nahrung angewiesen ist. Nur diese Art ist in der Lage, verdichtete Zonen, wie z. B. die Schlepperradsohle, zu durchstoßen und Unterbodenverdichtungen aufzulockern (Vetter & Lichtenstein, 1968).

Der *L. terrestris* kann als Tiefgräber bis ca. 1 bar Druck beim Durchporen der Bodenmatrix entwickeln (Keudel & Schrader, 1999). Flachgräber, wie der *Aporrectodea rosea*, erreichen sogar >2 bar bei der Durchporung des Bodens (McKenzie & Dexter, 1983a, b). Die Verdrängung des Bodens führt zu einer leichten Verdichtung der Gangwände – zusätzlich ausgekleidet mit einer "Kottapete" erhöht sich die Stabilität (Graff, 1983). Durch die hohe Infiltrationsleistung dieser Gänge wird nicht nur im Frühjahr Bodenerosion vermieden, sondern auch im Herbst eine schnelle Ableitung überschüssigen Wassers in den Untergrund gewährleistet. Dadurch wird ein Befahren bei geringeren Bodenfeuchten nahe der Oberfläche ermöglicht. Die Flachgräber sind weniger auf Nahrung an der Oberfläche angewiesen, kommen also auch vermehrt nach Pflugfurche vor und legen hauptsächlich horizontale Gänge an. In Verbindung mit diesem verdichtungsempfindlichen Gefüge werden diese Gänge leicht beim Befahren zusammengedrückt und verlieren ihre Funktionalität.

Um die Stabilität der von Regenwürmern durchporteten Bodenmatrix zu überprüfen, wurden aus dem Feld ungestörte Bodenmonolite nach Bearbeitung mit Pflug und Mulchsaat entnommen und im Labor kurzzeitig mit 1,25 und 2,5 bar belastet – ein Bodendruck, der heute von 6-reihigen Zuckerrüben-Vollerntern aufgebracht wird. Diese anwendungsorientierte Versuchsanstellung wurde im Vergleich zum Ödometertest (Belastungsdauer bis 23 Stunden zur Bestimmung der Vorbelastung) gewählt, um die Veränderung von Bodenstruktur unter praxisnahen Rahmenbedingungen hinsichtlich Bodendruck und Belastungsdauer zu analysieren.

Die Wirkung von Bodenverdichtung auf Regenwurm-Gangsysteme, ausgelöst durch Maschinenverkehr, beschreiben Jégou et al. (2001) und bestätigen die oben gemachte Aussage zu horizontalen und vertikalen Gangsystemen. Dabei hatte 2,5 bar Bodendruck insbesondere in der Oberkrume größere Verdichtungseffekte als der geringere Druck von 1,25 bar.

Brunotte et al., 2002 zeigt anhand einer 3-D-Visualisation sehr deutlich die Veränderung des Porensystems im Oberboden – wo Grundbodenbearbeitung reparierend einwirken kann – und den tragenden Effekt der Schlepperradsohle, die damit die Funktionalität des vertikal kontinuierlichen Makroporensystems ab ca. 28 cm Tiefe in den Unterboden erhält.

Wie stabil einzelne Makroporen sind, zeigen Untersuchungen am Vorgewende von Zuckerrübenflächen, wo hohe Radlast (11 t) mit hoher Überrollhäufigkeit (20-mal) gekoppelt sind und die höchste Form der Bodenbelastung darstellen (**Abb. 6**). Diese **eine** intakte Makropore auf 78,5 cm² sorgt für einen gewissen Wasser- und Gastransport in die Tiefe. Das bedeutet, dass das geringe Porenvolumen von 37 Vol.-% (Brunotte et al., 2002) kein alleiniges Indiz für eine Schadverdichtung ist und der weiteren Überprüfung bedarf, insbesondere vor dem Einleiten von aufwändigen Reparaturmaßnahmen (Lebert et al., 2006).

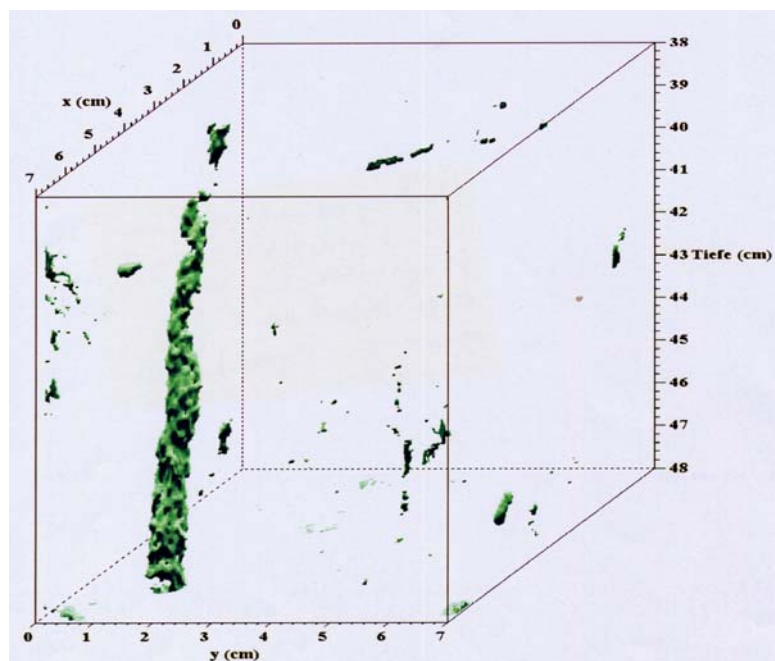


Abb. 6: Zuckerrüben-Vorgewende mit 2,5 bar Druckbelastung und 20-facher Überrollung: 3-D-Visualisation des Makroporensystems (Rogasik & Brunotte, 2000)

- Daraus leitet sich die **Schlussfolgerung für These 2** ab:
'Konservierende Bodenbearbeitung' mit dem Baustein fruchtfolgespezifisch schonende Lockerung schafft eine verbesserte Tragfähigkeit durch dichtere Lagerung in Ober- und Unterboden. Durch die Anlage biogener Vertikalporen mit hoher Kontinuität behält der Boden auch bei Belastung einen ausgewogenen Wasser- und Lufthaushalt. Zur Beschreibung des unterschiedlichen Strukturaufbaus eignet sich die Computertomographie mit daraus entwickelter 3-D-Visualisation.

4.1.3 Felduntersuchungen zur Überprüfung des Konzeptes 'Bodenschonendes Befahren': Auswirkung heutiger Agrartechnik auf bodenphysikalische Parameter

Zur umfassenden Beurteilung von Bodenschadverdichtungen durch Bodenbearbeitung und Fahrzeugparameter, ist neben

- der Statuserhebung Bodenstruktur und
- der Laboruntersuchung von Feldproben mithilfe von Computertomographie und 3-D-Visualisation auch
- die Felduntersuchung vor dem Hintergrund, inwieweit heutige Agrartechnik die Anforderungen nach "guter fachlichen Praxis" § 17 erfüllt (siehe auch Arvidson et al., 2000; Schäfer-Landefeld & Brandhuber, 2001; Koch et al., 2002; Weißbach & Isensee, 2000; Isensee et al., 2001; Diserens & Spiess, 2004)

erforderlich.

These 3: Das Konzept 'Bodenschonendes Befahren' verbindet bodenphysikalische, fahrzeugtechnische und arbeitswirtschaftliche Aspekte zur Schonung des Bodens.

Bei Brunotte et al. (2002a) ist das Konzept für '**Bodenschonendes Befahren**' mit seinen drei Bausteinen (1) Verbesserung der Belastbarkeit des Bodens, (2) Nutzung technischer Möglichkeiten und (3) Anpassung von Arbeitsverfahren beschrieben, das in der Literaturübersicht (Kapitel 3.1) mit einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen aufgeführt ist. Alle Handlungsempfehlungen haben das primäre Ziel, den **Bodendruck zu verringern (Abb. 7)**.

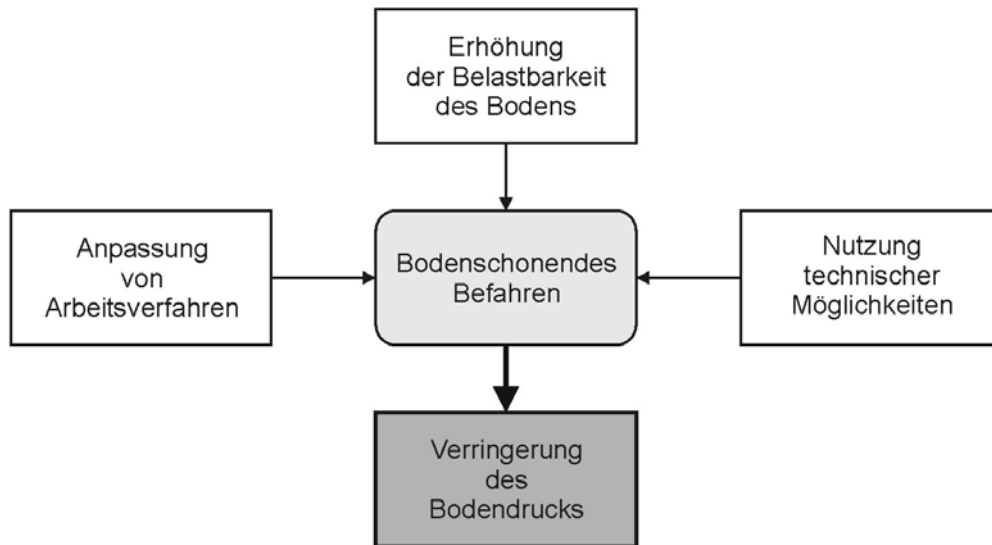


Abb. 7: Konzept 'Bodenschonendes Befahren' (Sommer, 1998a, geändert)

Die selbst durchgeführten Felduntersuchungen zeichnen sich durch die Befahrung des Bodens mit anwendungsorientierter Technik aus. Als Kontrolle dient die Variante "unbefahren", das bedeutet nach der Bestellung der Frucht "nicht wieder neu befahren", also keine Befahrung, auch nicht bei der Ernte. Neben den in der Literaturübersicht aufgeführten Belastungsversuchen (u. a. Mähner, 1999) bilden diese Versuche die Bedingungen der Praxis bestmöglich ab. Es sind technische, pflanzenbauliche und bodenschutzrelevante Parameter ausgewählt und untersucht worden.

Da bei der Bodenbelastung die Radlast und die Überrollhäufigkeit neben der Kontaktfläche eine wesentliche Rolle spielen, wird z. B. bei der Zuckerrübenenernte immer eine hohe Radlast (11 t) mit geringer Überrollhäufigkeit (6-Reiher, 1- bis 2-mal überrollt) und eine geringe Radlast (5 t) mit hoher Überrollhäufigkeit (2-Reiher, 6-mal überrollt) verglichen. So variieren Radlast, Überrollhäufigkeit, Kontaktflächendruck und Reifeninnendruck. Die Bodenparameter, wie Feuchte und Lagerungsdichte, sind gleich bzw. ändern sich nur beim Übergang vom Pflug zur Mulchsaat (siehe auch Spiess & Diserens, 2001; van der Veer et al., 2006).

Der aktuelle Bodendruck wurde in der Krume und im Unterboden mithilfe von Bolling-Sonden gemessen (Bolling & Söhne, 1982; Bolling, 1986). Da die Bodendruckmessung nur eine Momentaufnahme darstellt, kann von den Druckmessungen keine abschließende Bewertung über die Veränderung der Bodenfunktionen

erfolgen. Dafür sind aufwändige Messungen zum Wurzelwachstum, zum Ertrag und, neben Porenvolumen und Bodenwiderstand, zu Leitfähigkeitsfunktionen notwendig.

Bei Brunotte et al. (2000) sind erstmalig nach fünf Jahren die Ergebnisse zur guten fachlichen Praxis heutiger Landbewirtschaftung dargestellt. Die Bodendruckmessungen belegen die höhere Tragfähigkeit schonend gelockerter Böden, da unter 11 t mit 2-maliger Überrollung nur 0,3 bar in 40 cm Tiefe im Vergleich zu 0,8 bar beim Pflug ankommen. Auch wird die enge Korrelation vom Reifeninnendruck zum Bodendruck in 10 cm Tiefe deutlich.

Zur Bodenschonung wird heute vermehrt der Einsatz von Gummibandlaufwerken diskutiert. Bei diesen Laufwerken wird die Kontaktfläche in der Länge und nicht in der Breite ausgedehnt und tritt so bei der Abstützung hoher Lasten nicht mit der Straßenverkehrsordnung in Kollision. Untersuchungen unter einem Mähdrescher (**Abb. 8**) zeigen zunächst die enge Beziehung zwischen Reifeninnen- und Bodendruck in 10 cm und den geringeren Bodendruck unter der Raupe im Vergleich zum Reifen, allerdings mit vier Druckspitzen. Ob nun der geringere Bodendruck in 4-maliger Wiederholung oder der höhere Druck, der unter dem Reifen nur 1-mal auftritt, günstiger für die Bodenfunktionen ist, wird zur Zeit untersucht und wird entscheidenden Einfluss auf die Beurteilung von Bandlaufwerken haben.

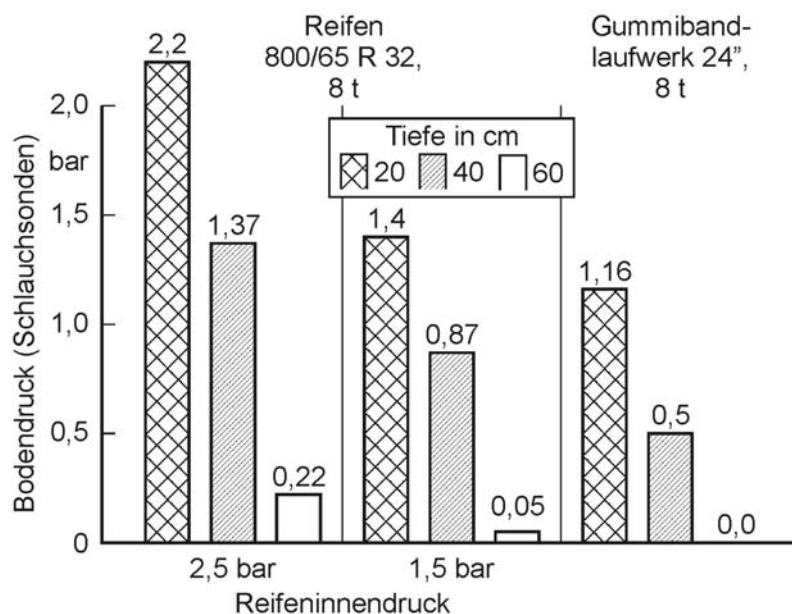


Abb. 8: Bodendruckmessung unter Mähdrescher-Reifen mit unterschiedlichem Reifeninnendruck und unter einem Bandlaufwerk (Brunotte et al., 2004)

Penetrologermessungen in 40 cm Tiefe nach Aberntung der Folgefrucht Weizen belegen den höheren Bodenwiderstand am Vorgewende und in der Fläche bei gefülltem Bunker des Zuckerrübenrodgers. Es ist kein Unterschied zum 2-Reiher ersichtlich, wohl aber zur leeren Maschine. Auch tritt beim Vergleich der Wurzelentwicklung bis in 60 cm Tiefe und des Weizenertrages zwischen hoher Radlast mit geringer Überrollhäufigkeit und geringer Radlast mit hoher Überrollhäufigkeit kein Unterschied auf (Brunotte et al., 2000).

Diese Ergebnisse zu den Auswirkungen unterschiedlicher Belastung bestätigen Untersuchungen von

- Rüdiger (1989), wo eine Überfahrt mit hoher Last günstiger zu beurteilen ist, als geringe Last mit hoher Überrollhäufigkeit – insbesondere wenn Paralleltransportfahrzeuge auf dem Acker erforderlich werden;
- Petelkau (1998), der feststellt, dass die Erhöhung der Überrollhäufigkeit (durch Reduzierung der Radlast) hinsichtlich Pflanzenwachstum genauso wirkt, wie die Erhöhung der Radlast;
- Weißbach (2003), der zeigt, dass Mehrfachüberrollungen bei hohen Luftdrücken mit jeder zusätzlichen Überfahrt bis in den Unterboden die Bodendrucke ansteigen und das Porenvolumen sinken lassen. Nur Reifeninnendrucke <1,5 bar mindern diese Effekte ab.

Zwischenfazit:

- *Die Auswirkungen vom Fahrverkehr auf die Produktionsfläche kann in zwei Richtungen beschrieben werden:*
 - *Der veränderte Gefügebau von Mulchsaat gegenüber Pflugfurche baut den Bodendruck schneller in die Tiefe ab und gewährleistet ungestörtes Wurzelwachstum und Ertragsaufbau.*
 - *Wird hohe Radlast reduziert und daraus folgernd die Überrollhäufigkeit gesteigert, wird die Belastungssituation für den Boden nicht günstiger.*

Neben der Betrachtung der Fläche müssen Fahrgassen und Vorgewende gesondert untersucht werden, da diese Bereiche weitaus höheren Belastungen ausgesetzt sind als die Produktionsfläche. Für das **Vorgewende** haben bereits CT-Untersuchungen (Abb. 6) auf eine mögliche Beeinträchtigung von Bodenfunktionen hingewiesen. Auch neuere Ergebnisse zu Messungen zur Regenwurmpopulation

(Abb. 9) und Leitfähigkeit deuten darauf hin. Allerdings hat die Ausgrabemethode zur Feststellung der Regenwürmer eher die Flachgräber berücksichtigt, da die Tiefgräber aufgrund von Erschütterungen bei der Bodenentnahme sich in tiefere Schichten zurückziehen. Durch die Befahrung mit 10 t ist es in der Fläche zu einer Minderung der Regenwurmdichten in der Pflug- und Mulchsaatparzelle gekommen, allerdings auf sehr unterschiedlichen Niveaus. Eine drastische Reduzierung der Population hat es auf dem Vorgewende gegeben.

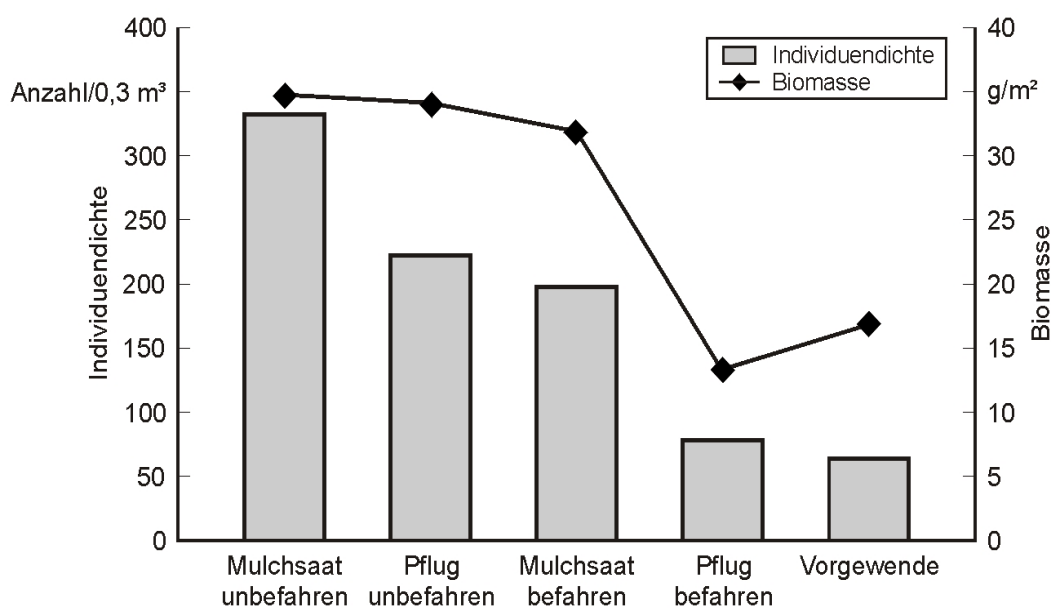


Abb. 9: Population von Regenwürmern nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung und vor/nach Befahren mit Zuckerrüben-Vollernter (nach Epperlein & Joschko, 2002)

Der Ertrag ist ein Parameter für die Produktionsfunktion und fasst alle das Pflanzenwachstum beeinflussenden Faktoren zusammen. **Tabelle 3** zeigt die Weizen-erträge in Direkt- und Nachwirkung von 1996-2004. Der Vergleich 2-/6-Reiher wurde nur die ersten fünf Jahre durchgeführt. Heute interessiert die Langzeitwirkung schwerer Erntetechnik. Im Mittel der untersuchten Jahre fällt das Vorgewende gegenüber der Fläche im Ertrag mit 5-29 % ab.

Betrachtet man in 2005 das Niveau der Stoppelweizenerträge auf den Schlägen, so sinkt der Ertrag des Vorgewendes gegenüber der Fläche um 8-17 %. Alles deutet darauf hin, dass am Vorgewende die größte Sorge hinsichtlich Bodenschadverdichtungen besteht – wenn auch nicht generell auf jedem Vorgewende. Eine sorgfältige Diagnose mit bodenphysikalischen Parametern und Spaten können am

ehesten Aufschluss geben (Lebert et al., 2006). Das Konzept für 'Bodenschonendes Befahren' ist hier in Richtung Gefahrenabwehr zu verfolgen. Auch sind alle technischen Entwicklungen, wie z. B. Integralschlegler am Zuckerrübenroder, zu nutzen, um das Zusammentreffen von hoher Radlast, hohem Reifeninnendruck und hoher Überrollhäufigkeit zu mindern.

Tab. 3: Auswirkungen von 2- und 6-reihigen Zuckerrüben-Erntesystemen auf den Ertrag der Folgefrucht 'Weizen' (Brunotte et al., 2002a, erweitert)

Schlag			unbefahren			2-reihig, 2-4 t, 6-fache Überrollung			6-reihig, 9-11 t, 1- bis 2-fache Überrollung			Vorge- wende
			Pflug	MSmL	MSoL	Pflug	MSmL	MSoL	Pflug	MSmL	MSoL	Pflug
1	Roden Rü-WW	1995 1996	114	115	110	98	98	97	98	100	101	—
2	Roden Rü-WW	1996 1997	101	103	103	103	106	102	101	101	99	96
3	Roden Rü-WW	1997 1998	—	—	—	98	96	102	100	101	102	—
1	Roden Rü-WW	1998 1999	121	—	—	117	—	—	118	117	—	86
2	Roden Rü-WW	1999 2000	—	116	—	110	100	109	107	106	105	92
3	Roden Rü-WW	2000 2001	—	—	—	—	—	—	105	—	107	94
3	Roden Rü-WW	2001 2002	—	71	—	—	—	—	76	78	77	71
3	Roden Rü-WW	2002 2003	—	92	—	—	—	—	103	90	94	95
3	Roden Rü-WW	2003 2004	—	109	—	—	—	—	111	109	106	78

Nach Ausführungen von Sonderhoff (1988), Schick (1991), Weißbach (1994), Wilde (1999) und Schwark (2005) gibt es im Gefügezustand deutliche Abstufungen zwischen Vorgewende, Fahrgasse und Fläche. Die Autoren schließen eine schleichende Ausbreitung der Vorgewendeverhältnisse auf die Produktionsfläche aus. Auch stellen Versuchsanstellungen, bei denen die Fläche jährlich mit der hohen Belastung eines beladenen 6-reihigen Köpfrödebunkers im späten Herbst beaufschlagt wird, eine Extremsituation für den Boden dar (Koch et al., 2004b). In der Praxis wird die Zuckerrübe aber maximal alle drei bis vier Jahre angebaut. Da der Boden so natürliche Regenerationsprozesse kaum entfalten kann, lassen sich aus dem entstandenen Gefügezustand konkrete Handlungsempfehlungen zur Vermeidung von Bodenschadverdichtungen nur bedingt ableiten.

Zwischenfazit:

- *Die Befahrung des Vorgewendes ist insbesondere bei der Ernte mit hohen Radlasten durch gefüllte Bunker und hohen Überrollhäufigkeiten beim Abbunkern gekennzeichnet. Dieses Zusammentreffen ungünstiger Belastungskonstellationen deutet auf eine Schädigung der Bodenfunktionen hin, die der konsequenten Umsetzung des Konzeptes 'Bodenschonendes Befahren' und ggf. der Gefahrenabwehr bedarf.*

Der zweite Bereich hoher mechanischer Belastungen sind die **Fahrgassen**. Grundlegende Arbeiten zum kontrollierten Fahrverkehr durch Fahrgassen, Regelspuren, Beetkultur und Gantry sind bei Brunotte & Sommer (1993) ausgeführt. Während bis Anfang der 90er Jahre der Trend vorherrschte, mit schmalen Reifen die Fläche für Fahrgassen und damit entgangenem Ertrag möglichst gering zu halten, forderten hohe Flächenleistung und das Abstützen höherer Radlasten eine komplette Neuorientierung bei Pflegemaßnahmen:

- In Hackfrüchten wurde auch bei weiten Reihenabständen eine Reihe ausgespart, die Getreidefahrgassen wurden von zwei auf z. T. fünf Reihen erweitert. Dadurch konnten 250 mm breite Pflegereifen durch Reifen bis 600 mm Breite ersetzt werden.
- In Verbindung mit einer Radlastreduzierung durch Anhängegeräte bei gleichzeitiger Erhöhung der Behältervolumina konnten die Reifeninnendrucke von früher 3 bar auf heute <1 bar gesenkt werden.

Inwieweit in breiten Fahrgassen linienhafter Erosion vorgebeugt werden kann, wird in Kapitel 4.2 "Bodenerosion" und bei Mosimann et al. (2005) beschrieben. Da die Arbeitsbreiten von ehemals 12-15 m auf heute 18-27 m angestiegen sind, wird nur noch sehr wenig Fläche ausgespart und den Randreihen der Fahrgassen durch geringere mechanische Belastung ein besseres Wachstum ermöglicht – es kommt zu keinen Ertragsausfällen auf der Fläche.

Inwieweit die Bodenfunktionen in den Fahrgassen erhalten bleiben, wird am Beispiel der Regenwurmaktivität des *L. terrestris* verdeutlicht, dargestellt in Regenwurmhaufen/m² (= über einem Regenwurmgang zusammengezogene Haufen von organischen Rückständen vermischt mit Regenwurmlösung). In der Fläche bestimmt, wie in Abb. 20 gezeigt, der Zerkleinerungsgrad die Aktivität.

In der Fahrgasse ist erwartungsgemäß die Aktivität aufgrund geringeren Nahrungsangebotes und erhöhter Lagerungsdichte geringer. Gab es in der Vergangenheit in Fahrgassen durch die Verwendung von Pflegereifen mit 3 bar Reifeninnendruck kaum Regenwurmaktivität, sind immerhin 2003 21 Regenwurmhaufen/m² (Fläche im Vergleich: 33/m²) und 2005 12 Regenwurmhaufen/m² (Fläche im Vergleich: 16/m²) gezählt. Ein Zeichen, dass der eingestellte Reifeninnendruck von <1 bar den Tiefgräbern mit ihren Bodenverdrängungsvermögen Bewegung in den Fahrgassen ermöglicht und damit andere Bodenfunktionen wie Wasser- und Lufttransport gewährleistet. Auch hier nimmt 'Konservierende Bodenbearbeitung' großen Einfluss, da der *L. terrestris* vornehmlich dort aktiv wird, wo Reststoffe an der Oberfläche vorhanden sind.

Beim Einsatz bodenschonender Fahrwerke bei Pflegemaßnahmen zeigt sich bei nachfolgender Grundbodenbearbeitung (wendend/nichtwendend) an der Oberfläche eine Bodenstruktur, die sich in einem ähnlichen Bröckelzustand darstellt, wie die Fläche. Daraus ist zu folgern, dass eine gesonderte mechanische Lockerung der Fahrgassen wie sie früher durchgeführt wurde, heute eingespart werden kann.

Zwischenfazit:

- *Fahrgassen mit Arbeitsbreiten >20 m und Platz für Reifen bis 600 mm Breite helfen, mit Anhängegeräten die Radlast und den Reifeninnendruck auf ein Niveau zu senken, dass Bodenfunktionen kaum beeinträchtigt werden.*

➤ Daraus leitet sich die **Schlussfolgerung für These 3** ab:

Schonende Lockerung ist die Grundvoraussetzung für 'Bodenschonendes Befahren' und sorgt für einen schnellen Bodendruckabbau in die Tiefe. Zusätzlich helfen breite Reifen mit geringen Reifeninnendrücken bzw. Gummibandlaufwerke, hohe Lasten abzustützen. Fahrgassen und Vorgewende sind durch hohe Überrollhäufigkeiten bei ungünstigen Bodenzuständen am ehesten einer Gefährdung von Bodenfunktionen ausgesetzt.

4.1.4 Befahrbarkeitssensor als Indikator für die Anpassung des Maschineneinsatzes an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden

Bei Lebert et al. (2006) wird der Bodengefügeschaden durch nutzungsbedingte Verdichtung im Unterboden anhand von Struktur, Herangehensweise und Bewertung dargestellt.

Konzepte zur Einschätzung der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit sind erforderlich, um einen Vorabhinweis über die Dringlichkeit und Ausgestaltung notwendiger Vorsorgemaßnahmen zur Verminderung von Bodenschadverdichtungen zu bekommen – Gefahrenabwehr ist möglichst zu vermeiden, um kostspielige Sanierungsmaßnahmen überflüssig zu machen. Diese Konzepte wie "Vorbelastung" (Horn & Fleige, 2001), "Belastungsquotient" (Werner & Paul, 1999) und "Schadverdichtungsgefährdungsklassen" (Petelkau et al., 2000) beruhen auf dem Vergleich von **Bodendruck und Druckbelastbarkeit** von Böden. Aus dieser Voreinschätzung der potenziellen Verdichtungsgefährdung, die sich im Wesentlichen aus Bodenart und Feuchte einer Region ergibt, hat eine Präzisierung der Vorsorgemaßnahmen im Sinne § 17 BBodSchG zu erfolgen, die sich aus der aktuellen Verdichtungsempfindlichkeit der Standorte ableitet (Diserens & Spiess, 2004).

Das Konzept für 'Bodenschonendes Befahren' gibt mit drei Strategien (Abb. 7) die Vielzahl der Handlungsempfehlungen vor, die alle dem Ziel dienen, die **Belastbarkeit des Bodens zu erhöhen** und den **Bodendruck zu verringern**. Sommer & Brunotte (2003) führen aus, wie der landwirtschaftliche Betrieb in Abhängigkeit von der Brisanz des Problems Bodenschadverdichtung die Maßnahmen umsetzen kann, um ein Höchstmaß an Vorsorge "Schonung von Bodenfunktionen" zu erreichen. So sind

- Techniken und Verfahren **heute im Betrieb** vorhanden, die sofort umgesetzt werden können,
- andere Maßnahmen im Rahmen von Fruchtfolge und Flurgestaltung **mittelfristig anwendbar** und
- zukünftige Entwicklungen oft durch Investitionen **langfristig zu realisieren** (KTBL, 1998).

Das Vorhandensein von Bodengefügeschäden bzw. die Erfolgskontrolle der Handlungsempfehlungen können mithilfe von bodenkundlichen Kriterien ermittelt werden. Aus **Tabelle 4** (Lebert et al., 2004) sind die drei Kriterien abzulesen, deren Schadensschwellen **alle** unterschritten sein müssen, damit von einem Gefügeschaden gesprochen werden kann. Die so angezeigte Beeinträchtigung von Bodenfunktionen reicht aber noch nicht aus, da die Erheblichkeit des Schadens und der Bezug zu anderen Schutzgütern, wie z. B. Gewässer, geklärt werden muss.

Tab. 4: Vollzugstaugliche Parameter zur Erkennung eines Bodengefügeschadens bindiger Böden und deren Schadensschwelle (Lebert et al., 2004)

Parameter	Schadensschwelle
• Luftkapazität	5 Vol.-%
• gesättigte Wasserleitfähigkeit	10 cm·d ⁻¹
• Feldgefügeansprache alternativ durch – effektive Lagerungsdichte – Packungsdichte – Spatendiagnose	Stufen 4 und 5

Eine zusätzliche Sachstandsermittlung vor Ort wäre erforderlich. Aufgrund einer zeitlich und finanziell aufwändigen bodenphysikalischen Analyse kann sich dies immer nur vor dem Hintergrund von Gefahrenabwehr und Sanierung auf den Einzelfall beziehen. Diese Vorgehensweise ist jedoch für den großflächigen Einsatz und zur Kontrolle von Handlungsempfehlungen nicht geeignet. Hier können nur Bewertung und Kontrolle der aktuellen Befahrbarkeit eine Lösung sein. Während der Befahrung muss der Maschinenführer eine Rückkopplung über mögliche Schäden erhalten, um den Verfahrensablauf ggf. ändern zu können. Ein Kriterium für die Befahrbarkeit ist die **Spurtiefe**, als sichtbarer Ausdruck 'Bodenschonenden Befahrens' an der Bodenoberfläche.

Ein eigens entwickelter Laser bzw. Ultraschall gestützter Spurtiefensensor wird in Arbeiten von Brunotte et al. (2000), Lebert et al. (2006) und Sommer & Brunotte (2003) vorgestellt, der in der Fahrerkabine die Spurtiefe in situ zur Anzeige bringt. Die Online-Messung der Spurtiefe fasst sowohl

- Bodenparameter wie Lagerungsdichte, Bodenfeuchte, Humusgehalt, Aggregation als auch

- technische Einflussfaktoren wie Reifenbauart und -dimension, Reifeninnendruck, Radlast, Kontaktfläche, Schlupf, Überrollhäufigkeit, Geschwindigkeit und Schwingungen
zusammen.

These 4: Die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden bestimmt die Auswahl von Handlungsempfehlungen aus dem Maßnahmenkatalog für 'Bodenschonendes Befahren'. Die aufwändige Untersuchung von bodenphysikalischen Parametern ist bestenfalls zur Validierung von Indikatoren, nicht aber zur Erfolgskontrolle von Vorsorgemaßnahmen geeignet. Ein Befahrbarkeitssensor zur Anzeige der aktuellen Verdichtungsempfindlichkeit ist für ein flexibles Einsatzmanagement erforderlich.

Die Verformung des Bodens unter Last wird an der Bodenoberfläche durch die Ausbildung einer Fahrspur sichtbar. Die Spurtiefe zeigt eine Bodensetzung an, ohne die Setzungsanteile von Ober- und Unterboden zu differenzieren. Bei der Messung wird der Anteil der Reifenabplattung neuerdings mithilfe eines Ultraschallsensors im Reifeninneren durch Differenzbildung eliminiert. Um Aussagen über eventuelle Schädigung des Unterbodens machen zu können, sollte ursprünglich mit einem Modell nach Jaklinski (Jasinski & Lebert, 2003) die Druckausbreitung im Boden modelliert werden. Der Einfluss der Schlepperradsole auf die Druckausbreitung ist jedoch schwer im Modellierungsansatz zu berücksichtigen, und die Beziehung zwischen Bodendruck und bodenphysikalischen Parametern ist nicht eindeutig.

Aus dem Bestreben, die Fortsetzung der vertikalen Bodenbewegung/Bodenverformung von der Oberfläche in die Tiefe zu verfolgen, entstand die grundlegende Idee zur In-situ-Messung der Bodensetzung (Danfors, 1974; Arvidsson et al., 2001). Dabei wird die vertikale Bewegung von im Boden eingebrachten Körpern über Seilzüge auf elektromechanische Positionssensoren übertragen. Aufgrund des großen Aufwandes beim Einrichten der Messstelle im Unterboden und der Anfälligkeit der mechanischen Komponenten, wurden von Nolting et al. (2005) ein neues Verfahren zur **hydrostatischen Setzungsmessung (HSM)** entwickelt. Es beruht auf dem Prinzip der Schlauchwaage mit Drucksensor an dem einen Schlauchende und Sonde zur Messung des Höhenunterschieds am anderen Ende.

Mit diesem Messprinzip kann ein direkter Bezug zwischen Spurtiefe und vertikaler Bodenverformung (= Setzung) in unterschiedlichen Tiefen hergestellt werden.

Abbildungen 10 und **11** zeigen für eine Parabraunerde bei einer Mehrfachüberrollung mit 4,1 t und einem variierten Reifeninnendruck von 0,8 und 2,1 bar den Verlauf von Bodendruck und Setzung in 40 cm Tiefe an.

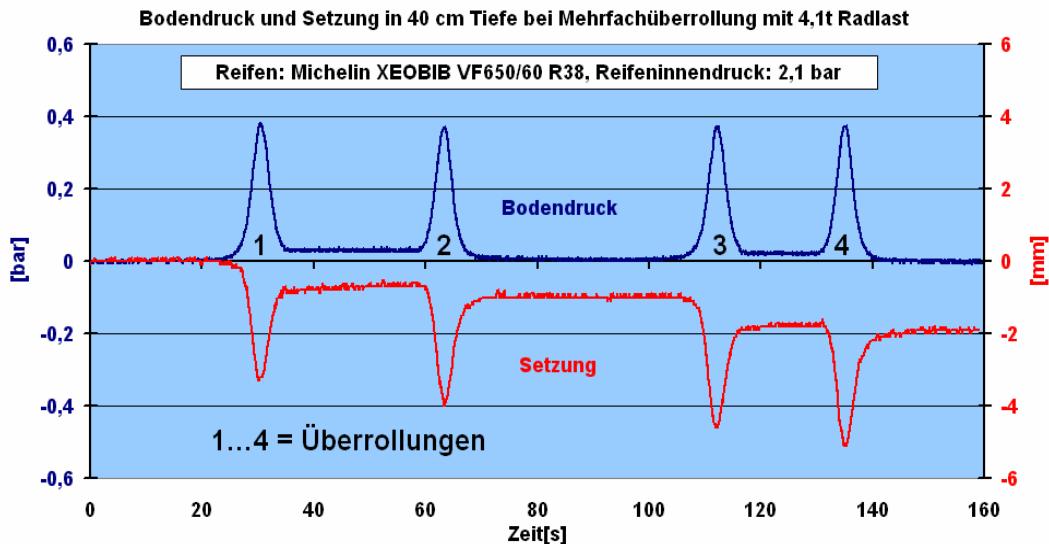


Abb. 10: Bodendruck und Setzung mit 2,1 bar Reifeninnendruck (Nolting et al., 2005)

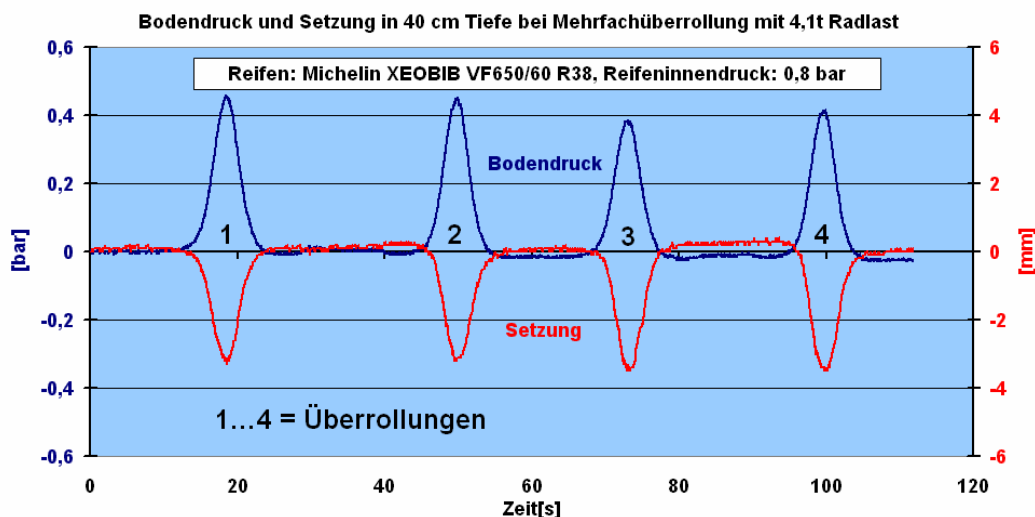


Abb. 11: Bodendruck und Setzung mit 0,8 bar Reifeninnendruck (Nolting et al., 2005)

Während der Bodendruck hier nahezu identisch ist und nach der Befahrung auf 0 zurückgeht, zeigt die Setzung unterschiedliche Kurvenverläufe. Bei 0,8 bar findet nur eine elastische Verformung im Moment der Überrollung statt, bei 2,1 bar bleibt

eine plastische Verformung mit einer Gesamtsetzung von 2 mm in der Hauptbewegungsrichtung der Bodenpartikel zurück – das macht den Einfluss von Reifenindendruck auf die Bodenschonung deutlich. In beiden Belastungsvarianten ist der elastische Anteil der Setzung mit je 3,5 mm gleich.

Die Validierung von Spurtiefe und Setzung erfolgt zurzeit mithilfe bodenphysikalischer Parameter, um die Veränderung der Bodenfunktionen im Unterboden bei Belastung quantifizieren zu können. Für den späteren Praxiseinsatz soll eine mobile HSM-Technik geschaffen werden, die an repräsentativen Stellen im Acker installiert, über Funk dem Maschinenpersonal die Bodensetzung im Unterboden meldet, und die mit der aktuell angezeigten Spurtiefe in der Kabine abgeglichen wird. Damit wird die oberflächlich gemessene Spurtiefe zu einem Indikator, der gleichzeitig die Reaktion des Unterbodens mitliefert.

Wird diese Sensortechnik mit einem DGPS-Signal gekoppelt, gelingt eine schlagbezogene Online-Spurtiefenkartierung, die langfristig Hinweise über die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden geben kann. **Abb. 12** zeigt in der linken Hälfte in Fahrtrichtung bei annähernd gefülltem Bunker parallele Streifen von 100-120 mm und andere mit 70-90 mm Spurtiefe. Demnach gelingt es, mit dem beschriebenen Befahrbarkeitssensor sowohl die Befahrbarkeit während des Maschineneinsatzes abzufragen als auch ganze Schläge und Regionen hinsichtlich ihrer Verdichtungsgefährdung zu kartieren.

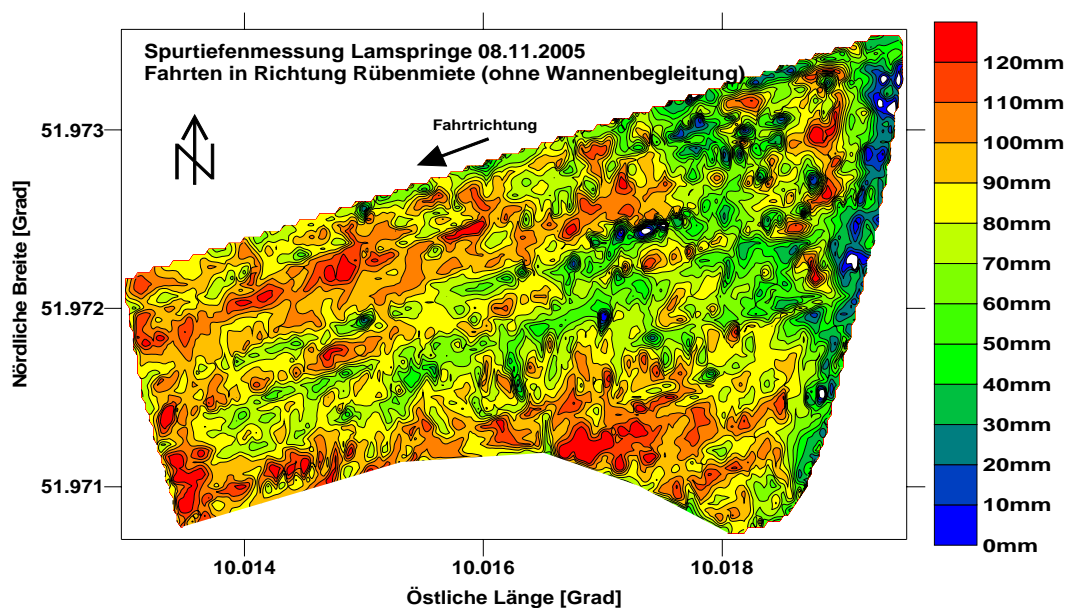


Abb. 12: Spurtiefenverteilung beim Rübenroden (Nolting et al., 2005)

In einer EU-Arbeitsgruppe ist ein Entscheidungsschema für den flexiblen Maschineneinsatz entstanden und vom VDI weiterentwickelt worden (**Abb. 13**). Ergänzend werden neuerdings Angaben zur potenziellen Verdichtungsanfälligkeit niedersächsischer Ackerböden anhand von Bodendauerbeobachtungsflächen von Lebert & Schäfer (2005) gemacht. Zusammen mit der aktuellen Bodenfeuchte entstehen Klassen der **Bodentragfähigkeit**, die bei der Befahrung durch die **Spurtiefe** angezeigt werden. Diesen vier Klassen werden vier Stufen des Reifennindrucks <2 bar landwirtschaftlicher Radialreifen zugeordnet und in Bereiche mit "akzeptablem Risiko" bzw. "nicht akzeptablem Risiko" unterteilt.

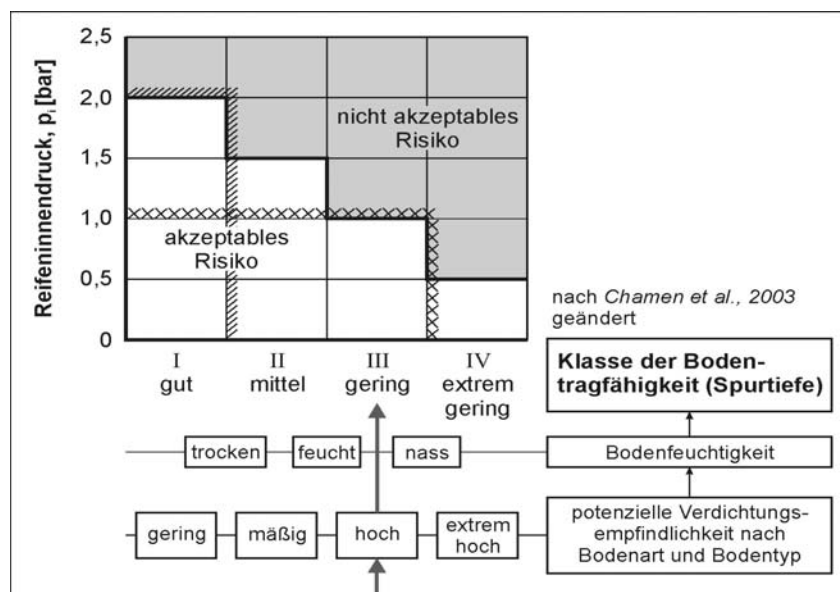


Abb. 13: Schema für die Abhängigkeit des Reifennindrucks von der Bodentragfähigkeit (VDI-Richtlinie 6101, 2006)

Ein **flexibles Einsatzmanagement**, das sich nach dem aktuellen Verdichtungsrisiko von Böden ausrichtet, wird durch die Einstufung der Bodentragfähigkeitsklasse in die Risikostufe erreicht. Die Flexibilität beim Maschineneinsatz ist z. B. mit der Investition in Regelungstechnik und Schlagkraft zu erreichen:

- Würde der eingestellte Reifenninnendruck nur ein Befahren mit "nicht akzeptablem Risiko" zulassen, ist mit einer Reifendruckregelanlage der Luftdruck soweit abzusenken, dass ein Befahren wieder im "akzeptablen Bereich" erfolgen könnte. Dies begrenzt nach Reifentabelle automatisch die max. zulässige Radlast. Der Maschinenführer, z. B. eines Zuckerrüben-Vollernters, könnte darauf reagieren, indem der Bunker nur halb gefüllt und an beiden Feldenden abgebunkert wird. Solche Regelanlagen sind allerdings für großvolumige Erntereifen erst noch zu entwickeln (siehe auch Spiess & Diserens, 2001).

- Zukünftig kann der Reifeninnendruck als Regelgröße durch die Reifenabplattung abgelöst werden. Sie kann nicht nur mittels Ultraschallsensor im Reifeninnern leicht gemessen werden, sondern bildet auch eine Konstante für Betriebssicherheit und Lebensdauer von Reifen. Wird die Reifenabplattung unabhängig von Untergrund, Geschwindigkeit und Last konstant gehalten, kann ein bisher ungenutztes Potenzial zur Maximierung der Kontaktfläche zur Anwendung kommen. Damit würden sowohl Kontaktflächendruck und Bodenbelastung minimiert als auch stets die maximale Bodenschonung erreicht werden.
- Ist die Bodentragfähigkeit nach hohen Niederschlagsmengen gering, könnte das Einsatzmanagement eine Rodepause anordnen. Das bedeutet für eine Erntemaschine eine Auslastung der maximalen Kampagneleistung von nur ca. 85 %. Dieser konkrete Beitrag zur Vorsorge wird bei der Zuckerrübenenernte vom Landwirt mit ca. 15 €/ha bezahlt.

Das vorgestellte Konzept "**Reifeninnendruck/Reifenabplattung kontrollierte Bodenbelastung**" ist ein Beispiel für ein intelligentes Managementsystem, das sich an der aktuellen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden orientiert, ein Höchstmaß an Vorsorge gewährleistet und die Rentabilität der Verfahren sicherstellt. Der Landwirt ist in diesem Konzept mit seiner Eigenverantwortlichkeit für seine Produktionsgrundlage Boden voll einbezogen.

Alternative starre Konzepte (siehe Brunotte et al., 2005d), wie "Radlastbegrenzung nach der Vorbelastung" (ATV-DVWK, 2002) oder "degressiv Kontaktflächendruck bezogene Radlast" (Schröder & Schneider, 2005), berücksichtigen nur den "worst case" und können auf unterschiedliche Verdichtungsempfindlichkeiten von Böden nicht reagieren. Völlig trockene Bedingungen würden solch restriktive Grenzwerte nicht fordern, aber zu einem in jeder Weise unrentablen Wirtschaften führen.

Zur Dokumentation der Belastungssituation von Ackerschlägen unter einer bestimmten Frucht bzw. Fruchtfolge kann stattdessen eine Summenhäufigkeitskurve der Spurflächenanteile von Belastungsparametern erstellt werden:

- Radlast bezogener Spurflächenanteil,
- Kontaktflächendruck bezogener Spurflächenanteil oder
- Reifeninnendruck bezogener Spurflächenanteil (**Abb. 14**).

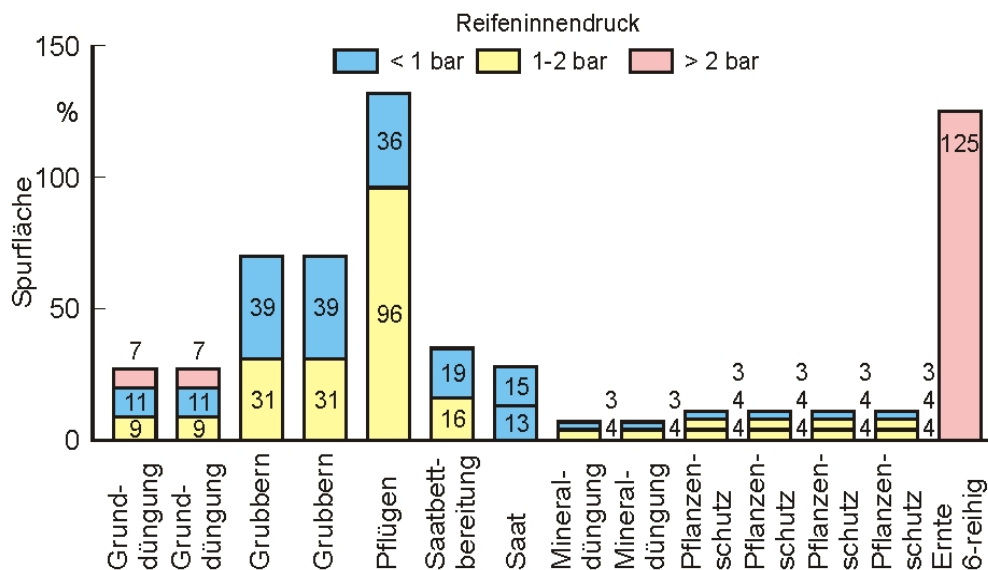


Abb. 14: Auf den Reifeninnendruck bezogener Spurflächenanteil eines 100-ha-Marktfruchtbetriebes am Beispiel Zuckerrübenanbau (KTBL, 2006)

Zur Beschreibung der Belastungssituation eines Schlages, den Spurflächenanteil bezogen auf Radlast und Kontaktflächendruck anzugeben, ist aufgrund des hohen Messaufwandes problematisch. Mithilfe des leicht zu bestimmenden Reifeninnendrucks bzw. der Reifenabplattung kann die Belastung **Reifeninnendruck bezogen auf Flächenanteil** sehr präzise angegeben werden und liefert eine gute Grundlage zur Beurteilung der aktuellen Druckbelastung von Ackerflächen.

► Daraus leitet sich die **Schlussfolgerung für These 4** ab:

Die Online-Messung von Spurtiefe, Reifenabplattung und Bodensetzung kann die Grundlage für ein intelligentes Managementsystem sein, das sich an die heterogene Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerschlägen anpasst und im Sinne der Vorsorge die Schädigung von Bodenfunktionen bestmöglich mindert. Dies macht aufwändige bodenphysikalische Untersuchungen zur kontinuierlichen Erfolgskontrolle von Vorsorgemaßnahmen entbehrlich.

4.2 Bodenschutz – Mulchsaat als Oberflächenschutz

Die Einführung der 'Konservierenden Bodenbearbeitung' erfolgte in der Vergangenheit über die Etablierung der Zwischenfrucht zu Reihenfrüchten. Der mechanisch krumentiefen Lockerung, in der Regel mit Pflug, folgte die Stabilisierung des Bodengefüges mithilfe von Zwischenfruchtwurzeln. Im Frühjahr wurde je nach

Witterungsbedingungen die Mulchsaat mit/ohne Saatbettbereitung praktiziert. Bislang fehlt jedoch ein Bodenbearbeitungskonzept über die gesamte Fruchtfolge, dass auch die Strohrückstände als schlagspezifischen Bodenschutz, die standort-spezifische Lockerungstiefe und die Kostenstruktur mit einbezieht.

Vor diesem Hintergrund einer ganzheitlichen Betrachtung verwendet die vorliegende Arbeit die Definition der Mulchsaat mit/ohne Lockerung und belegt mit anwendungsorientierten Feld- und Demonstrationsversuchen den sachgerechten Umgang mit Strohrückständen hinsichtlich Verteilung, Einarbeitung, Bodenbedeckung, Strukturaufbau, Ertrags- und Kostenentwicklung.

Das Ausmaß von Oberflächenabfluss und Bodenerosion wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst (**Abb. 15**). Dabei sind die Faktoren "Bodenart", "Hangcharakteristik" und "Niederschlagsintensität" für einen Standort vorgegeben und können vom Bewirtschafter nicht beeinflusst werden. Diese Faktoren beschreiben die potenzielle Erosionsgefährdung und sind in digitalen Karten abgebildet – in Zukunft nach den Feldblockrastern für die Direktzahlungen der EU (Schäfer, 2005). Der Landwirt kann durch die Gestaltung von vier Faktoren das Ausmaß von Verschlammung, Oberflächenabfluss und Bodenerosion beeinflussen: Fruchtfolge und Kulturart, Bodenbearbeitung und Aussaat, Fahrzeugparameter sowie Betriebsmanagement.

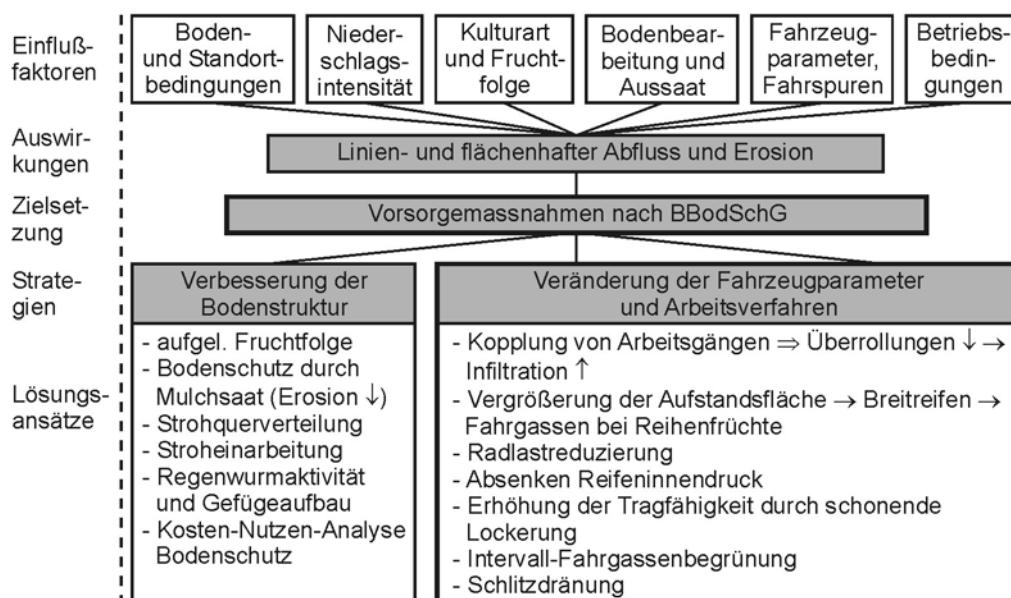


Abb. 15: Problembereich Oberflächenabfluss und Bodenerosion (Brunotte, 2003)

Die Auswahl der Maßnahmen hat sich nach dem primären Interesse des Landwirts, seine Produktionsgrundlage *Boden* zu erhalten, und nach den Anforderungen des BBodSchG, die Bodenfunktionen zu schützen, zu richten. Dabei wird ein Höchstmaß an Vorsorge durch die Kopplung von Lösungsansätzen erreicht, das sich in zwei Strategien – auf sie wird nachfolgend eingegangen – zusammenfassen lässt:

- I. Verbesserung der Bodenstruktur und
- II. Veränderung der Fahrzeugparameter und Arbeitsverfahren.

4.2.1 Verbesserung der Bodenstruktur

- a) Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz durch Mulchsaatverfahren
- b) Strohquerverteilung und Verfahrenstechnik der Stroheinarbeitung
- c) Regenwurmaktivität und Gefügebraufbau
- d) Kosten-Nutzen-Analyse Bodenschutz durch Mulchsaat

a) **Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz durch Mulchsaatverfahren**

Aus der Literaturstudie zu Bodenerosion (Kapitel 3.2) und Bodenstruktur leitet sich folgende Hypothese ab, die mithilfe von Studien zu belegen ist:

These 5: Mulchsaat mit/ohne Lockerung (MSmL/MSoL)

- erfüllt die acker- und pflanzenbaulichen Anforderungen durch eine gleichmäßige Verteilung und Einarbeitung der Reststoffe zum Strukturaufbau und zur Verrottung,
- erfüllt die Anforderungen des Bodenschutzes durch eine standortspezifische Bodenbedeckung zum Verschlammungsschutz und zur Erosionsminderung und
- verlangt eine Kosten-Nutzen-Analyse bei zusätzlicher Risikominderung durch Zwischenfruchtanbau.

Die potenzielle Erosionsgefährdung auf Feldblöcke bezogen (Beispiel Niedersachsen, Schäfer, 2005), ist die Grundlage für die Einschätzung der schlagspezifischen Erosionsgefährdung, die nach dem Erosionsschlüssel (Mosimann et al., 2004) durchgeführt wird. Die Klassifizierung der Erosionsgefährdung erfolgt unter Be-

rücksichtigung der Gründigkeit in "vier Gefährdungstufen der Bodenfruchtbarkeit", **Abb. 16:**

- 0 = Bodenfruchtbarkeit nicht gefährdet,
- 1 = Bodenfruchtbarkeit kurzfristig nicht gefährdet → Schutzmaßnahmen empfehlenswert,
- 2 = Bodenfruchtbarkeit gefährdet → Schutzmaßnahmen notwendig,
- 3 = Bodenfruchtbarkeit stark gefährdet → Schutzmaßnahmen sehr dringlich.

Die Gefährdungstufe bestimmt die Dringlichkeit und den Grad der Schutzmaßnahme. Ist die Bodenfruchtbarkeit stark gefährdet, sind hohe Bedeckungsgrade durch organische Rückstände herzustellen. Hier bieten unterschiedliche Mulchsaatverfahren die Lösung.

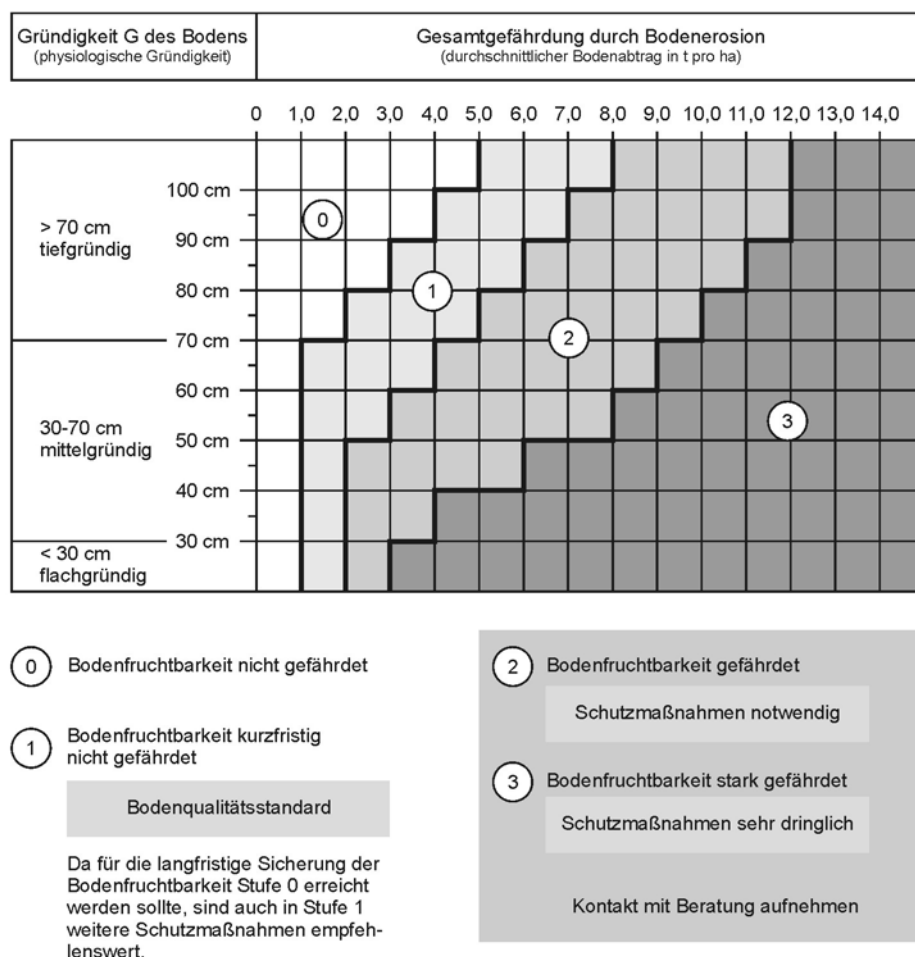


Abb. 16: Gefährdungstufen der Bodenfruchtbarkeit (Mosimann et al., 2004; Schäfer, 2005)

Untersuchungen zeigen, dass mit steigendem Bedeckungsgrad das Ausmaß von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag gesenkt werden (Roth, 1992; Brunotte & Sommer, 1996). Der Bedeckungsgrad stellt damit den "**Schlüsselindikator**" für

die Beschreibung der aktuellen Erosionsgefährdung eines Standortes dar. Am Beispiel der stark erosionsgefährdeten Frucht Zuckerrübe wird der Maßnahmenkatalog entwickelt, den der Landwirt als Verfahrensstrategie auswählen kann. Bei starker Gefährdung sind z. B. Bedeckungsgrade von >50 % erforderlich. Bei der Einführung 'Konservierender Bodenbearbeitung' in die Praxis wurden diese 50 % in der Regel nach einer trockenen Sommerpflugfurche mit anschließender Zwischenfruchtaussaat von Phacelia oder Senf erreicht (**Abb. 17**).

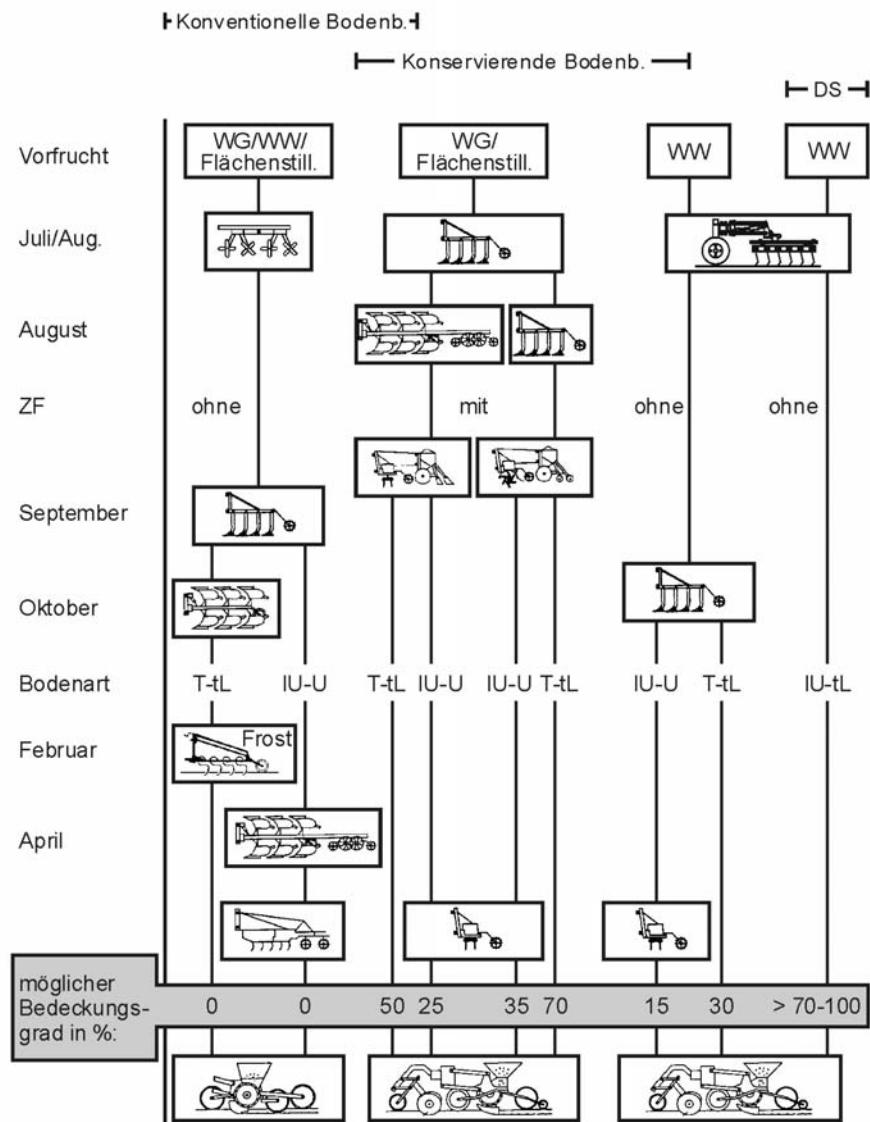


Abb. 17: Geräteinsatz bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Brunotte & Sommer, 1996)

Um diesen Bedeckungsgrad auch im Frühjahr nach der Aussaat von Reihenfrüchten (Zuckerrüben, Mais, Kartoffeln) zur Zeit erosiver Niederschläge zu erreichen, muss auf die Saatbettbereitung verzichtet und eine Mulchsaat ohne Saatbettbe-

reitung (MSoS) durchgeführt werden. Fordert ein kalter Lehmstandort eine Saattbettbereitung (MSmS), so reduziert sich der Bedeckungsgrad um 50 %. Die Gestaltung von Verfahrensabläufen zur Erstellung eines Bedeckungsgrades mit deren positiven Auswirkungen ist bei Brunotte & Duttmann (2001) und Duttmann & Brunotte (2002) ausführlich behandelt. Um die Maßnahmen zur schlagspezifischen Vorsorge gegen Bodenerosion zu überprüfen, ist eine gut zu handhabende Kontrolle erforderlich. Als **Methoden** stehen zur Auswahl:

- Teilflächen können mit digitaler Kamera aufgenommen werden. Anschließend wird über computergestützte Bildauswertung der Bedeckungsgrad dargestellt.
- Die Bestimmung des Bedeckungsgrades kann auch mit einer Zählmethode erfolgen, wo eine Schnur diagonal zur Särichtung ausgelegt wird. Kreuzungspunkte von Markierung und Stängel werden gezählt und geben den prozentualen Bedeckungsgrad an (Brunotte et al., 1999).
- Auch hilft ein Fächer mit Aufnahmen von Bedeckungsgraden in 10er-Schritten. Der visuelle Vergleich mit dem Bedeckungsgrad auf der Fläche bringt das Ergebnis. Diese Methode wird zurzeit entwickelt und steht für eine aktuelle, schnelle Einschätzung der Bedeckung zur Verfügung (**Abb. 18** und Brunotte & Ortmeier, 2005).

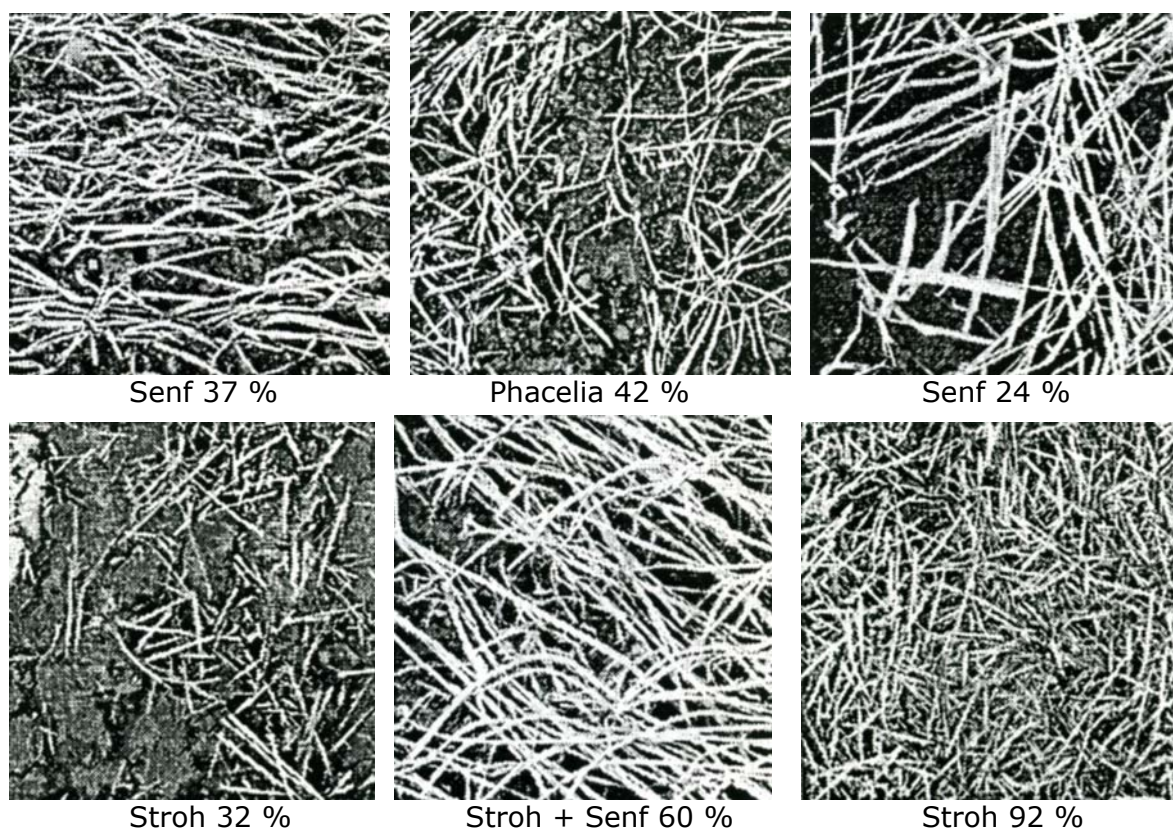


Abb. 18: Bodenbedeckungsgrade in % (Brunotte et al., 1998)

Ergebnisse aus aktuellen Messungen zu Zuckerrüben und die Bedeutung des Bodenbedeckungsgrades als Schlüsselindikator zur Beschreibung der aktuellen Erosionsgefährdung sind bei Brunotte et al. (1999) vertieft behandelt.

Der Bedeckungsgrad ist indirekt Grundlage der 1. Phase der Cross Compliance, die seit dem 01.01.2005 im Rahmen der Reform der Agrarpolitik eingehalten werden muss, um die Direktzahlungen der EU zu bekommen. Zurzeit müssen 40 % der Ackerfläche von November bis Februar bedeckt sein, um Erosion vorzubeugen. Zukünftig ist der Bedeckungsgrad in der 2. Phase der Cross Compliance ab 2009 an die schlagspezifische potenzielle Erosionsgefährdung anzupassen. Eine hohe potenzielle Gefährdung kann mithilfe von Direktsaat gemindert werden. Welche Anforderungen bei Direktsaat an das Strohmanagement gestellt werden (Linke, 1998) und mit welcher technischen Ausstattung es gelingt, einen Zuckerrübenbestand zu etablieren, beschreiben Brunotte & Wollenweber (2004).

Aus den Untersuchungen zur **Direktsaat von Zuckerrüben** ist folgendes **Zwischenfazit** zu ziehen:

- *Je weniger Eingriff in den Boden durch Bodenbearbeitung erfolgt, umso exakter ist das Stroh in Längs- und Querrichtung zu verteilen.*
- *Je mehr organische Rückstände an der Oberfläche liegen, umso mehr müssen reißende oder räumende Schare die Saat ablegen, um Kapillaranschluss und ausreichenden Feldaufgang zu gewährleisten.*

Für den Betriebsleiter gibt es in der Regel drei Beweggründe, auf die Aussaat von Zwischenfrüchten zu verzichten und allein die Rückstände der Vorfrucht für den Bodenschutz zu nutzen:

- (1) Spätäumende Vorfrüchte wie Winterweizen in Spätdruschgebieten erlauben keine rechtzeitige Aussaat von Zwischenfrüchten. Enge Fruchtfolgen bedeuten enge Zeitfenster.
- (2) Die entstehenden Kosten bei der Zwischenfruchtaussaat finden sich nicht unbedingt kurzfristig in verbessertem Ertrag und Qualität wieder. Eine langfristige Betrachtung und die Berücksichtigung von Bodenschutzeffekten in einer Kosten-Nutzen-Analyse erfolgt in der Regel nicht, ist aber notwendig.
- (3) Strohmulchverfahren helfen Kosten sparen, da Arbeitsgänge eingespart werden und Arbeitsspitzen gebrochen werden.

Zwischenfazit:

- *Oberflächenverschlämmung und -abfluss als erosionsauslösende Prozesse lassen sich wirkungsvoll durch organische Rückstände an der Bodenoberfläche vermeiden, da sie die hohe Energie der Regentropfen aufnehmen und die Bodenaggregate schützen. Der **Bodenbedeckungsgrad** ist der Schlüsselindikator, der die aktuelle Erosionsanfälligkeit beschreibt. Die Gefährdungstufe eines Ackers verlangt ein bestimmtes Schutzniveau, das mithilfe von Rückständen aus Vor- und/oder Zwischenfrüchten im Rahmen der standortangepassten Bewirtschaftung vom Landwirt eingestellt werden muss.*

b) Strohquerverteilung und Verfahrenstechnik der Stroheinarbeitung

Da bei der Nutzung von Stroh als Oberflächenschutz eine mehrmalige Bearbeitung, die die Verteilung und Verdünnung des Strohs in der Krume bewirkt, zu entfallen hat, ist bei der Ernte bereits auf eine gleichmäßige Verteilung zu achten. Damit wird der Mähdrescher in der Verfahrenskette "Strohmanagement" zum ersten und wichtigsten Arbeitsschritt. Die Strohverteilung wird quer zur Fahrtrichtung gemessen, indem Stroh und Kaff aus Ringen mit definiertem Durchmesser mittels Staubsauger entnommen werden. Durch die anschließende Siebanalyse im Labor kann eine Aussage über die Wurfweite unterschiedlicher Häcksellängen getroffen werden.

Die Qualität der Strohquerverteilung wird mit dem Variationskoeffizienten (VK) als Standardabweichung in Prozent des Mittelwertes bewertet. Man hat so ein relatives Streuungsmaß, das von der Größe der Einzelwerte unabhängig ist. Schlecht verteiltes Stroh (z. B. VK >50 %) kann durch diagonales Fahren mit einem Strohstriegel nur 40-60 cm und mit einem mehrbalkigen Grubber nur 10-30 cm mitgezogen werden. Dies reicht in der Regel nicht aus, um Konzentrationen von 200 % mittig hinter dem Mähdrescher über 2-3 m Entfernung in den Seitenbereich zu transportieren. Messungen haben gezeigt, dass der VK ab einer Arbeitsbreite von mehr als 6 m auf Werte bis zu 86 % ansteigen kann. Brunotte et al. (2003) zeigen die Problematik und Lösungsmöglichkeiten zur Strohquerverteilung näher auf.

Zur Optimierung der Strohquerverteilung wurde aus einer kombinierten **Feld-/ Labormethode**, die u. a. Aufschluss über die Verteilung der einzelnen Strohlängen gibt, eine gut zu handhabende Feldmethode abgeleitet. Nur so kann Beratung

und Praxis vor Ort eine Optimierung der Häcksler am Mähdrescher vornehmen. Da das bloße Auge nicht unterscheiden kann, ob 0,5 oder 1,5 kg/m² Stroh auf der Fläche liegen, ist eine Feldmethode entwickelt worden, die zurzeit in die Praxis eingeführt wird (Voßhenrich et al., 2003). Über mehrere Arbeitsbreiten wird mit einer Gartenharke mit langen, weit auseinander stehenden Zinken ein Schwad aus gehäckseltem Stroh und Spreu hergestellt. Das Volumen dieses Schwads spiegelt die Gleichmäßigkeit der Strohquerverteilung sehr gut wider. Oft sind die Eintrittsöffnungen der mittleren Strohleitbleche zu eng bzw. die Frequenz des Pendelauswurfes nicht an die Arbeitsbreite angepasst. Durch "trial and error" kann in der Regel mit drei Einstellungen die optimale gefunden werden, die eine Strohquerverteilung mit einem VK von <20 % erzielt. Der VK von 20 % ist die anzustrebende Zielgröße für die Strohquerverteilung von Mähdreschern.

Inwieweit herkömmliche Häcksler noch verbessert werden können oder Neuentwicklungen, wie Schneckenhäcksler mit zwei gegenläufigen Rotoren (Lücke et al., 2004), zukünftig adaptiert werden müssen, werden zukünftige Untersuchungen zeigen. Gelingt die gleichmäßige Strohverteilung aufgrund von ungünstigen Rahmenbedingungen (Einstellmöglichkeiten bzw. Leistung des Häckslers nicht ausreichend, Mähen von grünem/feuchtem Stroh) mit dem Mähdrescher nicht, bleibt nur noch der Einsatz des Strohstriegels. Er kann zu einer Verbesserung des VK von 15-20 % führen (Brunotte & Wagner, 2000).

Nach einer gleichmäßigen Strohverteilung an der Oberfläche ist das Stroh, je nach Zielsetzung gleichmäßig in die Krume einzuarbeiten. Dabei werden Intensität und Tiefe der Bearbeitung von dem Zeitfenster bis zur kommenden Frucht bestimmt. Ein enges Fenster liegt vor, wenn Winterraps pfluglos nach Winterweizen folgt, ein weites, wenn Sommerungen nach Winterweizen folgen.

Grundsätzlich gibt es vier Möglichkeiten für die **Stroheinarbeitung (Abb. 19)**:

1. Erfolgt Direktsaat, muss eine Trennung von Stroh und Samen mithilfe von reißenden Scharen stattfinden, damit Aufgangsprobleme nicht entstehen (Voßhenrich, 1995; Linke, 1998).
2. Oberflächennahes Einarbeiten, das heißt Mulchsaat ohne Lockerung, ist ohne Risiko nur möglich bei Stroherträgen <50 dt/ha und vor Sommerungen – ein Verfahren für trockenere Gebiete, wie z. B. in den Neuen Bundesländern im Regenschatten des Harzes. Da jedes Kilogramm Stroh 3-5 l Wasser aufnimmt, stünden bei z. B. 100 dt/ha Stroh 3-5 mm Niederschlag der Keimung nicht zur

Verfügung. Dies kann auf Hohertragsstandorten zu Aufgangsproblemen führen (Voßhenrich, 1995).

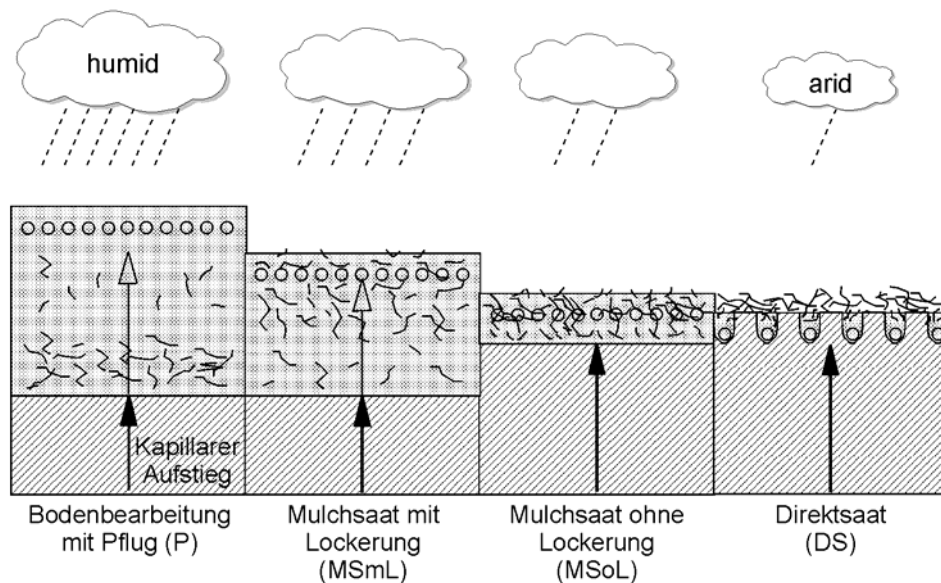


Abb. 19: Bodenbearbeitungsverfahren in Abhängigkeit von Klima, Strohverteilung und Saatguteinbettung (Brunotte et al., 2003)

3. Bei Stroherträgen bis 120 dt/ha und engen Zeitfenstern bis zur Neubestellung ist die Mulchsaat mit Lockerung zu wählen, damit das Stroh für eine schnelle Rotte in der gesamten Krume verteilt wird. Um mit diesem "Verdünnungseffekt" eine schnelle Verrottung und einen sicheren Feldaufgang zu erreichen, sind für 10 dt/ha Stroh 1,5-2 cm Einarbeitungstiefe vorzusehen. Allerdings bewegt jeder Zentimeter tieferes Arbeiten 150 t/ha Boden mit steigendem Bedarf an Zugkraft und Kraftstoff.
4. Für den Einsatz des Pfluges ist das Stroh gleichmäßig in die Krume einzumischen, damit "Strohmatte" verhindert werden, die das Wurzelwachstum behindern können.

Die Einarbeitungsqualität des Strohs in der Krume wird mit einer "**Gitterrastermethode**" untersucht. Ein ca. 25 cm tiefes Profil wird rechtwinklig zur Mähdruschrichtung aufgegraben bzw. aufgesägt (Voßhenrich et al., 2003; Wiesenhof et al., 2004) und die Anteile des Strohs in den einzelnen Rastern von 5x5 cm geschätzt. So erhält man über die Tiefe und Breite ein Verteilmuster des Strohs. Durch Aufaddieren aller Messwerte errechnet sich der **Strohindex** als Maß für die Strohquerverteilung von Mähdruschern und die Einarbeitungsqualität von Stoppelbearbeitungsgeräten (Voßhenrich & Brunotte, 2004; Voßhenrich et al., 2005).

Nach den vorgegebenen Zielen und Anforderungen richten sich der Einsatz der Verfahrenskette und die Auswahl der Gerätetechnik. Kurzscheibeneggen, Flügelschargrubber, Flachgrubber, mehrbalkiger Schwergrubber und Grubber-Scheibeneggen-Kombinationen stehen für den Einsatz zur Stoppel- und Grundbodenbearbeitung zur Verfügung. Zur Verfahrensoptimierung hat sich bei einer Anspannung von z. B. 125 kW für den ersten flachen Stoppelbearbeitungsgang eine Kurzscheibenegge mit 5 m Arbeitsbreite und für den zweiten tieferen Stoppelbearbeitungsgang ein 4-balkiger Grubber mit 3 m Arbeitsbreite und Doppelherz- bzw. Wendelscharen bewährt. Die Kurzscheibenegge ermöglicht eine hohe Schlagkraft unmittelbar nach der Ernte in einer arbeitsreichen Zeit bei nur halbem Kraftstoffverbrauch.

Der zeitlich und in der Tiefe gestaffelte Grubberarbeitsgang verbindet Bodenlockerung mit Strohverdünnung in der Krume. Beide Spezialgeräte erfüllen die Anforderungen an Flächenleistung, Arbeitsqualität und Kraftstoffverbrauch. Soll auf den Betrieben nur ein Universalgerät eingesetzt werden, kommt eine Grubber-Scheibeneggen-Kombination mit Scharwechselsystemen in Frage. – Die detaillierte Versuchsanstellung mit entsprechenden Verfahrensketten und Messparametern beschreiben Brunotte et al. (2003).

Zwischenfazit:

- *Um das standortspezifische Schutzniveau zur Erosionsminderung zu erreichen, spielt die gleichmäßige Verteilung an der Oberfläche und die gleichmäßige Einarbeitung des Strohs in die Krume eine entscheidende Rolle. Zur Beurteilung der Arbeitsqualitäten stehen heute geeignete Feldmethoden zur Verfügung. Die Auswahl des Bodenbearbeitungsverfahrens, die exakte Einstellung der Technik und die Durchführung der Maßnahme bei optimalem Bodenzustand sind für die Schaffung des geforderten standortspezifischen Bedeckungsgrades von entscheidender Bedeutung.*

c) Regenwurmaktivität und Gefügebau

Organische Rückstände aus Vor- und/oder Zwischenfrüchten an der Bodenoberfläche erfüllen vor dem Hintergrund von Bodenschutz grundsätzlich drei Anforderungen:

1. Sie schützen direkt die Bodenoberfläche vor heftigen Gewitterregen und mindern Verschlammung, Oberflächenabfluss und Bodenerosion,

2. sie stellen die Nahrungsgrundlage für das Bodenleben, insbesondere für die Regenwürmer dar, und fördern damit ihre Aktivität und

3. sie fördern den Aufbau von Dauerhumus durch die Einmischung in den Boden.

So führen Pflanzenrückstände an der Oberfläche, das Wurzelwerk von Zwischenfrüchten und die zunehmende Regenwurmaktivität zu einer **Verbesserung der Bodenstruktur** mit gesteigerter Wasseraufnahmefähigkeit und verbesserter Stabilität der Krume. Reststoffe, die bei 'Konservierender Bodenbearbeitung' an der Oberfläche verbleiben, steigern die Regenwurmaktivität gegenüber Bearbeitung mit Pflug auf das 3- bis 4-fache (Joschko et al., 1997). Dies kommt u. a. der Forderung aus dem BBodSchG nach, die biologische Aktivität zu fördern. Bei einer neu entwickelten **Methode** wird die Aktivität der Regenwürmer durch die an der Oberfläche befindlichen Strohhaufen bonitiert. Dabei beeinflusst nicht ausschließlich die Höhe des Bedeckungsgrades die Aktivität, sondern auch der Zerkleinerungsgrad der Stängel (**Abb. 20**).

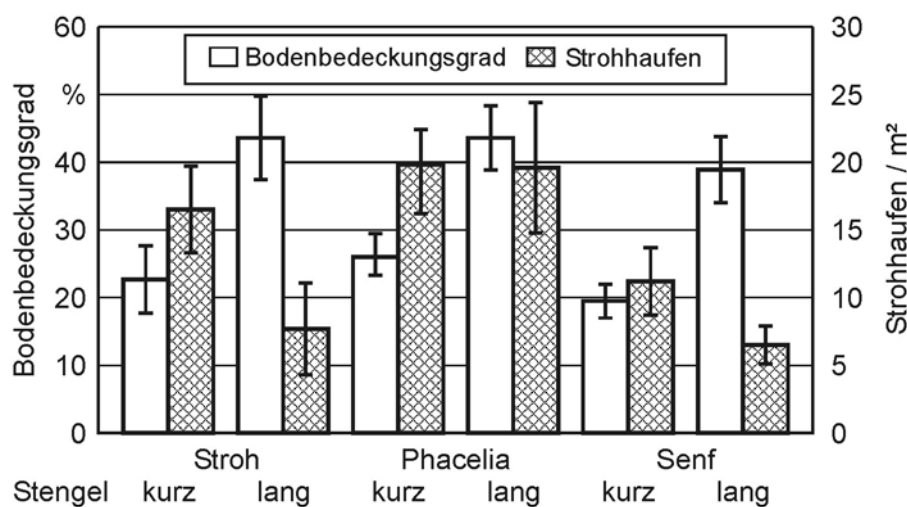


Abb. 20: Regenwurmaktivität (Strohhaufen/m²) in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad (%) 2002 (Brunotte et al., 2002b)

Lange, sperrige Stängel sind am kostengünstigsten herzustellen (Mähdrescherhäcksler ohne Gegenschneide, Verzicht auf Sekundärbodenbearbeitung) und verbessern den Bremseffekt für Wasser und Boden. Kurze Stängel dagegen fördern die Aktivität der Regenwürmer und schaffen mehr biogene Vertikalporen. So können bereits 50 intakte Regenwurmröhren/m² eine Abflussminderung von 35 % hervorrufen (**Abb. 21**). Die Röhren sind durch das herein gezogene Material vor Verschlammung geschützt. Auf diesem Weg werden bis zu 50 dt·ha⁻¹·a⁻¹ Reststoffe von den Würmern in den Boden eingearbeitet.

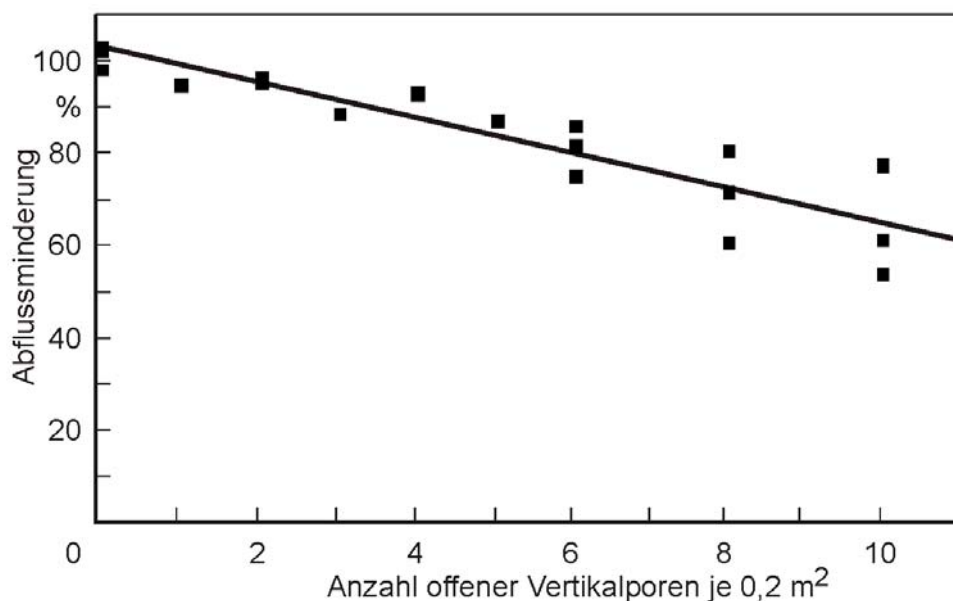


Abb. 21: Abflussminderung in Abhängigkeit von biogenen Vertikalporen (Roth & Joschko, 1991)

Aufwändige Infiltrationsmessungen mit Farbtracern belegen (Hangen et al., 2002), dass 'Konservierende Bodenbearbeitung' gegenüber dem Pflugeinsatz weit- aus mehr und tiefer reichende Makroporen aufweist. Angelegt werden diese Gänge hauptsächlich durch den tiefgrabenden Regenwurm *Lumbricus terrestris*. Selbst wenn diese Gänge nur mit 2-4 % am Gesamtporenvolumen (Ehlers, 1975) beteiligt sind, fördern sie durch ihre hohe Kontinuität entschieden den Luft- und Wasserhaushalt des Bodens. Sie reichen oft durch verdichtete Kompartimente (Krumenbasisverdichtungen) hindurch und stellen die Verbindung mit dem Unterboden her (Sommer, 1998b). So ermöglichen sie den Wurzeln das Wachstum in diesen Leitbahnen zur Aufnahme von Wasser und Nährstoffen aus dem Unterboden. Die gesteigerte Infiltrationsleistung führt in gefährdeten Gebieten zu einer Entspannung der Hochwassersituation (Hangen et al., 2002).

Zu ähnlichen Schlussfolgerungen sind auch Zimmerling & Schmidt (2002) und Weikel & Winkler (2000) gekommen. Eine Anreicherung von organischem Material und das gesteigerte Bodenleben tragen zur Gefügebildung bei und fördern das Pflanzenwachstum.

Eine **Methode**, diese Effekte darzustellen, ist die **Röntgen-Computertomografie**, die zur Charakterisierung der Morphologie des Gefüges herangezogen wird (Rogasik et al., 1994). In der dreidimensionalen Visualisierung des Makroporenraums ist bei konventioneller Bodenbearbeitung oft ein Abschneiden von Regen-

wurmgängen in der Krumbasis zu beobachten (**Abb. 22**). Auch werden die kontinuierlichen Poren der Mulchsaat (**Abb. 23**) gegenüber den ungeordneten Hohlraumformen der Bearbeitung mit Pflug deutlich. Trotz dichter Lagerung ist der Wasser- und Gasaustausch bei Mulchsaat gewährleistet.

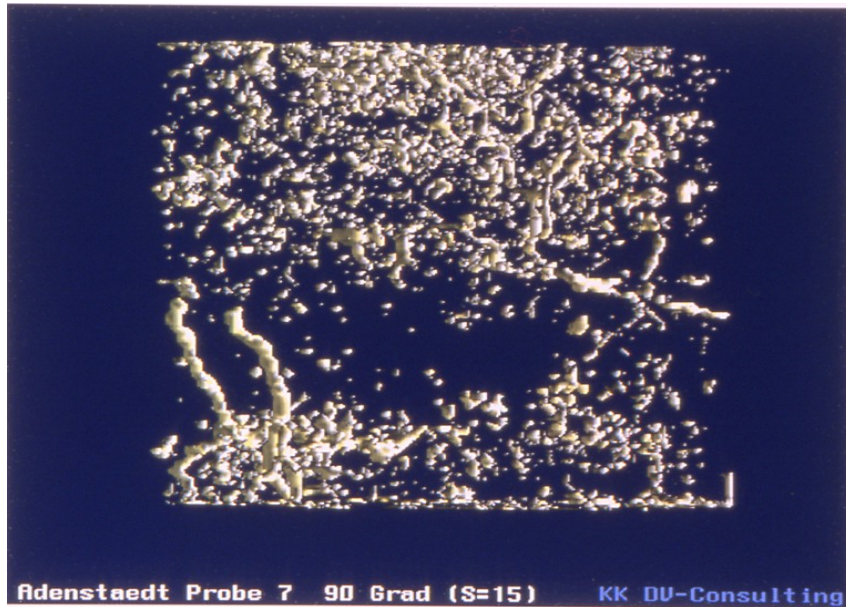


Abb. 22: Dreidimensionale Visualisierung des Makroporenraumes (Makroporen >1 mm) nach Röntgen-Computertomografie von ungestörter Bodensäule ($d = 10$ cm) bei konventioneller Bodenbearbeitung am Standort Adenstaedt (Rogasik et al., 1994)

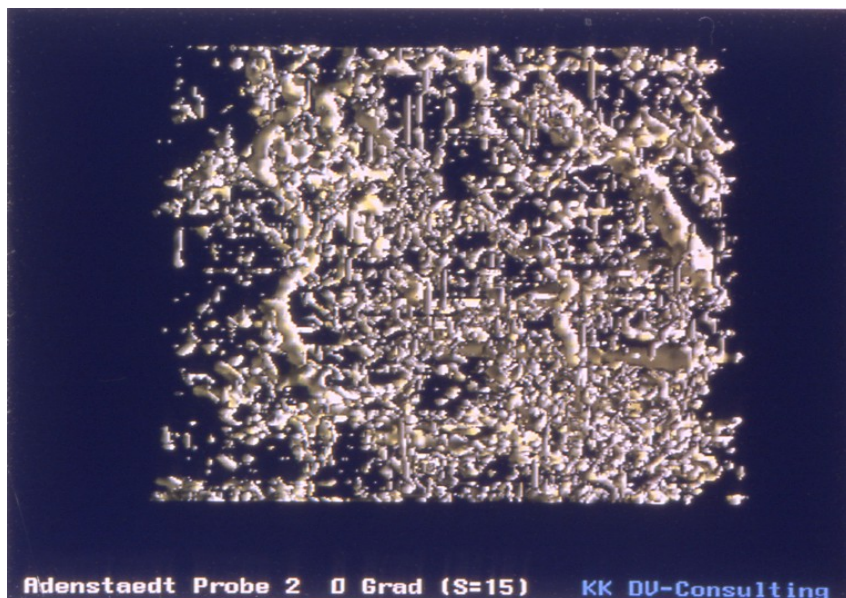


Abb. 23: Dreidimensionale Visualisierung des Makroporenraums (Makroporen >1 mm) nach Röntgen-Computertomografie von ungestörter Bodensäule ($d = 10$ cm) bei 'Konservierender Bodenbearbeitung' am Standort Adenstaedt (Rogasik et al., 1994)

Insbesondere der Anbau von Zwischenfrüchten fördert den Gefügebau und das Pflanzenwachstum. In der Vorharz-Region am Standort Adenstedt wurde der Zwischenfruchtanbau auf den stark erosionsgefährdeten Tonstandorten im Rahmen einer ZR-WW-WG-Fruchtfolge realisiert.

Ertragserhebungen über 15 Jahre zeigen, dass die Mulchsaat zu einer Stabilisierung und leichtem Anstieg der Rübenenerträge geführt hat (**Abb. 24**). Insbesondere die Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (MSoS) schneidet aufgrund des geringen Spuranteils auf den verdichtungsempfindlichen Tonböden gut ab. Auf weniger erosionsgefährdeten Lehmstandorten mit vorherrschender Fruchtfolge ZR-WW-WW werden ausschließlich die Vorfruchttrückstände zum Bodenschutz genutzt. Hier liegt die Mulchsaat mit Lockerung (MSmL) gegenüber der Frühjahrspflugfurche ertraglich im Vorteil, weil die Strohreste einen ausreichenden Verschlammungs- und Oberflächenschutz liefern. Die Lockerung fördert auf diesen kalten Böden die Erwärmung und Mineralisation.

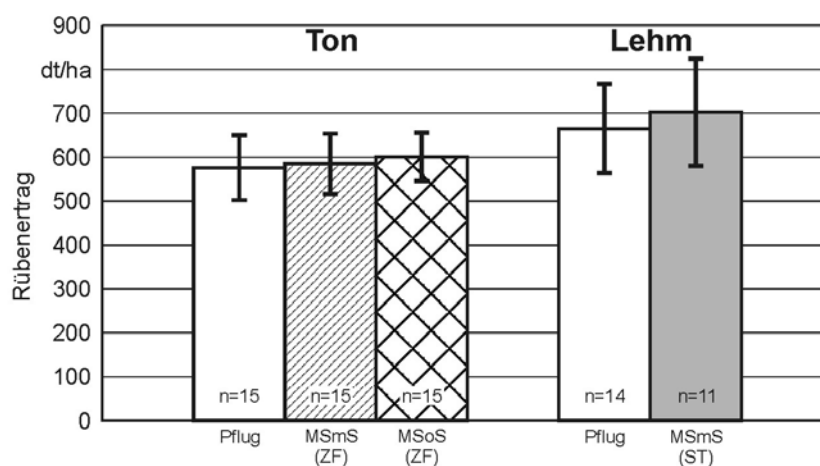


Abb. 24: Ertragsniveau von Zuckerrüben nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung über einen Zeitraum von 15 Jahren am Standort Adenstedt (Brunotte & Sommer, 2001)

Zusätzlich werden zurzeit in einem FuE-Vorhaben in Niedersachsen von 2002 bis 2008 zum Thema "Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis nach dem BBodSchG" Ertragserhebungen auf vier landwirtschaftlichen Betrieben in Südniedersachsen durchgeführt. Dabei hat die Mulchsaat mit 103 % ($s = 4\%$) gegenüber Pflug = 100 % abgeschnitten. Die Kleinwanzlebener Saatzucht-AG bestätigt am Standort Wetze diese Aussage in nun 12-jährigen Versuchen des Agroservice (KWS, 2005). Ergebnisse, die die Akzeptanz unter den Betriebsleitern für die Mulchsaatverfahren erhöhen.

Der Zwischenfruchtanbau hat zusätzlich durch die in Niedersachsen angebotene Modulation von 72 €/ha an Verbreitung gewonnen. Im Ambergau – eine Region im westlichen Vorharz – ist bei Zuckerrüben die Bodenbearbeitung mit Pflug in sieben Jahren von 58 auf 30 % gesunken, die Mulchsaat (mit/ohne Lockerung) nach Stroh von 20 auf ca. 30 % angestiegen, und die Mulchsaat nach Zwischenfrucht hat sich von 30 auf ca. 40 % ausgeweitet (**Abb. 25**). Dabei entscheiden die Bestellbedingungen im August über den Anteil der Zwischenfrucht und die Bodenbedingungen zur Rübenaussaat über den Anteil der Saatbettbereitung. Der relativ hohe Anteil an Mulchsaat nach Zwischenfrucht liegt an der Ausweisung der Region als Wasserschutzgebiet und heute zusätzlich an der angebotenen Modulation durch das Land Niedersachsen.

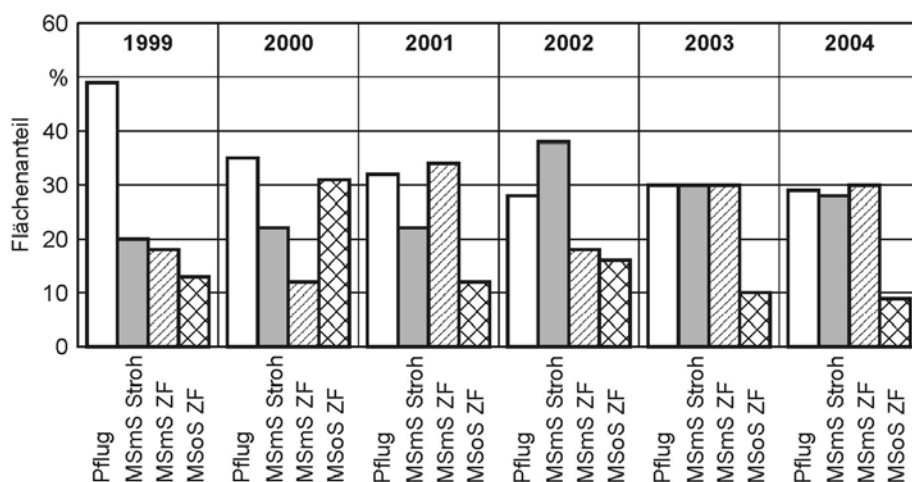


Abb. 25: Akzeptanz für Mulchsaatverfahren im Zuckerrübenanbau – Region südliches Niedersachsen (Schulze & Brunotte, 2004)

Auf die Darstellung der Ergebnisse von Winterweizen nach Zuckerrüben, Erbsen und Winterweizen wird an dieser Stelle verzichtet, da die Ertragsentwicklung neben bodenphysikalischen Parametern vornehmlich auch von der Vorfrucht und evtl. vorhandenem Infektionsrisiko beeinflusst wird. Diese Ertragsergebnisse wurden im Kapitel 4.1 "Bodenschadverdichtungen" unter dem Gesichtspunkt der Lockerungsbedürftigkeit von Böden vorgestellt und werden im Kapitel 4.4 "Mykotoxine" unter dem Gesichtspunkt Infektionsrisiko durch die Vorfrucht dargestellt.

Zwischenfazit:

- *Schonende Bodenlockerung und Einarbeitung von organischem Material sind Grundvoraussetzung für einen ungestörten Gefügebau durch Bodenlebewesen. Biogene Makroporen, von tiefgrabenden Regenwürmern angelegt, sorgen*

für eine hohe Infiltrationsleistung und entschärfen in gefährdeten Regionen die Hochwassersituation.

- *Mit den beschriebenen Maßnahmen wird auch der Grundstein für ein ungestörtes Pflanzenwachstum gelegt. Da es im Verlauf der letzten 20 Jahre zu einer Stabilisierung der Ernteerträge, insbesondere nach Zwischenfrucht, gekommen ist und in einer Kosten-Nutzen-Analyse belegt wird, ist auch die Akzeptanz beim Landwirt für diese Verfahren 'Konservierender Bodenbearbeitung' gestiegen. Die konsequente Forschung und Anwendung erosionsmindernder Bodenbearbeitungsverfahren haben vor allem in der Region Ambergau und darüber hinaus zu einer ständigen Verbreitung der neuen Verfahren auf den Betrieben geführt.*

d) **Kosten-Nutzen-Analyse Bodenschutz durch Mulchsaat**

Um **Aufwand und Nutzen eines Zwischenfruchtanbaus** richtig beurteilen zu können, reicht eine Betrachtung von Kosten und Erträgen in dem jeweiligen Jahr nicht aus. Neben der reinen Rentabilitätsrechnung spielen folgende Effekte eine entscheidende Rolle:

- Der Zwischenfruchtanbau wirkt sich kurz- und mittelfristig über den Gründüfungseffekt positiv auf die Ertragsentwicklung aus. Die Erträge werden stabiler und schwanken nicht mehr so stark in Abhängigkeit von Witterungsextremen, wie Nässe und Trockenheit während der Vegetationszeit (siehe Abb. 24).
- Mittelfristig stellen organische Rückstände an der Oberfläche eine Risikoversicherung gegen Umbruch und Neueinsaat dar. Kosten für neues Saatgut, Dünge- und Pflanzenschutzmittel werden eingespart und der Wachstumsvorsprung der Rüben bleibt erhalten.
- Langfristig bedeutet dies eine Bodenwerterhaltung. Krümmenmächtigkeit und Wasserspeicherkapazität bleiben erhalten und sichern damit die Bodenfruchtbarkeit und stabile Erträge (Wessolek et al., 1992).

In einer grundlegenden Arbeit zu der angesprochenen **Kosten-Nutzen-Analyse** werden die Aufwendungen und der Nutzen nur auf die Zuckerrüben in einer 3-gliedrigen Fruchtfolge angesprochen, unter der Annahme, dass alle neun Jahre ein erosives Ereignis eintritt (Brunotte et al., 1995). Gegenüber der Bodenbearbeitung mit Pflug ergibt sich für die Mulchsaat nach Stroh ein Nutzen von $50 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. Die Mulchsaat mit Saatbettbereitung nach Zwischenfrucht erreicht $75 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ und die Mulchsaat ohne Saatbettbereitung $100 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ Nutzen.

Die Getreidefrüchte Winterweizen und Wintergerste wurden dabei außer Acht gelassen. Würde man heute eine Neubewertung vornehmen, bliebe das Ergebnis annähernd unverändert, da die Gefahr für den Verlust von Ackerboden durch erosive Niederschläge bei Wintergetreide sehr gering ist. Zu ähnlichen Größenordnungen von 50-100 €·ha⁻¹·a⁻¹ kommt auch die von Brand-Sassen (2004) durchgeführte Kosten-Nutzen-Analyse am Beispiel einer Raps-Getreide-Fruchtfolge.

Vor dem Hintergrund dieser positiven Ergebnisse stellt sich die Frage, warum noch öffentliche Mittel zur Förderung dieser Mulchsaatverfahren, z. B. im Rahmen der Modulation, gezahlt werden. Der Grund liegt in der enormen Motivationssteigerung und Akzeptanzerhöhung beim Landwirt. Denkbar ist, dass nach einer Anschubfinanzierung diese Mittel wieder einbehalten werden.

► Daraus leitet sich die **Schlussfolgerung für These 5** ab:

Die Mulchsaat mit/ohne Lockerung ist ganzflächig der wirkungsvollste Verschlämmungs- und Bodenschutz. Die variierte Lockerungstiefe ist erforderlich, um organisches Material gleichmäßig in die Tiefe einzuarbeiten und hat direkten Einfluss auf den Bedeckungsgrad: "je tiefer und je häufiger gearbeitet wird, umso geringer wird der Bedeckungsgrad und damit der Oberflächenschutz". Der völlige Verzicht auf Bodenbearbeitung bei Direktsaat gewährt zwar den höchsten Bodenschutz, schafft aber oft Probleme bei der sicheren Etablierung des Pflanzenbestandes. Ist zur Effizienzsteigerung der Erosionsminderung Zwischenfruchtanbau erforderlich, so ist zur Akzeptanzverbesserung eine Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen.

4.2.2 Veränderung der Fahrzeugparameter und Arbeitsverfahren

Die Betrachtung der technischen Parameter führt zu folgender Hypothese:

These 6: Mulchsaat erreicht in Verbindung mit günstigen Fahrzeugparametern, wie Breitreifen und geringen Reifeninnendruck, auch in stark befahrenen Bereichen wie den Fahrgassen, Minderung linienhafter Erosion und Erhaltung von biologischer Aktivität.

Bei Bodenbearbeitung, Bestellung und Pflege sollen Traktoren mit breiten Reifen und geringem Reifeninnendruck eingesetzt werden. Bei den Verfahren sind sich

ergänzende Arbeitgänge zu koppeln, um die **Überrollhäufigkeit der Fläche** zu reduzieren (KTBL, 2006). Das ziehende und antreibende Fahrzeug hat gerade so schwer zu sein, dass ausreichend Zugkräfte übertragen werden können, ohne dabei zuviel Schlupf zu entwickeln. Schlupfwerte von >10 % führen zu einem "Zermahlen" von Aggregaten und fördern damit die Verschlammungsneigung. Durch die mit Zapfwellen horizontal angetriebenen Geräte werden von dem Randbereich (äußeren 20 cm) intakte Aggregate in die Spur gefördert und wirken verschlammungsmindernd. Vor dem Hintergrund, Bodenerosion zu vermeiden, ist der letzte Arbeitgang, der heute Sekundärbodenbearbeitung und Aussaat zusammenfasst, im Vergleich zu Stoppel- und Grundbodenbearbeitung ausschlaggebend.

Um den Bodendruck der kleineren Frontbereifung am Traktor zu reduzieren, helfen Packer (Gussring-, Prismen-, Flexicoil-, Trapezring-Packer) im Zwischenradbereich, den Boden gleichmäßig anzudrücken. Front- und Heckbereifung sollten bei feuchten Bestellbedingungen 1 bar Reifeninnendruck nicht überschreiten. Ein 125-kW-Traktor kann bei 1 bar Luftdruck eine Radlast von 3 t mit einem Radialreifen 650/65 R 38 abstützen. Durch die gleichmäßige Verteilung der Last über die Fläche bleibt die Infiltrationsleistung der Krume weitestgehend erhalten. Unterstützt wird dies durch die Kopplung mehrerer Arbeitgänge, die eine geringe Überrollhäufigkeit und damit Bodenbelastung bewirken.

Fahrgassen spielen neben anderen Systemen des **kontrollierten Fahrverkehrs** eine entscheidende Rolle (Brunotte & Sommer, 1993). Vertiefte Pflegespuren sind Abflussbahnen für linienhafte Erosion. In ihnen können bis zu 50 % der gesamten Erosion eines Schlages erfolgen (Sanders & Mosimann, 2005; Mosimann et al., 2005). Zur Abhilfe sind Lösungsansätze von der Geräte- wie auch von der Bodenseite entwickelt worden und zu kombinieren:

1. Dabei steht die Vergrößerung der Aufstandsfläche im Vordergrund, um breiteren Reifen bis 600 mm bei Pflegemaßnahmen Platz zu geben. Nach einer Umfrage werden heute 90 % der Pflgetraktoren mit den genannten breiten Reifen ausgerüstet (Brunotte, 2005).
2. Erfolgt zusätzlich eine **Radlastreduzierung** durch Übergang von einem Anbaugerät auf ein Anhängegerät (beim Pflanzenschutz zu 60 % realisiert, bei Düngung in Beständen noch eher die Ausnahme, häufiger bei Grunddüngung

umgesetzt), so kann bei Traktor und Anbaugerät der **Reifeninnendruck** in Verbindung mit dem breiteren Reifen auf ca. 1 bar bei 2.500 l Behältervolumen abgesenkt werden.

3. 'Konservierende Bodenbearbeitung' schafft durch **schonende nichtwendende Lockerung** eine verbesserte Tragfähigkeit für mechanische Belastung. Organisches Material wirkt in den Fahrspuren als Bremse und dient den Regenwürmern als Nahrungsgrundlage. Der *Lumbricus terrestris* ist in der Lage, mit ca. 1 bar den Boden zu verdrängen (Keudel & Schrader, 1999). Wenn mit ca. 1 bar Reifeninnendruck in der Fahrgasse gefahren wird, kann sich der Regenwurm auch hier die Bodenoberfläche als Nahrungsgrundlage erschließen und schafft sogar in der Fahrspur biogene Vertikalporen, die Wasser infiltrieren lassen.

Bei **Zuckerrüben** kann zur Minderung von linienhafter Erosion in den Fahrgassen neben dem Einsatz breiter Bereifung, insbesondere nach Pflugfurche, zusätzlich eine Begrünung mit Wintergerste erfolgen. Diese wird in einem extra Arbeitsgang ohne Intervall ausgesät. Bei 'Konservierender Bodenbearbeitung' ist nur bei Bedeckungsgraden <20 % und Hangneigungen >12 % eine Begrünung erforderlich. Eine detaillierte Verfahrensbewertung erfolgte von Mosimann et al. (2005).

4. "Verkürzung der Hanglänge" ist eine der ältesten Maßnahmen zur Minderung von Bodenerosion. Aufgrund von Schlaggestaltung ist sie ganzflächig oft schwierig umzusetzen. Dieses Prinzip eignet sich gut für Fahrgassen, um die erosive Hanglänge und damit die Fließstrecke zu verkürzen. Mit einstellbaren Intervallen wird Getreide in der Fahrgasse mit ausgesät.

Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass nach Bodenbearbeitung mit Pflug durch eine **Intervallbegrünung in Fahrgassen** der Bodenabtrag um 25-80 % reduziert werden kann (Sanders & Mosimann, 2005). Bei Mulchsaat reichen in der Regel 20-30 % Bedeckungsgrad, um linienhafte Erosion zu minimieren.

➤ Daraus leitet sich die **Schlussfolgerung für These 6** ab:

Mulchsaat schafft ein tragfähiges Bodengefüge, das in Verbindung mit breiten Reifen und geringem Reifeninnendruck ein 'Bodenschonendes Befahren' im Bereich der Fahrgassen, ggf. unterstützt durch Begrünung, gewährleistet und damit linienhafte Erosion vermindert wie auch biologische Aktivität fördert und erhält. Fahrgassen sind deshalb nicht als permanente Spurbahnen im Sinne des "Gantry" aus der Produktion herauszunehmen.

4.3 Gewässerschutz – Minderung von Run off in Oberflächengewässer

Bei ungünstiger Geländegestaltung, hoher Wahrscheinlichkeit für erosive Niederschläge und weitreihigen Sommerungen existiert eine hohe Erosionsgefährdung. Der Auslöser für den Abtrag ist Oberflächenabfluss, der je nach Zeitpunkt auch gelöste Dünge- und Pflanzenschutzmittel von der Fläche transportieren kann. Schon sehr lange fordert ordnungsgemäße Landwirtschaft gute fachliche Praxis beim Pflanzenschutz. Trotz sachgerechter und gezielter Applikation von Pflanzenschutzmitteln kann es zu Austrägen von Wirkstoffen mit ökotoxikologischen Beeinträchtigungen von Oberflächengewässern und zu einer Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes kommen. Ausmaß und Schaden waren bisher für den Landwirt schwer einschätzbar. Da in den letzten 10 Jahren der Bodenschutz in den Vordergrund getreten ist, sind auch Oberflächenabfluss und Austrag von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln zu minimieren, was zusätzlich die Gewässer schützt.

Die sich aus der Literaturübersicht (Kapitel 3.3) ergebenden Einflussfaktoren auf Run off sind in **Abb. 26** zusammengefügt. Der Haupteintragspfad "Hofabläufe" wird hier nicht näher behandelt, da er in keinerlei Beziehung zur Bodenbearbeitung steht. Zur Minderung von Austrägen helfen Beratung (Frede et al., 1998; Pestemer et al., 2005) und das Anlegen von hofeigenen Versickerungsanlagen (Ebeling, 1999), die den Boden in seiner Filter- und Pufferfunktion nutzen.

Der Pfad "Abtrift" bleibt unberücksichtigt, da eine Minderung allein durch technische Einrichtungen, wie z. B. abtriftmindernde Düsen, zu realisieren ist (Ripke et al., 2001). Auch wird auf die Bedeutung von Schrumpfrissen und "interflow", also sich auf geologischen Schichten lateral hangabwärts bewegendes Wasser, für den

PSM-Austrag nicht eingegangen, da diese Transportwege standortspezifisch sind und von der Art der Bodenbearbeitung nicht beeinflusst werden.

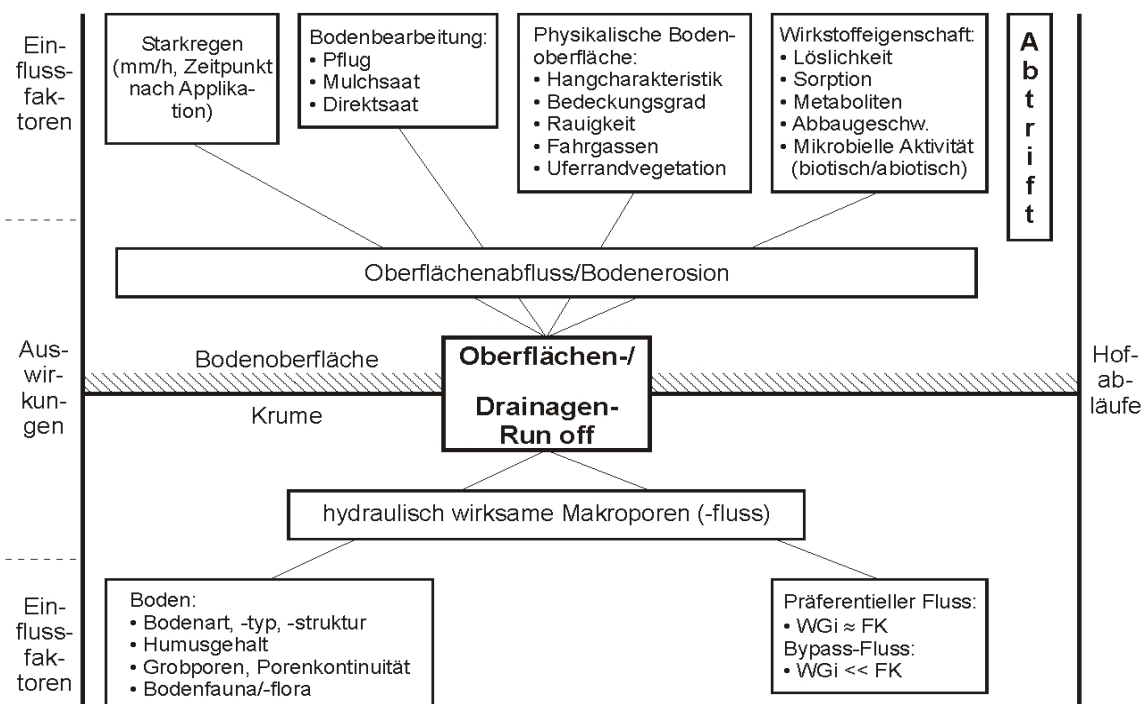


Abb. 26: Einflussfaktoren auf Run off durch Oberflächenabfluss und Makroporenfluss

(1) Run off durch Oberflächenabfluss und Makroporenfluss

In diesem Kapitel wird Run off durch Oberflächenabfluss und Makroporenfluss diskutiert, da Bodenbearbeitung durch Tiefe und Intensität des Eingriffs hauptsächlich Einfluss auf das Austragsgeschehen nimmt. Vor diesem Hintergrund leitet sich folgende These ab:

These 6: 'Konservierende Bodenbearbeitung' erreicht durch organische Rückstände an der Oberfläche

- einen Bremseffekt für abfließendes Wasser,
- gesteigerte Infiltration durch von Regenwürmern geschaffene Makroporen und
- bei Berücksichtigung bestimmter Rahmenbedingungen keinen erhöhten Wirkstoffaustrag durch Makroporenfluss.

Simulationsmodelle zur Vorhersage der Herbizidverlagerung stellen ein wertvolles Instrument zur Abschätzung potenzieller Umweltrisiken von Pflanzenschutzmitteln dar. Zur Absicherung dieser Modelle ist es in gewissen Abständen notwendig,

die verwendeten Eingangsdaten im Freiland zu überprüfen, da es häufig zu Überschätzungen der tatsächlichen Austräge kommt (Bach et al., 2000).

In einem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BML) zum Thema "Praxisgerechte Möglichkeiten und Verfahren zur Vermeidung des Eintrags von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer durch Abtrift und Abschwemmung" sind u. a. in zwei benachbarten Tälern in Niedersachsen die Einträge über sieben Jahre gemessen worden (Pestemer et al., 2001; Reese-Stähler et al., 2001). Der Vergleich zwischen konventionellen und konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren gestaltete sich schwierig, da eine Harmonisierung von natürlichen Bedingungen, wie Niederschlagsintensität, Hangcharakteristika und Bewirtschaftungsstrategien, wie Aussattermine, Technikausstattung und Applikationszeitpunkten, nicht möglich war.

Um ein Höchstmaß an Vorsorge zu erreichen, wurden im Rahmen der Standort- und Fruchtfolgebedingungen verfahrenstechnische, acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen ausgewählt. Die Details zur Durchführung und Erfolgskontrolle von Präventivmaßnahmen führen Brunotte & Duttmann (2001) näher aus. So wurden am Standort Lamspringe in Abhängigkeit von der Erosionsanfälligkeit der Standorte Bedeckungsgrade von 10-75 % mithilfe von Stroh- und/oder Zwischenfruchtresten erstellt. Bei Zuckerrüben kam es nach Strohmulch bzw. nach spät bestelltem Senf in Einzelfällen zu Abfluss- und Erosionsereignissen, da der Oberflächenschutz nicht ausreichte. Flache Spurwannen und Intervall-Fahrgassenbegrünung konnten linienhaften Abfluss nach Herbstapplikation in der Regel verhindern.

Die im Rahmen dieses Verbundprojektes von Bischoff et al. (2001b), Pestemer et al. (2001) und Reese-Stähler et al. (2001) durchgeführten Untersuchungen kommen zu folgendem Schluss:

- Höchste Wirkstoffkonzentrationen nach Starkregenereignissen: 33 µg/l bei Chloridazon, 21 µg/l bei Isoproturon.
- Starkregenereignisse (35 mm in 24 Stunden und davon 20 mm in 30 Minuten), wie im Oktober 1996 und Mai 1997, bewirkten einen Austrag von 80 bis zu 95 % der Jahresfracht eines Wirkstoffs (Isoproturon, Ethofumesat, Quinmerac).
- Austragsraten in Bezug zur gesamten ausgebrachten PSM-Wirkstoffmenge 1996/97: 0,034 %; 1997/98: 0,071 %.

Zwischenfazit:

- Die Wirkstofffracht (Intensität) wird beeinflusst von Regenmenge und -intensität, zeitlichem Abstand zwischen Applikation und Niederschlag, Bodenfeuchte, Wirksamkeitseigenschaften und Standortgegebenheiten (Fruchtfolge, Hangcharakteristik, Bodenbearbeitungsverfahren, Bedeckungsgrad).
- Gleiche applizierte Wirkstoffmenge kann zu jahresbedingten Austrägen führen (Ethofumesat 1997: 0,284 %; 1998: 0,011 %).
- Hauptsächlich wurden Herbizide und nur vereinzelt Insektizide und Fungizide ausgetragen.
- Unter praxisüblichen Bedingungen sind nur nach extremen Niederschlagsereignissen beim Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Faktoren PSM in Gewässern nachzuweisen.
- Der Verbleib von PSM im Naturhaushalt beinhaltet: Belastungshöhe, Verteilung, Ausbreitungswege, Transfer zwischen Kompartimenten, Persistenz und Metabolismus einschließlich der Bildung nicht extrahierbarer Rückstände. Hieraus leiten sich Grundlagen und Aufgaben eines Nachzulassungs-Monitorings zur Überprüfung von Eintragspfaden und Verbleib langfristig eingesetzter PSM ab.

(2) Run off durch Oberflächenabfluss und Minderung durch Uferrandstreifen – Nachzulassungs-Monitoring

Im Rahmen eines vom Umweltbundesamtes (UBA) angeordneten Nachzulassungs-Monitorings wurde von 1999 bis 2004 die Wirksamkeit von Abstandsaufflägen an zwei Standorten in Norddeutschland überprüft (u. a. Standort Adenstedt). Gegenstand der Untersuchung war der Herbizidwirkstoff Terbutylazin (TBA) im Maisanbau nach konventioneller Bodenbearbeitung mit Pflug bei 2-10 % Hangneigung. Es war der Nachweis zu erbringen, ob ein 10 m breiter bewachsener Uferrandstreifen ohne flächigen Bodenschutz und bei gegebener Erosivität von Niederschlägen in der Lage ist, angrenzende Gewässer vor PSM-Eintrag zu schützen (Bischoff et al., 2001a, b; Bischoff et al., 2002; Pestemer et al., 2005).

Im Mais wurden im 4- bis 6-Blattstadium 750 g/ha TBA appliziert. **Abbildung 27** zeigt den Versuchsaufbau. Automatische Probensammler nahmen kontinuierlich und ereignisgesteuert Proben für die Analyse. Am Standort Adenstedt konnten 1999 und 2000 keine und 2001 nur zwei Tagesmischproben von 0,22 bzw. 0,05 µg/l nachgewiesen werden. Die 8 % Hangneigung und die kurze erosive Hang-

länge von 150 m führten nur zu mäßigem Abfluss, der von dem Randstreifen weitestgehend gehalten wurde.

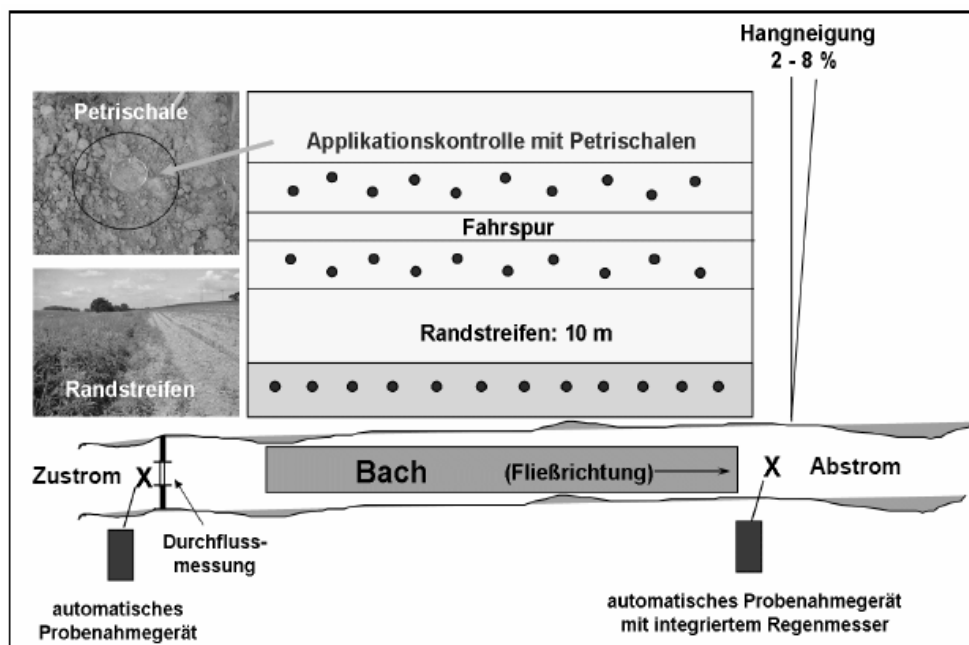


Abb. 27: Anlage eines Feldversuchs zum Nachzulassungs-Monitoring (Pestemer et al., 2005)

Zwischenfazit:

Das Nachzulassungs-Monitoring hat gezeigt, dass ein dicht bewachsener 10 m breiter Uferrandstreifen bei geringen bis mittleren Erosionsereignissen einen effektiven Schutz vor dem Eintrag abgeschwemmten Materials in die angrenzenden Fließgewässer bietet. Bei hoher potenzieller Erosionsgefährdung und heftigen Niederschlägen hat zusätzlich ein ganzflächiger Bodenschutz durch Mulchsaat zu erfolgen. Seit 2005 können diese Randstreifen zu den prämienbegünstigten Flächen in den jeweiligen Betrieben gezählt werden.

(3) Bedeutung von Makroporenfluss und Drainagenaustrag nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung

In einem Verbundprojekt wurde am Standort Adenstedt auf einer Löss-Parabraunerde der Unterschied im Makroporenfluss zwischen Bodenbearbeitung nach Pflug und Mulchsaat mit Lockerung mithilfe von Methylenblau als Farbtracer und mit der Tensioninfiltrometrie untersucht. Versuchsaufbau, -durchführung und -ergebnisse werden von Buczko et al. (2003) näher beschrieben. In der Mulchsaat konnte bis in 1,2 m Tiefe eine sehr viel höhere Dichte an Makroporen mit hoher Kontinuität festgestellt werden. Dies Makroporennetzwerk in vertikaler Richtung

ist mit dafür verantwortlich, dass das Hochwasserrisiko in landwirtschaftlich genutzten Wassereinzugsgebieten gemindert werden kann.

Inwieweit es in diesen Makroporen zum Austrag von PSM kam, wurde in fünf aufeinander folgenden Jahren von der Biologischen Bundesanstalt, Institut für Ökotoxikologie und Ökochemie im Pflanzenschutz, Berlin, anhand von 24 Wirkstoffen untersucht. Die mittleren Wiederfindungsraten der meisten Wirkstoffe lagen zwischen 70 und 110 %. Der Applikationszeitpunkt wurde so gewählt, dass ausreichend Zeit bis zu evtl. Niederschlägen gegeben war (Brunotte, 2004).

Zwischenfazit:

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass sich die gemessenen Wirkstoffgehalte in allen Fällen, wo parallel Proben in beiden Bodenbearbeitungsvarianten gezogen werden konnten, nur geringfügig unterscheiden. Ein erhöhter Pflanzenschutzmittelaustrag durch einen verstärkten Makroporenfluss in der Mulchsaat konnte im Versuchszeitraum auf dem Lössstandort nicht nachgewiesen werden.

Aus der Literaturrecherche und den drei durchgeführten Versuchsprojekten lässt sich folgendes **Fazit** ziehen:

- *Nach Pflugfurche treten aufgrund einer unbedeckten Bodenoberfläche und einer bei Starkregen schnell eintretenden Verschlämmung die höchsten Austragsmengen an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln durch den Pfad Oberflächenabfluss und Bodenerosion auf.*
- *Direktsaat weist die meisten intakten biogenen Vertikalporen bis an die Oberfläche auf. Kommt es gleich nach der Applikation zu heftigen Niederschlägen, ist die Gefahr für Austräge durch Makroporenfluss hoch.*
- *Bei Mulchsaat existieren unterhalb der bearbeiteten Zone bis in große Tiefen intakte, stabile Vertikalporen, die je nach Bodenruhe auch immer an die Oberfläche verlängert werden. Die Gefahr von Run off über Oberflächenabfluss und/oder Makroporenfluss ist hier im Vergleich zu Pflug und Direktsaat am geringsten, da Abfluss und Erosion durch Bedeckung der Oberfläche gemindert werden. Zugleich erfolgt bei Niederschlägen zunächst eine Aufnahme der gelösten Stoffe in die Bodenmatrix, wo sofort ein mikrobieller Abbau beginnen kann. Nach Filterung durch die obere Krume von 15 cm werden dann die intakten Makroporen erreicht, die das Wasser schnell in den Untergrund ableiten, ohne dass es auf der Schlepperradsohle zum Wasserstau kommen kann.*

- Aus dem Fazit lassen sich die **Schlussfolgerungen für These 7** ableiten: 'Konservierende Bodenbearbeitung' mit schonender Lockerung auf halbe Krumentiefe und Mulchsaat mindert den Austrag von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln infolge der organischen Rückstände an der Oberfläche, die verschlammungs- und abflussmindernd wirken durch
- eine gesteigerte Infiltration in den von Regenwürmern geschaffenen biogenen Vertikalporen mit hoher Kontinuität und
 - eine zeitlich gestaffelte Applikation vor herannahenden Starkniederschlägen.

4.4 Verbraucherschutz – Vermeidungsstrategien zur Mykotoxinbildung im Getreide

Nichtwendende Bodenbearbeitungsverfahren sind zur Realisierung von Bodenschutz und aus Kostengründen fester Bestandteil moderner Landwirtschaft geworden. Durch das Belassen von Pflanzenrückständen an der Oberfläche ist bei bestimmten Vorfrüchten und ungünstiger Witterung während der Blüte des Weizens das Risiko für Mykotoxine erhöht. Dieser Zielkonflikt zwischen Bodenschutz und Verbraucherschutz existiert und wird in der Literatur ausführlich beschrieben (u. a. Dehne et al., 2002; Meinert, 2003). Zur Lösung des Zielkonfliktes zwischen Bodenschutz und Sicherung der Produktqualität mithilfe von technischen, acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen steuernd im Sinne einer Risikominderung einzugreifen, werden von Oldenburg & Brunotte (2002) skizziert.

Die in der Literaturrecherche (siehe Kapitel 3.4) aufgezeigten Einflussfaktoren auf die Mykotoxinbildung im Getreide (Weinert, 1995; Rodemann & Bartels, 2004) sind in **Abb. 28** zusammengefügt und durch die eigenen Schwerpunkte, wie Fruchtfolge, Stoppelbearbeitung, Bodenbearbeitung, Sorte und Stickstoffdüngung, ergänzt und hervorgehoben. Dabei wird besonderes Gewicht auf die Vorsorgestrategie gelegt, da die Witterung zum Zeitpunkt der Blüte nicht zu beeinflussen ist und bereits am Ernteprodukt vorhandene Mykotoxine durch nachfolgende Reinigungs- bzw. Verarbeitungsprozesse nur zum Teil entfernt werden können.

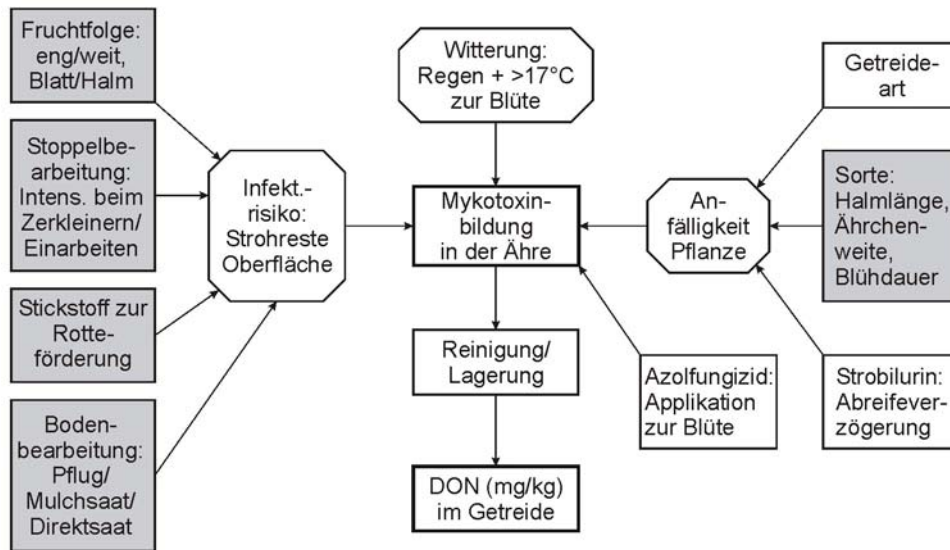


Abb. 28: Einflussfaktoren auf den Mykotoxingehalt im Getreide

Aus der Literaturstudie ergibt sich folgende Hypothese (These 8), die mithilfe von Feldversuchen und Erhebungen auf landwirtschaftlichen Betrieben als Fallbeispiele zu verifizieren ist:

These 8: Durch 'Konservierende Bodenbearbeitung' ist ein potenziell erhöhtes Infektionsrisiko für Pflanzenkrankheiten durch die Pflanzenrückstände an der Bodenoberfläche gegeben – technische, acker- und pflanzenbauliche Präventivmaßnahmen helfen, Mykotoxinbildung im Getreide zu reduzieren.

Untersuchung 1: Erhebungen zum DON-Gehalt auf 4 Standorten in Niedersachsen, 1999-2005

Grundlage für die Erhebung auf vier landwirtschaftlichen Betrieben in Südniedersachsen war die hohe potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerschläge und eine mittlere Jahresniederschlagsmenge von 850 mm. Dadurch wird nicht nur bei der Reihenfrucht Zuckerrübe, sondern auch bei den nachfolgenden Getreidegliedern ein hohes Maß an 'Konservierender Bodenbearbeitung' praktiziert. Der Weizenanbau erfolgte hauptsächlich auf schluffigen Lehmböden mit 60-80 Bodenpunkten, die sich durch eine hohe Wasserspeicherkapazität bis an die Bodenoberfläche auszeichnen. Als Stoppelweizen wurden hauptsächlich Sorten der Stufe 4-7 (= Bundessortenliste → Anfälligkeit für Ährenfusariosen) angebaut. Es erfolgte

keine spezielle Blütenspritzung mit Azolfungiziden. Bei der Bodenbearbeitung wurden die Varianten Pflug (P), Mulchsaat mit Lockerung (MSmL), Mulchsaat ohne Lockerung (MSoL) und Direktsaat (DS) miteinander verglichen, wobei letztere wegen des höheren Anbaurisikos weniger häufig vertreten war.

Tabelle 5 zeigt die Häufigkeit der durchgeführten Bodenbearbeitungsvarianten. Pflug und Mulchsaat mit Lockerung (MSmL) sind am häufigsten angelegt, Direktsaat (DS) bleibt eher die Ausnahme. Obwohl durch die Pflugfurche (P) keinerlei Pflanzenrückstände an der Oberfläche sind, konnten bei 15 % der Proben ein DON-Gehalt im Mittel von 0,34 mg/kg Weizen nachgewiesen werden. Bei den nichtwendenden Verfahren nehmen von MSmL über MSoL (= Mulchsaat ohne Lockerung) bis zur DS die Anzahl positiver Proben, der mittlere DON-Gehalt und der Schwankungsbereich zu. Es besteht hier eine enge positive Korrelation zu der Menge an Ernterückständen und damit zum Infektionsrisiko an der Bodenoberfläche. Die DS weist im Mittel einen DON-Gehalt von 1,05 mg/kg aus und liegt damit geringfügig unter dem Grenzwert der neuen EU-Höchstmengenverordnung von 1,25 mg/kg für Getreide-Rohware.

Tab. 5: Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren und Vorfrucht Weizen auf den DON-Gehalt von Weizen auf vier Standorten in Südniedersachsen, 1999-2005 (nach Brunotte & Oldenburg, 2005)

Bodenbearbeitung	Proben positiv (% von n)	DON-Gehalt mg/kg (positive Proben)		
		Mittelwert	s	Bereich
• Pflug n = 54	15	0,344	0,424	0,22-2,16
• Mulchsaat mit Lockerung n = 59	31	0,404	0,513	0,22-2,67
• Mulchsaat ohne Lockerung n = 35	46	0,543	0,666	0,22-3,02
• Direktsaat n = 12	50	1,05	1,543	0,22-5,38

Diese Untersuchung zeigt, dass sehr genau zwischen der unterschiedlichen Ausprägung von Mulchsaaten (MSmL, MSoL) und Direktsaat unterschieden werden muss und nicht alle Bearbeitungsintensitäten unter dem Begriff "Minimal-Bodenbearbeitung" behandelt werden sollten, wie es in dem bayerischen Monitoring erfolgt ist (Beck & Lepschy, 2000). Genau in der Optimierung von Mulchsaatverfahren steckt bei der Bodenbearbeitung das Vorsorgepotenzial zur Minderung von DON-Gehalten (siehe Untersuchung 3) im Weizen.

Untersuchung 2: Detailuntersuchungen auf einem Standort in Südnieder- sachsen (Adenstedt)

2a Auswirkungen von Vorfrucht, Bodenbearbeitung, Weizensorte und Pflanzen- schutz auf den DON-Gehalt und den Ertrag von Weizen

In den Jahren 1999-2003 wurden auf unterschiedlichen Lehmstandorten eines
Betriebes mit 850 mm mittlerem Jahresniederschlag die Auswirkungen von

- Vorfrucht: Zuckerrüben, Weizen,
- Bodenbearbeitung: Pflug, Mulchsaat mit Lockerung, Direktsaat,
- Weizensorte: Bundessortenliste Stufe

2-3 = gering anfällig = A,

4-5 = mittel anfällig = B,

6-7 = hoch anfällig = C,

- Pflanzenschutz:

"betriebsüblich" = BÜ mit Wirkstoff Azoxystrobin, Fenpropidin, Propiconazol
und Tebuconazol bei 80 % geschobener Ähren, "Applikation zur Blüte" ohne
Ährenbehandlung = AB mit Wirkstoff Tebuconazol und Metconazol

auf Ertrag und DON-Gehalt untersucht. Insgesamt war das Niveau der **DON-Ge-
halte** auf einem niedrigen Niveau (**Abb. 29**).

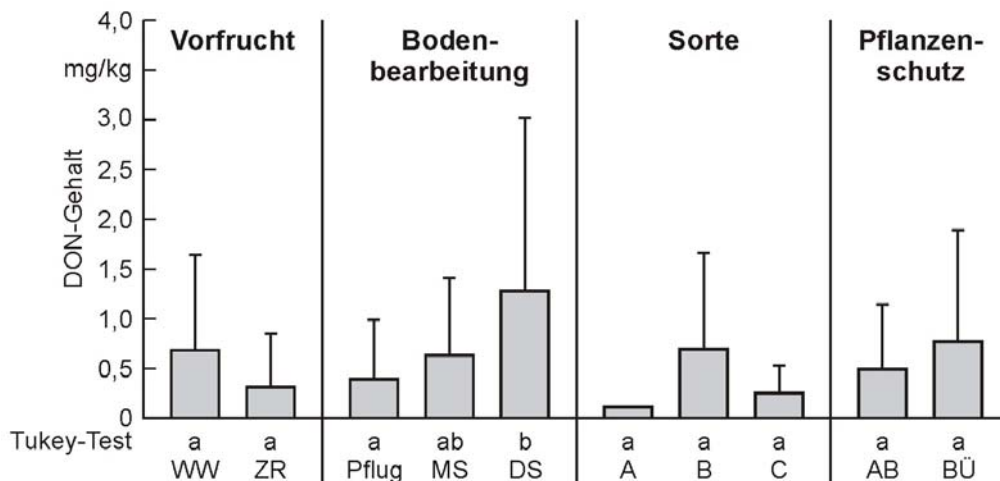


Abb. 29: Einfluss von Vorfrucht, Bodenbearbeitung, Sorte und Pflanzenschutz auf den DON-Gehalt von Winterweizen auf dem Standort Adenstedt, 1999-2003 (Brunotte & Oldenburg, 2004a)

Mithilfe des Tukey-Tests sind die Signifikanzen berechnet. Zwischen den Vorfrüchten Zuckerrüben und Weizen gibt es keinen signifikanten Unterschied. Anders bei der Bodenbearbeitung – die Direktsaat ist signifikant verschieden gegenüber dem Pflugverfahren und weist mit 1,28 mg/kg DON den höchsten Wert auf.

Tendenziell ist eine Zunahme der DON-Gehalte von Pflug über Mulchsaat mit Lockerung zur Direktsaat zu verzeichnen. Zwischen den Sorten und Pflanzenschutzstrategien gibt es keine signifikanten Unterschiede. Die Blütenspritzung führte zu einem niedrigeren mittleren DON-Gehalt.

Zwischenfazit:

- Die geringen DON-Gehalte sind begründet durch die Jahre mit geringem Befallsniveau. Zusätzlich konnte die Optimierung von Strohmanagement und bodenbearbeitungsspezifischer Düngung befallsmindernd wirken. Eine gleichmäßige Strohverteilung, intensive Einarbeitung durch zeitlich und in der Tiefe variierte Bodenbearbeitungsmaßnahmen und eine Stickstoffgabe von 40 kg N/ha zum Stoppelweizen im Herbst förderte insgesamt die Rottegeschwindigkeit des Strohs und ließ keinen signifikanten Unterschied zwischen Pflug und Mulchsaat auftreten.

Beim **Ertrag** gab es keine signifikanten Unterschiede bezüglich Vorfrucht, Bodenbearbeitung und Pflanzenschutz. Dies mag auch im geringen DON-Gehalt und dem geringen Anteil an Kümmerkorn begründet sein (**Abb. 30**). Lediglich die gesunde Sorte 'Petrus' unterschied sich signifikant von den mittel und hoch anfälligen Sorten. Ursache ist dafür das geringe Ertragspotenzial. Diese Sorte stellt damit keine Alternative zu den in der Praxis üblichen Sorten dar. Neu im Anbau sind die Sorten 'Centrum' (seit 2003) und 'Hermann' (seit 2005), die beim Resistenzniveau mit Stufe 2 eingeordnet sind und hohe Erträge bringen. Sie sind damit ein fester Bestandteil für einen integrierten Bekämpfungsansatz.

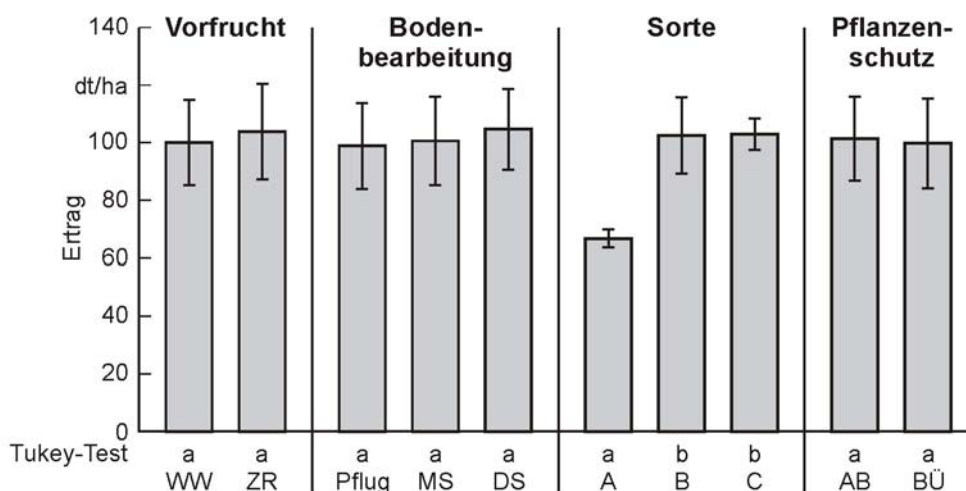


Abb. 30: Einfluss von Vorfrucht, Bodenbearbeitung, Sorte und Pflanzenschutz auf den Ertrag von Winterweizen auf dem Standort Adenstedt, 1999-2003 (Brunotte & Oldenburg, 2004a)

2b Auswirkungen einer Blütenspritzung auf Ertrag und DON-Gehalt bei Weizen

Das Jahr 2002 zeichnete sich durch eine Witterung mit erhöhtem Risiko für eine Fusariuminfektion aus. Zum Anbau kam die mittel anfällige Sorte 'Certo' mit Stufe 5 (Bundessortenliste) in den bekannten vier Bodenbearbeitungsvarianten P/MSmL/MSoL/DS. In den betriebsüblichen Varianten (= BÜ) erfolgte eine Fungizidbehandlung mit den Wirkstoffen Azoxystrobin, Fenpropidin, Propiconazol und Tebuconazol (Mittel Amistar + Gladio) als 80 % der Ähren geschoben waren. Zwischen den Niederschlägen in der Blüte dienten in der Variante "Applikation zur Blüte" (= AB) ausschließlich die Azolfungizide mit Wirkstoff Tebuconazol und Metconazol (Folicur + Caramba). Der Versuch 2b ist im Versuch 2a enthalten.

In den Varianten Pflug und MSmL kam es zu einer geringen bis mittleren Reduzierung des **DON-Gehaltes** von 2,2 auf 1,8 mg/kg (ca. 20 %) bzw. von 2,7 auf 1,6 mg/kg (ca. 40 %), bei der Direktsaat um eine deutliche Minderung von 5,4 auf 2,6 mg/kg (ca. 50 %), die MSoL reagierte nicht (**Abb. 31**). Dies bestätigten Feldergebnisse anderer Versuchsansteller, wo Wirkungsgrade bis >50 % erreicht wurden (Oerke et al, 2002; Bartels & Rodemann, 2003).

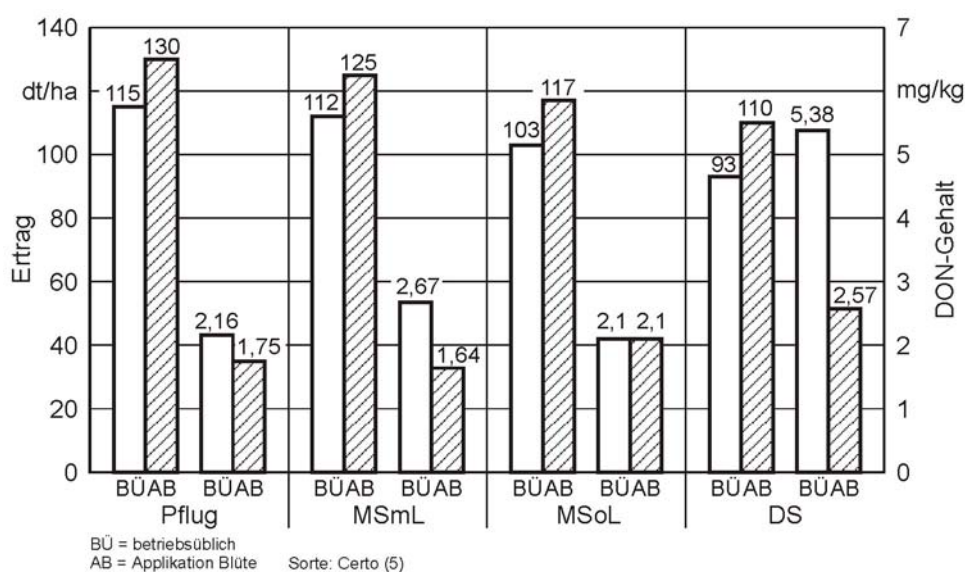


Abb. 31: Auswirkungen gezielter Blütenspritzung bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Ertrag und DON-Gehalte von Winterweizen (Brunotte & Oldenburg, 2003)

Die **Erträge** reagierten alle positiv auf die Blütenspritzung: Pflug, MSmL und MSoL mit 13-15 dt/ha und Direktsaat sogar mit 17 dt/ha. Die Blütenspritzung hatte nicht in allen Varianten zu einer Reduzierung des DON-Gehaltes geführt, wohl

aber zu einer Reduzierung bei der partiellen Taubährigkeit und damit den Kümmerkornanteil zurückgedrängt.

Zwischenfazit:

- *Der Versuch zeigt, dass ungünstige Witterung ausschlaggebend für die Mykotoxinbildung ist. Vorsorglich getroffenen Maßnahmen, wie z. B. die Pflugfurche ergänzt durch eine Blütenspritzung haben nicht ausgereicht, den DON-Gehalt auf ein Niveau zu reduzieren, um die von der EU gesetzten Höchstmengen einzuhalten. Das bedeutet, dass Fruchtfolgegesichtspunkte und Sortenwahl zukünftig mehr in die Vermeidungsstrategien mit zu integrieren sind, um bei ungünstigen Witterungskonstellationen während der Blüte, die geforderten Grenzwerte einzuhalten.*

Untersuchung 3: Systemvergleich von Bodenbearbeitungsverfahren in einer Mais-Getreide Fruchtfolge

Die 2003 begonnene Versuchsanlage am Standort Völkenrode (FAL-Versuchsflächen) ist zur Untersuchung des Zusammentreffens einer unterschiedlichen Zahl und Kombination von Risikofaktoren gekennzeichnet:

- Fruchtfolge: Silomais – Winterweizen – Winterweizen;
- Bodenbearbeitung: Pflug (P), Mulchsaat mit Lockerung mit Häckseln der Maisstoppel (MSmL-mH), Mulchsaat mit Lockerung ohne Häckseln (MSmL-oH);
- Maissorten: 'Elektra' (hoch anfällig für Stängelfäule), 'Prinz' (gering anfällig);
- Weizensorten: 'Ritmo' (hoch anfällig für Ährenfusariosen, Stufe 7 BSL), 'Centrum' (gering anfällig, Stufe 2 BSL);
- Fungizideinsatz Fahnenblatt/Ähre: Azol ohne Wirkung auf Fusarien;
- Trennstreifen zwischen 1.600 m² großen Versuchspartzellen: Winterroggen;
- Beregnung während der Blüte mit Großflächenregner.

Dieser mehrfaktorielle Versuch dient dazu, die Wechselbeziehungen der aufgeführten Parameter zu quantifizieren.

Um die Einflussfaktoren realistisch abzubilden, werden Großflächentechnik bei der Bewirtschaftung eingesetzt, ein natürliches Infektionsrisiko durch Maisrückstände hergestellt und durch gezielte künstliche Beregnung sichere Infektionsbedingungen geschaffen. Als Beurteilungsparameter gelten Ertrag und DON-Gehalte bei Maisstängeln und im Weizenkorn.

Um das Potenzial einer Vorsorgestrategie auszuschöpfen, sind nicht nur die Weizen-, sondern auch die Maissorten in ihrer Anfälligkeit unterschiedlich. Der Beitrag der Gerätetechnik wird neben der Optimierung der Bodenbearbeitungsvarianten ergänzt durch zusätzliches Häckseln der Maisstoppeln mit einem Grünbracheschlegler. Zur Darstellung der Wechselbeziehungen werden erste Ergebnisse ausschnittsweise erläutert:

3a Infektionsrisiko für Fusarien durch unterschiedliche Maissorten

Einem möglichen Einfluss der Stängelfäule bei Maissorten auf die Mykotoxinentwicklung bei Weizen, wird im ersten Schritt nachgegangen. Die Toxinmenge (= DON-Gehalt) korreliert positiv mit der gebildeten Pilzmenge auf den Maisstängeln, weil das Toxin während des Wachstums konstant gebildet wird. In 2004 liegen die **DON-Gehalte** der hoch anfälligen Sorte 'Elektra' 1,8- bis 12,5-fach und in 2005 1,7- bis 2,7-fach höher als die Gehalte der wenig anfälligen Sorte 'Prinz' (**Abb. 32**). Auffällig sind die hohen DON-Gehalte der Sorte 'Elektra' nach Pflug, obwohl die Bodenbearbeitung zu Mais zunächst keinen Einfluss erwarten lässt.

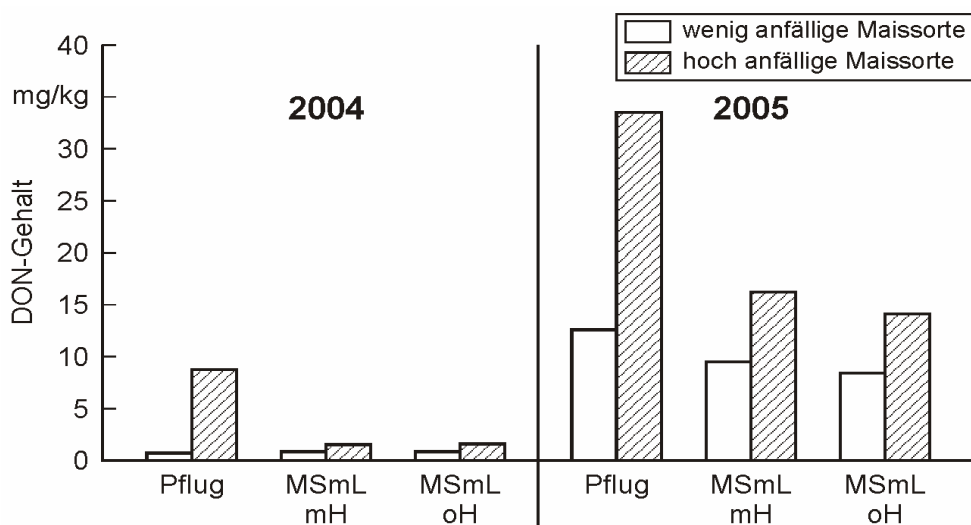


Abb. 32: DON-Gehalte von Silomais-Rückständen unterschiedlich anfälliger Maissorten für Stängelfäule (Brunotte et al., 2005b)

Zwischenfazit:

- *Inwieweit unterschiedliche DON-Gehalte der Maisrückstände die Mykotoxingehalte im Weizen beeinflussen, wird zurzeit in Versuchen geklärt. Bei Bestätigung der Hypothese, wäre die Maissorte ein weiterer Bestandteil einer Vorsorgestrategie. Insgesamt wird eine frühe Sorte immer befallsmindernd wirken, da nach der Ernte den Bodenorganismen mehr Zeit und bessere Umweltbedingungen für den Abbau der Stoppelreste zur Verfügung stehen.*

3b Einfluss von Vorfrucht, Zerkleinerungsgrad, Bodenbearbeitung, Mais- und Weizensorte auf den DON-Gehalt von Weizen

Das Nachhäckseln von Silomaisstoppeln mit einem Grünbracheschlegler dient dazu, diese Rückstände "mundgerecht" für den Abbau durch Bodenlebewesen, hauptsächlich Regenwürmer, verfügbar zu machen. Die Stoppeln werden nur dann ausreichend zerkleinert, wenn sie aufrecht stehen – beim Ernten ist deshalb möglichst zwischen den Reihen zu fahren. **Abbildung 33** zeigt, dass durch den Pflugeinsatz bei Silomais in der Regel eine vollständige Beseitigung der Pflanzenrückstände erreicht wird. Durch das Nachhäckseln reduzieren sich die Maisreste bis zur Blüte des Weizens je nach Jahr auf 25-63 g TS/m² (entsprechend 46-63 %).

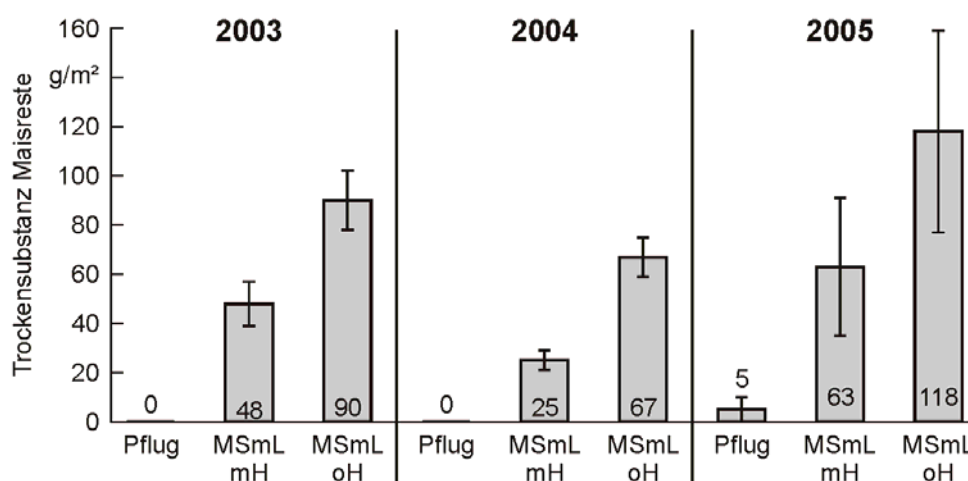


Abb. 33: Silomais-Rückstände an der Bodenoberfläche nach unterschiedlicher Zerkleinerung und Bodenbearbeitung (Brunotte et al., 2005c)

Im Stoppelweizen (**Abb. 34**) lagen die **DON-Gehalte** der gesunden Weizensorte 'Centrum' unter der Nachweisgrenze, unabhängig von der Bodenbearbeitung. Die hoch anfällige Sorte 'Ritmo' wies einen Wert von 0,5 mg/kg auf.

Ein deutlich höheres Niveau der DON-Gehalte bei Weizen wurde bei Vorfrucht *Silomais* festgestellt. Die linken drei Säulen im rechten Abschnitt stellen hinsichtlich Sorten den "*best case*" dar: auf die gesunde Maissorte 'Prinz' folgt die gering anfällige Sorte 'Centrum'. Das Nachhäckseln reduziert in der Mulchsaat den DON-Gehalt um etwa 0,2 mg/kg (ca. 40 %), der Pflug um weitere 0,1 mg/kg (ca. 20 %). Dieser Weizen stellt weder als Lebensmittel, noch als Futtermittel ein Risiko dar.

Die rechten drei Säulen stellen den "*worst case*" dar, mit der für Stängelfäule anfälligen Maissorte 'Elektra' und der für Ährenfusariosen hoch anfälligen Wei-

zensorte 'Ritmo'. Wird bei der Mulchsaat auf das Nachhäckseln verzichtet, liegt der DON-Gehalt mit 1,78 mg/kg Weizen in einem für Nahrungs- und Futtermittel kritischen Bereich. Durch das Nachhäckseln wird den Pflanzenrückständen eine physikalische Struktur gegeben, die es den Bodenorganismen erleichtert, das Material sehr viel besser abzubauen. Der Pflug senkt den DON-Wert im ersten Jahr um weitere 0,5 mg/ kg.

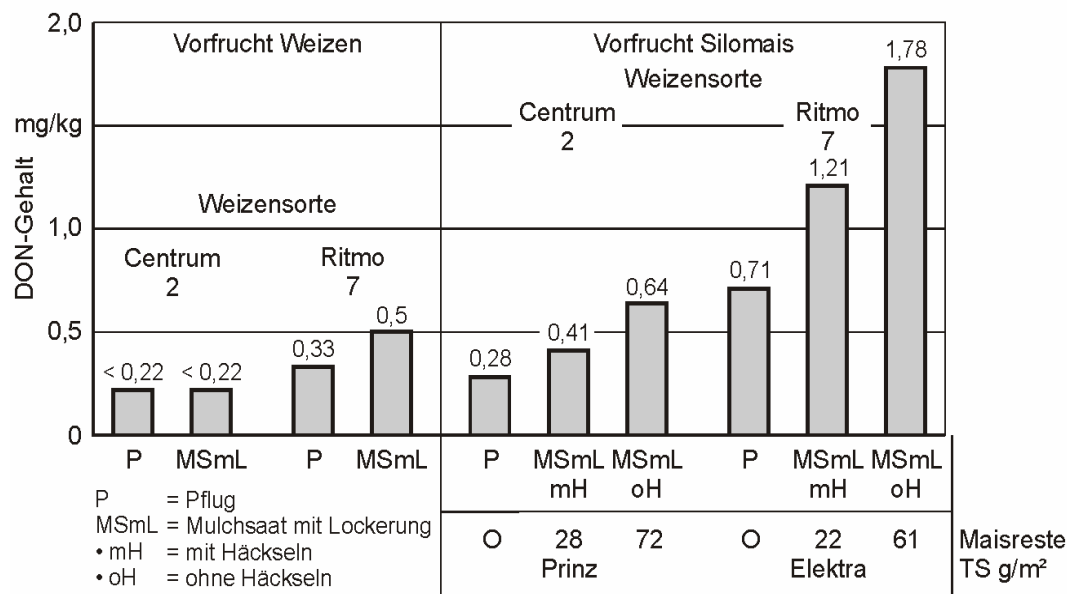


Abb. 34: Mykotoxingehalte im Winterweizen in Abhängigkeit von Vorfrucht, Sorte 1-3 und Bodenbearbeitung (Brunotte & Oldenburg, 2004b)

- Aus den Ergebnissen wird die **Schlussfolgerung für These 8** abgeleitet: Die Auswahl von Geräten und Verfahren zur 'Konservierenden Bodenbearbeitung' und Direktsaat hinterlassen unterschiedliche Mengen an Pflanzenrückständen auf der Bodenoberfläche. Der bessere Bodenschutz bedeutet ein erhöhtes Infektionsrisiko für Pflanzenkrankheiten. Die Bekämpfungsstrategien gegen Fusarien fordern deshalb ein Abwägen zwischen Maßnahmen zum Bodenschutz und zur Sicherung der Produkt- und Nahrungsmittelqualität. Bausteine einer Gesamtstrategie zur Reduzierung des Befallsdruckes können bei vorgegebener Fruchtfolge das Nachhäckseln von Pflanzenreststoffen, eine intensive Einarbeitung mit Grubberscheibeneggenkombinationen, die Wahl gesunder Sorten und evtl. eine kurative Blütenspritzung mit Azolfungiziden sein.

5 Konservierende Bodenbearbeitung zwischen Boden-, Gewässer- und Verbraucherschutz

Landbewirtschaftung fordert vom Bewirtschafter eine standortspezifische Einsatz- und Bearbeitungsstrategie mit dem Ziel, acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen und den Einsatz von Geräten unter Berücksichtigung der Rentabilität zu optimieren. Dabei sind unerwünschte Nebeneffekte, wie z. B. Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide, so weit wie möglich zu vermeiden. Mit der Art, Tiefe und Häufigkeit der Bodenbearbeitungsmaßnahmen greift der Landwirt in das komplexe Wirkungsgefüge "Boden-Wasser-Pflanze-Atmosphäre" ein, so dass aufgrund der vielen Wechselbeziehungen neben der Zielerreichung schnell ein Zielkonflikt entstehen kann. In **Abb. 35** sind die komplexen Wechselbeziehungen dargestellt.

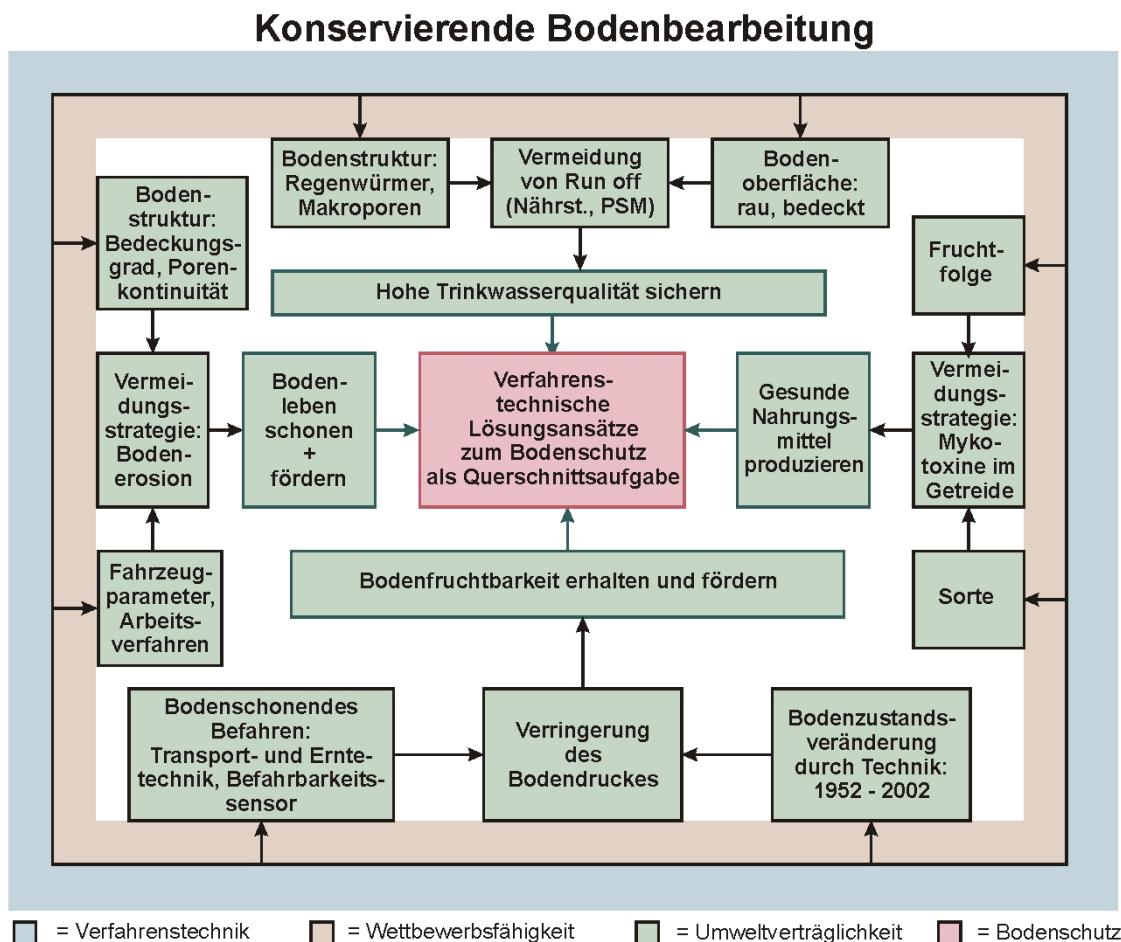


Abb. 35: Einfluss 'Konservierender Bodenbearbeitung' auf Bodenschadverdichtung, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide

Die Verfahrenstechnik mit dem Einsatz von Geräten und der Verfahrensablauf ganzer Mechanisierungsketten beeinflussen

- die Tragfähigkeit bzw. Befahrbarkeit des Bodens,
- die Bodenoberfläche mit dem Bedeckungsgrad,
- die Rauigkeit der Oberfläche und
- das Infektionsrisiko für Pflanzenkrankheiten.

Um Vermeidungsstrategien langfristig auf den Betrieben zu etablieren, sind sie auch auf ihre Wettbewerbsfähigkeit zu analysieren. Dabei ist, neben der Betrachtung von Kosten und Erlösen der einzelnen Früchte, eine Kosten-Nutzen-Analyse bzw. Nutzwertanalyse der Bodenschutzmaßnahmen durchzuführen.

Zur Verminderung von **Bodenschadverdichtungen** sind alle Maßnahmen auf die Verringerung des Bodendruckes auszurichten. Dabei entscheidet der Status quo des Bodenzustands unter heutiger und zurückliegender Bewirtschaftung über Dringlichkeit und Ausprägung der Vorsorgemaßnahmen. Richtet sich der Bodendruck danach aus, die Bodenfunktionen nicht zu schädigen, wird langfristig die Bodenfruchtbarkeit erhalten und gefördert.

Zur Vermeidung von **Bodenerosion** ist zum einen die Bodenoberfläche mit einem standortspezifischen Bedeckungsgrad zu versehen, so dass Oberflächenverschlammung bei erosiven Niederschlägen vermindert wird. Weiter fördern die organischen Rückstände an der Oberfläche die Aktivität der Regenwürmer, die für eine hohe Infiltrationsleistung durch die Porenkontinuität der Gänge sorgen. Die Gestaltung von Fahrzeugparametern und Arbeitsverfahren hat so zu erfolgen, dass die Funktionalität der Poren erhalten bleibt.

Zur Minderung von **Run off** mit darin gelösten bzw. sorbierten Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ist an der Oberfläche eine hohe Rauigkeit und Bedeckung zu schaffen, um flächen- und linienhaften Oberflächenabfluss zu reduzieren. Linienhafter Abfluss muss ggf. durch Begrünungsvarianten in den Fahrgassen zusätzlich verhindert werden. Induziert durch fein zerkleinerte Pflanzenreststoffe, schaffen Regenwürmer (*Lumbricus terrestris*) Makroporen, die hohe Niederschlagsmengen aufnehmen und schnell ableiten. Ausbringzeiten für Dünge- und Pflanzenschutzmittel dürfen nicht vor heftigen Gewitterregen liegen, um das Austragsrisi-

ko zu mindern. Nur so kann auch aus Oberflächenwasser qualitativ hochwertiges Trinkwasser gewonnen werden.

Die **Präventivmaßnahmen zur Vermeidung der Mykotoxinbildung** im Getreide beziehen neben der gleichmäßigen Strohverteilung und intensiven Stroheinarbeitung die Fruchtfolge und Sorte mit ein. Die Kombination von befallsmindernden Maßnahmen reduziert besonders unter ungünstigen Witterungsbedingungen die Mykotoxinbelastung des Getreides und schafft damit gesunde Nahrungs- und Futtermittel.

Die skizzierten *verfahrenstechnischen Lösungsansätze zum Bodenschutz* tangieren demnach nicht nur die in § 17 BBodSchG aufgeführten Parameter "Bodenbearbeitung, Bodenstruktur, Bodenverdichtungen, Bodenabtrag und biologische Aktivität", sondern mit dem Thema "Run off" auch den Bereich **Gewässerschutz** und mit dem Thema "Mykotoxine" auch den Bereich **Verbraucherschutz** und stellen damit eine Querschnittsaufgabe dar. Die 'Konservierende Bodenbearbeitung' nimmt mit all ihren Variationen entscheidenden Einfluss auf die genannten Bereiche mit ihren vorhandenen Wechselbeziehungen.

Werden also in einem Bereich, z. B. im Bodenschutz, Vorsorgemaßnahmen durchgeführt, können sich in einem anderen Bereich, wie z. B. Mykotoxine, unerwünschte Nebenwirkungen ergeben. Dieser Zielkonflikt ist durch eine Abwägung, Gewichtung und Technikfolgenabschätzung zu lösen. Die Wechselbeziehungen der in Abb. 35 dargestellten vier Bereiche "Bodenschadverdichtungen", "Bodenerosion", "Run off" und "Mykotoxine" sind sehr komplex und wenig durchsichtig. Es ist grundsätzlich keine Hierarchie vorhanden. Die Problematik vor Ort mit der daraus abgebildeten Brisanz und Dringlichkeit der Problemlösung eines Bereichs entscheidet über die Hierarchie.

Im Sinne der Zielerreichung und Konfliktlösung wird das Übersichtsschema (siehe Abb. 35) mit all seinen Wechselbeziehungen entflochten. Es werden Szenarien entworfen, in denen der dominierende Problembereich und die Problemlösung vorrangig behandelt werden. Dies gelingt, indem vier Pyramiden mit dem Hauptproblem an der Spitze gebildet werden. Im Rahmen der Problemlösung wird die Beziehung zu den anderen Bereichen aufgezeigt (siehe Abb. 36-39).

Bei der Diskussion der Szenarien fließen die Verfahrenstechnik und die Wettbewerbsfähigkeit der Verfahren mit ein. Aus den aufgezeigten Wechselbeziehungen leitet sich die folgende zusammenfassende These ab:

These 9: 'Konservierende Bodenbearbeitung' ist ein standort- und fruchtfolge-spezifisches Bewirtschaftungssystem, das langfristig die Förderung der Bodenfruchtbarkeit verfolgt und dabei unerwünschte Nebeneffekte, wie Bodenschadverdichtung, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide, zu vermeiden sucht.

(1) Problemlösung Bodenschadverdichtung

Das **Problem Bodenschadverdichtung** tritt vornehmlich im Vorgewendebereich auf, wenn bei feuchtem, lockerem Boden mit hoher Radlast und hohem Reifeninnendruck ein Bereich häufig überrollt wird. Weiter steigt das Risiko für Bodenschadverdichtung, wenn in Regionen mit hohen saisonalen Niederschlägen die Zeitspannen für Feldarbeitstage stark eingeschränkt sind und aus Kostengründen die Erntemaschinen hoch ausgelastet werden müssen. Als Beispiel kann die Ernte von Zuckerrüben und Silomais an der Westküste Schleswig-Holsteins oder im westlichen Vorharz angeführt werden.

Die Vorsorgestrategie – für das Vorgewende wie für die Fläche – bildet das Konzept für 'Bodenschonendes Befahren' als Grundvoraussetzung für ein flexibles Einsatzmanagement insbesondere von Ernte- und Transportmaschinen. Sowohl Standort- als auch Fruchtfolgebedingungen geben die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden vor und bestimmen im Vorfeld die Auswahl und Ausstattung von Fahrwerken. Zukünftig ist es denkbar, dass sich der Maschineneinsatz mithilfe einer Online-Erfassung der Befahrbarkeit an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden anpasst.

Die Fähigkeit des Bodens, hohe Lasten zu tragen, wird durch eine schonende Lockerung am meisten gestärkt. Dabei spielt insbesondere die Art der Lockerung und die Lockerungstiefe eine Rolle. Je flacher und je weniger intensiv in den Boden eingegriffen wird, umso stabiler und tragfähiger ist das Gefüge. Damit die Bodenfunktionen bei einer dichteren Lagerung gewährleistet sind, ist eine Durchporung außerordentlich wichtig. Durch den Verzicht auf den Pflug und den Einsatz von nichtwendenden Geräten wie Scheibenegge und 4-balkiger Grubber, verbleibt

ein Großteil der Strohreste an der Bodenoberfläche. Gut zerkleinert und gleichmäßig verteilt, induzieren sie eine hohe biologische Aktivität, insbesondere die des *Lumbricus terrestris*, der eine Vielzahl von biogenen Vertikalporen anlegt und die Bodenfunktionen erhält. Problemlösungen und Beziehungen zu anderen Bereichen können anhand einer Pyramide herausgearbeitet werden. Dabei sagt die Stärke der Verbindung etwas über die Bedeutung und Gewichtung aus, die Farbe "grün" steht für eine positive, die Farbe "rot" für eine negative Abhängigkeit.

Zwischen der **Problemlösung Bodenschadverdichtung** und **Bodenerosion** besteht eine enge positive Korrelation (**Abb. 36**), da eine flache, wenig häufige Bearbeitung nicht nur eine hohe Tragfähigkeit für schwere Maschinen zur Verdichtungsvermeidung liefert, sondern auch durch den hohen Bedeckungsgrad eine bestmögliche Erosionsvermeidung liefert. Voraussetzung für die Etablierung der Pflanzenbestände sind allerdings spezielle Mulchsaattechniken mit Räumscheiben bzw. Meißelscharen. Schneidscheibenschare haben bei hohen Strohmenngen Probleme mit einer sicheren Saatguteinbettung.

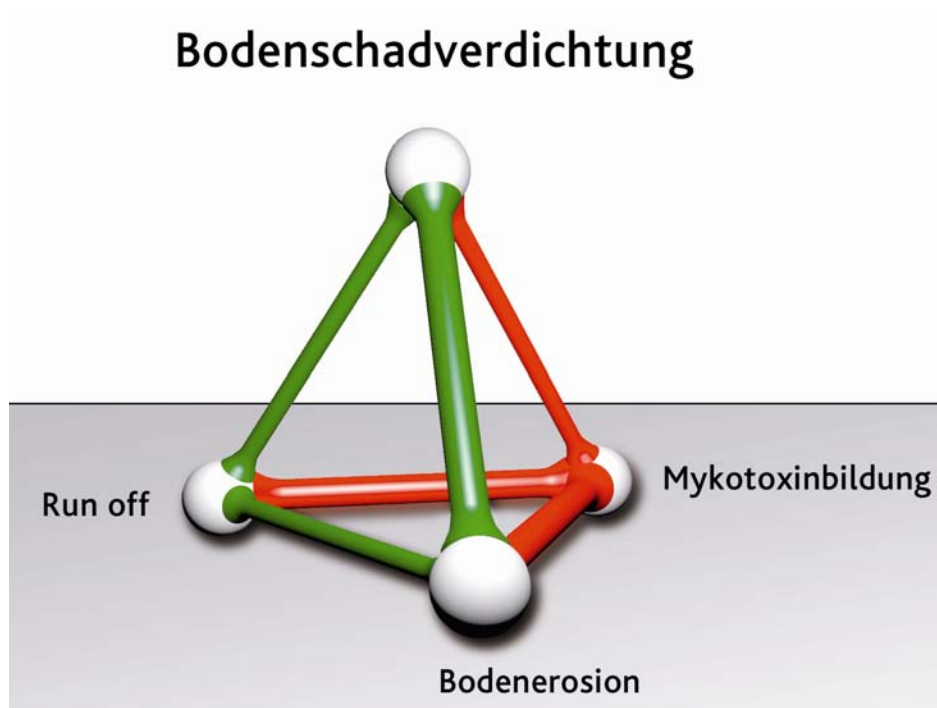


Abb. 36: Wechselwirkungen zwischen **Bodenschadverdichtung**, **Bodenerosion**, **Run off** und **Mykotoxinbildung** (grün = positive, rot = negative Abhängigkeit)

Eine starke Durchporung des Bodens lässt viel Wasser infiltrieren, was in Trockenperioden den Pflanzen zur Verfügung steht. Im Herbst ermöglicht eine hohe Infiltrationsleistung Erntearbeiten bei geringeren Bodenfeuchten. Die wenig gelocker-

te Krume bedeutet eine Einsparung von Arbeitsgängen. Dies senkt zusätzlich Kosten der Arbeiterledigung. Wird bei der Weizenbestellung nach Zuckerrüben der Pflug durch den Grubber (krumentief) ersetzt, werden bei den Herstellungskosten je nach Standort ca. 1 €/dt Weizen eingespart, wird der tiefe Grubbereinsatz durch einen flachen Arbeitsgang ersetzt, werden ca. 0,4 €/dt eingespart (Brunotte & Wagner, 2001).

Ein ähnlich positiver Effekt besteht auch zwischen der **Problemlösung Bodenschadverdichtung** und **Run off**. Durch verlängerte Bodenruhe und die Vielzahl an senkrechten Makroporen wird zunächst Oberflächenabfluss gemindert. Damit die Poren in ihrem senkrechten Verlauf und mit hoher Kontinuität erhalten bleiben, sind alle Maßnahmen beim Einsatz von Fahrzeugen auf einen geringen Bodendruck auszurichten. Dieser sollte bei feuchten Bedingungen der Verdrängungskraft für Boden der tiefgrabenden Regenwürmer von ca. 1 bar entsprechen. Fahrwerke mit breiten Reifen, geringem Reifeninnendruck und reduziertem Schlupf können bei verdichtungsempfindlichem Bodenzustand zu einem Stauchen der Gänge führen, nicht aber zu einem Abscheren.

Auf die Pflugfurche ist möglichst zu verzichten, da es an der Krumbasis zu einem Abschneiden der kontinuierlichen Makroporen kommen kann. Die Minderung von Bodendruck gilt besonders für die Fahrgassen. Breite Reifen am Traktor mit Anhängespritze lassen <1 bar Reifeninnendruck zu und schaffen geringe Spurtiefen, um linienhaftem Oberflächenabfluss bestmöglich vorzubeugen. Wie viele Wirkstofffrachten mit dem Oberflächenabfluss bzw. dem Makroporenfluss transportiert werden, hat wenig mit dem Ausmaß an Bodenverdichtungen zu tun.

Zwischen der **Problemlösung Bodenschadverdichtung** und **Mykotoxinbildung** besteht nur indirekt eine leicht negative Beziehung. Sie ist vom Bedeckungsgrad abhängig, der allerdings der Abtragsminderung zuzuordnen ist. Allerdings können schädliche Bodenverdichtungen aufgrund von eingeschränktem Wachstum und Nährstoffaufnahme die Vitalität der Pflanzen mindern, was leichter zu Infektionen von Pflanzenkrankheiten führen kann.

(2) **Problemlösung Bodenerosion**

Das **Problem Bodenerosion** ist eine Folge von Oberflächenverschlammung und Oberflächenabfluss. Steile Hänge, große erosive Hanglängen und fehlende Bodenbedeckung bei weitreihigen Sommerungen sind die Hauptursachen. Im südlichen

Niedersachsen, im Kraichgau und in weiten Teilen Bayerns liegen diese Gegebenheiten vor. Das Gefährdungspotenzial nimmt enorm zu, wenn bei hoher Erosionsanfälligkeit weitreihige Blattfrüchte in der Fruchtfolge hintereinander stehen, wie z. B. Mais nach Zuckerrüben bzw. Mais als Monokultur. Eine zum Teil späte Ernte im Herbst, schnell verrottbare Pflanzenrückstände wie Zuckerrübenblatt und eine späte Aussaat der Sommerung Mais im Frühjahr stellen eine lange bedeckungsfreie Zeit und damit ein hohes Risiko für die Bodenfruchtbarkeit dar. Mosimann et al. (2004) beschreiben diese Betriebssituation mit der Gefährdungsstufe 3 und 2 (vgl. Abb. 16).

Bedeckung der Bodenoberfläche durch organische Rückstände bzw. Kulturpflanzen mindern Oberflächenverschlammung als Auslöser für Oberflächenabfluss und -abtrag und stellen damit den einzig wirksamen Schutz der Oberfläche dar – die **Problemlösung Bodenerosion**. Der Bedeckungsgrad durch organische Rückstände ist damit der Schlüsselindikator zur Beschreibung der aktuellen Erosionsanfälligkeit von Standorten. Je höher die Erosionsgefährdung von Ackerschlägen ist, umso höher muss der Bodenbedeckungsgrad in der vegetationslosen Zeit gewählt werden. Dabei sind Bearbeitungsintensität und die Eingrifftiefe zu reduzieren, was eine sehr gleichmäßige Querverteilung der Strohrückstände fordert.

Die Voraussetzung für einen hohen Bedeckungsgrad ist eine Fruchtfolge, in der die Halmfrucht vor der weitreihigen Blattfrucht steht. Sollen zusätzlich Zwischenfruchtreste den Bedeckungsgrad erhöhen, ist eine früh räumende Halmfrucht erforderlich, um die Zwischenfrucht zu etablieren. Die Kosten der Zwischenfruchtbestellung fallen nur bei kurzfristiger Betrachtung ins Gewicht. Werden im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse auch der Bodenschutzeffekt, die Wirkung einer zusätzlichen Gründüngung und das geringere Risiko für Umbruch und Neueinsaat berücksichtigt, kann z. B. im Zuckerrübenanbau ein Nutzen von 50-100 €/ha entstehen (Brunotte et al., 1995). Dies hat dazu geführt, dass in erosionsgefährdeten Gebieten bei 'Konservierender Bodenbearbeitung' von Zuckerrüben eine hohe Akzeptanz bis zu 70 % zu verzeichnen ist.

Die zur **Problemlösung Bodenerosion** hohen Bedeckungsgrade wirken auch positiv auf das Ausmaß von **Run off**, da Oberflächenabfluss der Auslöser von Bodenerosion ist (**Abb. 37**). Fließt kaum Wasser hangabwärts, werden keine Düngemittel und Pflanzenschutzmittel ausgetragen. Um Vertiefungen an der Bodenoberfläche

und damit linienhaften Abfluss zusätzlich zu vermeiden, sind zur Bestellung breite Reifen mit Reifeninnendrücken <1 bar zu wählen.

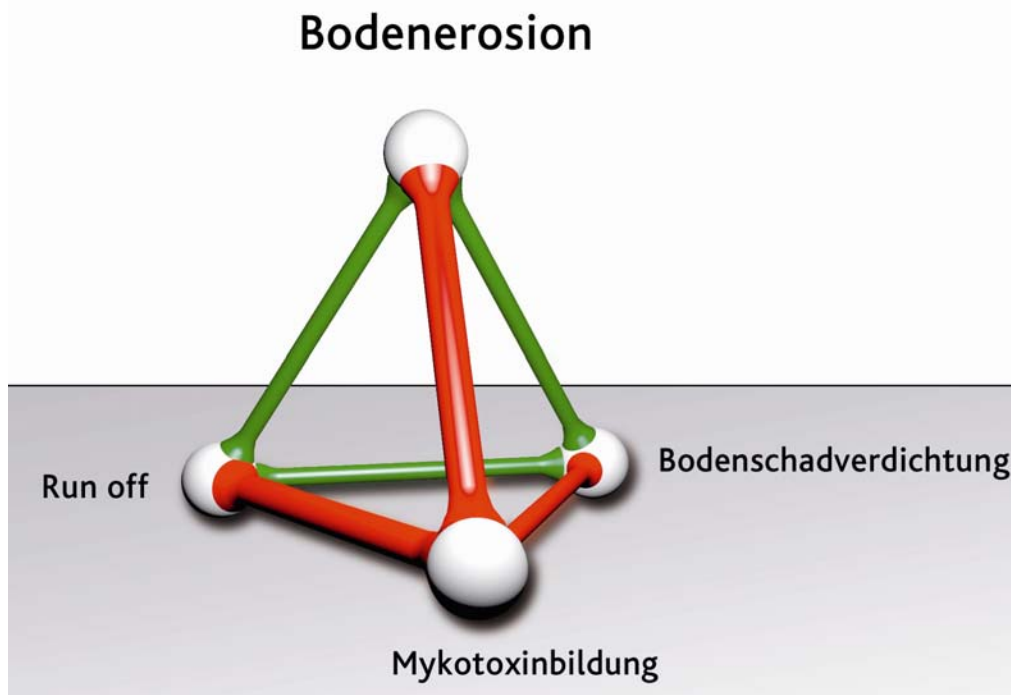


Abb. 37: Wechselwirkungen zwischen **Bodenerosion**, Run off, Bodenschadverdichtung und Mykotoxinbildung (grün = positive, rot = negative Abhängigkeit)

Wenig Eingriffsintensität schafft ein stabiles Bodengefüge und beugt damit bestmöglich **Bodenschadverdichtungen** (siehe Abb. 36) vor. Der Einsatz von bodenschonenden Fahrwerken und eine geringe Überrollhäufigkeit erhalten die hohe Infiltrationsleistung von kontinuierlichen Vertikalporen.

Ein starker Zielkonflikt tritt zwischen **Problemlösung Bodenerosion** und **Mykotoxinbildung** (Abb. 37) auf, insbesondere wenn Weizen dem Mais folgt. Ist die Minderung von Bodenerosion das prioritäre Ziel und ist die Fruchtfolge aufgrund betriebsspezifischer Rahmenbedingungen festgelegt, sind alle möglichen Präventivmaßnahmen miteinander zu kombinieren. Es ist eine frühe Maissorte mit geringer Anfälligkeit gegen Stängelfäule zu wählen. Unmittelbar nach der Ernte sind die Stoppeln nachzuhäckseln und mit einer Grubber-Scheibeneggen-Kombination intensiv einzuarbeiten. Anschließend folgt die Mulchsaat von Weizen mit einer gering anfälligen Sorte für Ährenfusarien der Stufe 2-3 nach der Bundessortenliste. Die Fungizidstrategien sollten so gewählt werden, dass bei ungünstiger Witterung während der Blüte eine Applikation mit systemischen Fungiziden (Azole) möglich ist. Die Arbeitsgänge Nachhäckseln und Einarbeiten sind nicht kostenintensiver als

eine Pflugfurche. Auch erreichen heute die neuen Weizensorten mit hohem Resistenzniveau gegen Ährenfusarien annähernd hohe Erträge wie die konventionellen Sorten.

Reichen die aufgezeigten Präventivmaßnahmen nicht aus, Fusarien unbelastetes Getreide zu produzieren, können weitere Verbesserungen nur noch über die Veränderung der Fruchtfolge erzielt werden. Dies hätte auch positive Wirkungen auf die Verminderung von Erosion, da Maisrückstände durch das enge C/N-Verhältnis einer schnellen Verrottung unterliegen und keinen wirksamen Bodenschutz bis zum Aufgang des nachfolgenden Weizens darstellen. So kann z. B. nach einer vorgezogenen Maisernte Grünroggen ausgesät werden, der über Winter einen Beitrag zum Bodenschutz liefern kann. Im Frühjahr werden nach Abspritzen mit einem nichtselektiven Herbizid z. B. Zuckerrüben oder Erbsen als Mulchsaat bestellt. Mais kann auch in der Ebene als Monokultur angebaut werden. In den Hanglagen erfolgt dann eine Raps-Getreide-Fruchtfolge.

Die Bedeckung von 40 % der Ackerfläche eines Betriebes über Winter und eine ausgewogene Fruchtfolge sind "cross-compliance-relevant", unterliegen damit der Direktzahlungen-Verpflichtungsordnung und haben Einfluss auf die Rentabilität der Betriebe. So konnte in einem Verbundprojekt die 'Konservierende Bodenbearbeitung' in einer aufgelockerten Fruchtfolge (Raps-Weizen-Erbsen-Weizen) 20 €/ha höhere Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAL) im Vergleich zu einer engen Fruchtfolge (Raps-Weizen-Weizen-Weizen) erzielen (Brunotte & Korte, 2005).

Erosionsvermeidung in einer Mais-Getreide-Fruchtfolge stellt höchste Anforderungen an das Betriebsmanagement. Ein Abwägungsprozess zwischen vorrangigen Bodenschutzmaßnahmen und Präventivmaßnahmen, die den Befallsdruck für Fusarien unter Berücksichtigung der Rentabilität mindern, ist hier Bestandteil einer 'Integrierten Landbewirtschaftung'.

(3) Problemlösung Run off

In Regionen Deutschlands, wo Trinkwasser aus Oberflächenwasser gewonnen wird, ist die **Problemlösung Run off** bei den acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen vorrangiges Ziel und wird von den Wasserwerken gefordert. Die Austragsfrachten von Run off werden vom Zeitpunkt der Applikation vor heftigen Gewitterregen und dem Niederschlagswasser bestimmt, das oberflächlich bzw. durch Ma-

makroporenfluss den Acker verlässt. Somit dienen alle **erosionsmindernden Maßnahmen** auch der Minderung von Oberflächenabfluss, der auslösend für Bodenabtrag ist (**Abb. 38**). Oberflächiger Abfluss stellt mit ca. 60 % den Hauptaustragspfad auf Ackerflächen dar und wird mit einer vorsorgenden Erosionsminderung bestmöglich vermieden.

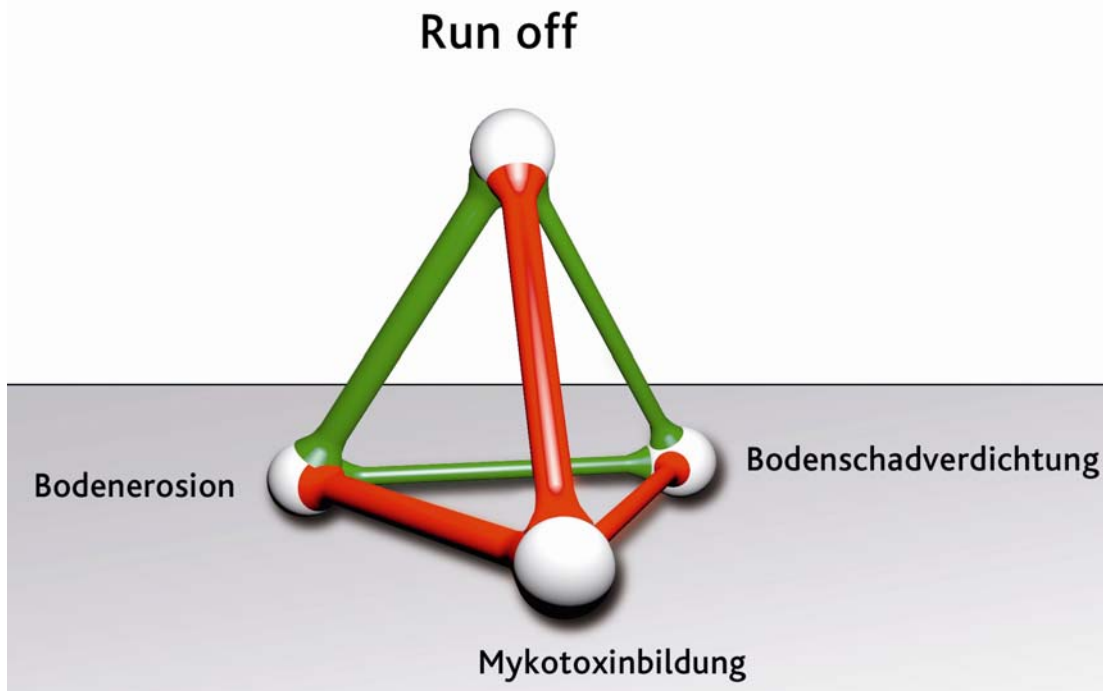


Abb. 38: Wechselwirkungen zwischen **Run off**, Bodenerosion, Bodenschadverdichtung und Mykotoxinbildung (grün = positive, rot = negative Abhängigkeit)

Makroporenfluss durch Drainagen ist nur mit 11 % am Austrag beteiligt. Die Anzahl der Makroporen wird induziert durch Regenwurmaktivität, die zur Nahrungsaufnahme eine Vielzahl von Pflanzenreststoffen mit <5 cm Länge benötigen. Die Poren sind erforderlich, um hohe Wassermengen im Boden aufzunehmen und am Abfließen zu hindern. Run off durch Makroporenfluss kann demnach nicht verhindert werden. Vielmehr ist für die Betriebsmittel ein Ausbringzeitpunkt zu wählen, der nicht unmittelbar vor erosiven Niederschlägen liegt, so dass sich vor dem nächsten Niederschlag Düngemittel und Herbizide bereits gelöst in der Bodenmatrix befinden. Das Hauptaugenmerk zur Minderung von Run off ist auf die Standortbedingungen und das Ausmaß von Starkregenereignissen zu legen, da sie einen weitaus größeren Einfluss haben als die Stoffeigenschaften von Pflanzenschutzmitteln bezüglich Abbau und Sorption. Das bedeutet, dass ein hoher Bedeckungsgrad zum Zeitpunkt erosiver Niederschläge Run off bestmöglich mindern hilft.

Die Beziehung zwischen **Problemlösung Run off** und **Bodenschadverdichtung** stellt sich positiv dar, weil alle Maßnahmen zur Minderung von Run off auch mindernd auf Bodenverdichtungen wirken. Wichtig ist die Ausrüstung der Fahrwerke mit bodenschonender Bereifung, um die Makroporen in ihrer Funktionalität zu erhalten. Hohe Rückstandsmengen an Mais- bzw. Weizenstoppeln wirken allerdings negativ auf die **Mykotoxinbildung** (Abb. 38) von Weizen. Hier sind alle Präventivmaßnahmen zu koppeln, um ein Höchstmaß an Vorsorge zu betreiben (siehe Abhängigkeit Bodenerosion – Mykotoxinbildung). Da das Pflugverfahren den höchsten Oberflächenabfluss bewirkt und Direktsaat den stärksten Makroporenfluss und durch hohe Bedeckungsgrade das höchste Infektionsrisiko für Fusariosen aufweist, bildet die Mulchsaat mit dem geringsten Austrag über Oberfläche und Makroporen den Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Zielen.

(4) Problemlösung Mykotoxinbildung

Die von der EU verabschiedete Mykotoxin-Höchstmengenverordnung gibt klare Grenzen nicht nur für verarbeiteten Weizen, sondern auch für Rohware vor. Die Erzielung hoher Erträge, eine sichere Vermarktung und ein akzeptables Risiko hinsichtlich Produkthaftung verlangen vom Betriebsmanagement eine sichere Vermeidung von Mykotoxinen im Getreide. Liegen in einer Region bzw. auf einem Betrieb beim Klima und den Bodenverhältnissen ein hohes Befallsrisiko vor, sind mehrere Präventivmaßnahmen zur **Problemlösung Mykotoxinbildung** zu kombinieren.

Für eine Zuckerrüben-Getreide-Fruchtfolge bedeutet dies zur Bestellung des Stoppelweizens, alle Maßnahmen der Rotteförderung durchzuführen. Bei der Strohzerkleinerung sind Häcksel von <5 cm herzustellen und diese gleichmäßig über die Fläche zu verteilen (VK <20 %). Eine zeitlich und in der Tiefe gestaffelte Bodenbearbeitung mit Scheibenegge und 4-balkigem Grubber hat für eine gleichmäßige Einarbeitung der Strohreste zu sorgen. Dabei wird die Lockerungstiefe in der Regel mehr von der gleichmäßigen Stroheinarbeitung und weniger von der Notwendigkeit einer Krumenlockerung bestimmt. Eine zusätzliche Stickstoff-Düngung beschleunigt die Strohrotte. Durch den Verdünnungseffekt des Strohs in der Krume sind die Bedeckungsgrade stark reduziert und liegen bei 15-30 %. Damit ist die Minderung von Verschlammung, Oberflächenabfluss und **Bodenerosion** eingeschränkt (**Abb. 39**). Da die Bodenoberfläche bis zum Feldaufgang vom Weizen ungeschützt ist, dürfen keinerlei Düngungs- und Pflanzenschutzmittel im Voraufbau ausgebracht werden, da sonst das Risiko für **Run off** deutlich ansteigen würde.

Mykotoxinbildung

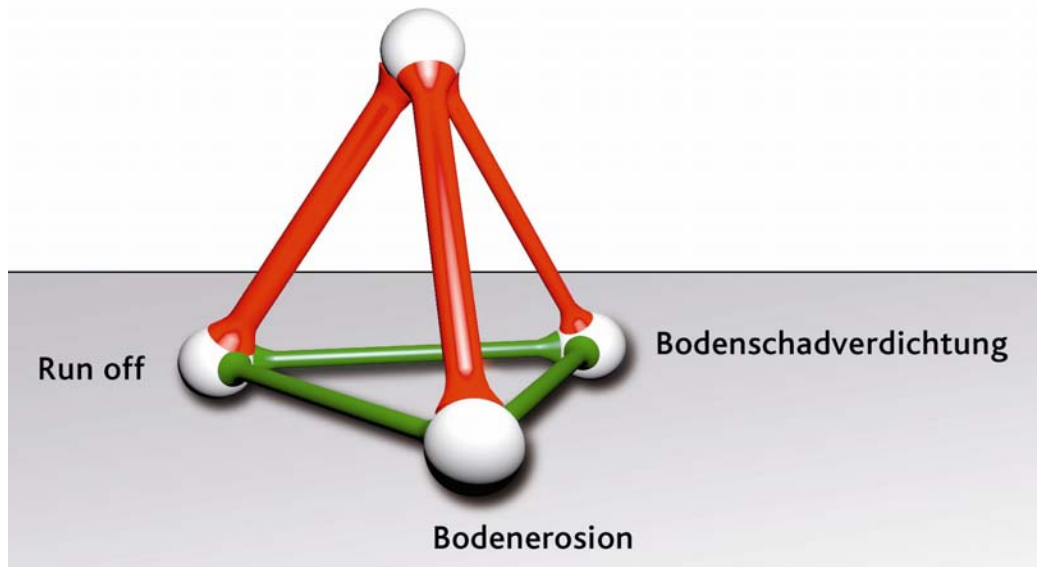


Abb. 39: Wechselwirkungen zwischen **Mykotoxinbildung**, Bodenerosion, Run off und Bodenschadverdichtung (grün = positive, rot = negative Abhängigkeit)

Eine frühe Weizensorte und eine etwas spätere Winterweizenbestellung um den 10. Oktober verlängern das Zeitfenster für Stoppelbearbeitung und Strohabbau. Auch bei Weizen als Vorfrucht sollten in infektionsreichen Regionen Sorten der Stufe 2-3 gegen Ährenfusarien angebaut werden. Die Witterung zur Blüte entscheidet über eine evtl. kurative Blütenspritzung mit Azolfungiziden. Werden bei Vorfrucht Mais und der Durchführung aller Präventivmaßnahmen die einzuhaltenen Höchstmengen beim DON-Gehalt überschritten, ist eine Umstellung der Fruchtfolge zusätzlich erforderlich.

Die intensive und tiefe Bodenbearbeitung zur Rotteförderung von Ernterückständen erzeugt ein verdichtungsempfindliches Bodengefüge mit der Gefahr von **Bodenschadverdichtungen**. Bei der Bestellung sind alle Anstrengungen einer gezielten Rückverfestigung mit Traktorreifen und Packerwalzen zu unternehmen, um eine gewisse Tragfähigkeit technisch wieder herzustellen. Dabei sind Packerwalzen einzusetzen, die nach dem Prinzip der "gezielten Heterogenität" arbeiten. Rückverfestigt wird nur der Saatgutablagebereich zur Erzielung eines hohen Feldaufgangs und der Zwischenbereich bleibt zur Förderung der Infiltration locker liegen. Wurde vor der Bestellung einer Frucht tiefer gelockert, sind insbesondere die Erntemaschinen mit Breitreifen und Reifeninnendrücker von 1,5-2,0 bar einzusetzen.

(5) Schlussbetrachtung

Landbewirtschaftung hat neben dem betrieblichen Ziel, einen hohen Gewinn zu erwirtschaften, eine Reihe von Bodenschutz- und Umweltauflagen zu erfüllen. Damit ist die Verantwortung des Betriebsleiters gestiegen und fordert sehr gute Kenntnisse zum Management und zu den Wechselbeziehungen der Umweltfaktoren. Die Maßnahmen der Landbewirtschaftung können zu unerwünschten Nebenwirkungen wie Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinen im Getreide führen. Da dies nicht nur für die Bodenfruchtbarkeit, sondern auch für die Qualität von Trinkwasser und Nahrungsmitteln nachteilig sein kann, sind alle Anstrengungen einer Vermeidung zu unternehmen.

Im Sinne einer 'Integrierten Landbewirtschaftung' sind die Problembereiche nach ihrem Gefährdungspotenzial mithilfe von **Umweltindikatoren** zu bewerten und die abgeleiteten Handlungsmaßnahmen nach Dringlichkeit umzusetzen. Dabei wirken die Strategien zu Bodenschadverdichtung, Bodenerosion und Run off positiv in eine Richtung, können allerdings bei Mykotoxinen einen Zielkonflikt hervorrufen. Infolgedessen hat ein sensibler Abwägungsprozess zu erfolgen, um die Handlungsempfehlungen richtig auszuwählen. Die Tiefe und Intensität der Bodenbearbeitung nehmen dabei eine entscheidende Steuerungsfunktion ein und können im Rahmen 'Konservierender Bodenbearbeitung' mit einer breiten Palette von Geräten umgesetzt werden.

Bei der Durchführung der Bodenbearbeitungs-, Ernte- und Transportmaßnahmen sind bodenschonende Fahrwerke einzusetzen, die sich durch breite Reifen, Reifeninnendruckregelanlagen und zukünftig ggf. durch eine Online-Erfassung der Befahrbarkeit auszeichnen. Dies erlaubt ein flexibles Einsatzmanagement von Erntemaschinen unter Berücksichtigung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden und der Maschinenauslastung.

- Daraus leitet sich die Schlussfolgerung für die zusammenfassende **These 9** ab: 'Konservierende Bodenbearbeitung', ergänzt durch 'Bodenschonendes Befahren', stellt einen Lösungsansatz 'Integrierter Landbewirtschaftung' dar, der die rentable Erzeugung von landwirtschaftlichen Produkten unter Verminderung unerwünschter Nebenwirkungen, wie Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinen im Getreide, gewährleistet. Ein Restrisiko bleibt bei aller Optimierung bestehen.

6 Zusammenfassung

Ziel nachhaltiger Landbewirtschaftung ist es, leistungsfähig und zugleich umweltverträglich zu handeln. Der Landwirt greift mit Maßnahmen wie Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Bestandesführung und Ernte in das komplexe Wirkungsgefüge "Boden-Pflanze-Klima" ein. Den stärksten Eingriff stellt die Bodenbearbeitung dar, mit der optimale Aufgangs- und Wachstumsbedingungen für die Kulturpflanzen geschaffen werden soll, jedoch auch zu unerwünschten Nebeneffekten, wie Bodenschadverdichtung, Bodenerosion, Run off bzw. Mykotoxinbildung im Getreide, führen kann.

Um diese Wechselbeziehungen herauszuarbeiten und Vermeidungs- bzw. Vorsorgestrategien zu entwickeln, wurden in dieser Arbeit einige Thesen zur 'Konservierenden Bodenbearbeitung' untersucht; die Schlussfolgerungen sind in folgenden Hauptaussagen zusammen zu fassen:

- ◆ Auf landwirtschaftlichen Produktionsflächen sind bisher kaum gravierende Schadverdichtungen nachgewiesen. Allgemein festgelegte Grenzwerte werden der unterschiedlichen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden nicht gerecht.
- ◆ 'Konservierende Bodenbearbeitung' schafft durch fruchtfolgespezifische, schonende Lockerung eine verbesserte Tragfähigkeit in Ober- und Unterboden. Organische Rückstände an der Bodenoberfläche erhöhen u.a. die Grabetätigkeit der Regenwürmer und stellen damit die wichtigen Bodenfunktionen wie Infiltration und Durchlüftung sicher.
- ◆ In dem Konzept für 'Bodenschonendes Befahren' wird die höhere Belastbarkeit des Bodens durch technische Entwicklungen bei Fahrwerk und Reifen sowie die Änderung der Arbeitsverfahren ergänzt.
- ◆ Die Online-Messung von Spurtiefe, Reifenabplattung und Bodensetzung gibt Aufschluss über die aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit von Böden und ermöglicht ein flexibles Entscheidungsmanagement beim Einsatz von Maschinen.
- ◆ Mit den Rückständen aus Vor- und/oder Zwischenfrüchten gelingt durch Mulchsaat mit/ohne Lockerung ein umfassender, ganzflächiger Bodenschutz, der Verschlammung und Erosion vorbeugt. Zur Erfolgskontrolle ist eine Kosten-

Nutzen-Analyse erforderlich. Die Lockerungstiefe und Häufigkeit der Bodenbearbeitung werden von den Anforderungen der Stroheinmischung und Bedeckung direkt bestimmt.

- ◆ Linienhafte Erosion, hauptsächlich in Fahrgassen, wird bodenseitig mit schonender Lockerung und Mulchsaat entgegengewirkt und auf der Fahrzeugseite mit breiten Reifen und geringem Reifeninnendruck. Bei extremer Gefährdung wirkt Fahrgassenbegrünung risikomindernd.
- ◆ 'Konservierende Bodenbearbeitung' mindert Run off infolge der organischen Rückstände an der Oberfläche und fördert die Infiltration der durch Regenwürmer geschaffenen Makroporen. Austragsmindernd wirkt ein großer zeitlicher Abstand zwischen Applikation und Niederschlägen.
- ◆ Bei 'Konservierender Bodenbearbeitung' ist ein erhöhtes Infektionsrisiko für Pflanzenkrankheiten an der Oberfläche gegeben. Gleichmäßige Verteilung und intensive Einarbeitung der Strohrückstände – kombiniert mit gesunden Sorten und einer evtl. Blütenspritzung – helfen, das Risiko für die Mykotoxinbildung im Getreide zu senken.

Damit stellt 'Konservierende Bodenbearbeitung' – ergänzt durch das Konzept für 'Bodenschonendes Befahren' – eine standortspezifische Einsatz- und Bearbeitungsstrategie im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes dar. Flexible Bodenbearbeitung bezüglich Tiefe und Intensität – ergänzt durch aufgelockerte Fruchtfolgen, gesunde Sorten und ein gezieltes Pflanzenschutzmanagement – erfüllen die Anforderungen einer Integrierten Landwirtschaft und sichern die Wettbewerbsfähigkeit der landwirtschaftlichen Betriebe.

Summary

The goal of sustainable agriculture is to achieve both good performance and remain environmentally sustainable at the same time. The farmer draws on measures such as crop sequence, soil tillage, crop management and harvesting from within the complex field of "Soil-Plant-Climate". The most significant encroachment on soil is tillage, which should create the optimal emergence and growth conditions for the cultivated plants, but can also lead to undesired side effects, such as damaging soil compaction, erosion, run-off or the development of Mycotoxins in cereals.

In order to work out these interactions and to develop avoidance or precaution strategies, some thesis on 'conservational soil tillage' are investigated in this paper; the conclusions are summarized in the following main statements:

- ◆ Compaction damage has hardly been proven on production areas until now. General limits do not take different compaction sensitivities into account.
- ◆ 'Conservation tillage' creates improved support ability in top and subsoil through crop sequence-specific, conservational loosening of the soil. Organic residues in the soil surface increase among other things the digging ability of earthworms and thus ensure important soil functions such as infiltration and aeration.
- ◆ Under the concept of 'soil conserving passage', the high stress resistance of soil is increased with technical development of vehicles and tires, and changes in working practices.
- ◆ The online-measurement of track depth, tire-flattening and soil-setting gives information on the current compaction sensitivity of soils and makes flexible decision management possible for the use of machinery.
- ◆ The use of mulch seeding (with/without soil loosening) with the residues from previous and/or interim crops succeeds in providing comprehensive, complete area soil protection, which prevents mudslides and erosion. A cost-use analysis is required to evaluate the success of this approach. The loosening

depth and the frequency of soil tillage were determined directly by the requirements of straw integration and coverage.

- ◆ Linear erosion, mainly in passage tracks, was counteracted with conservational loosening and mulch seeding, and with broad tires and low internal tire pressure on the vehicle. In the case of extreme danger, planting of the passage tracks helped to reduce the risk.
- ◆ 'Conservation tillage' reduces run-off by depositing organic residues on the surface and promotes infiltration through macro-pores created by earthworms. Leaching reduction is facilitated by longer time periods between application and precipitation.
- ◆ In 'conservation tillage', there is an increased infection risk by plant diseases on the soil surface. Equal distribution and intensive working-in of straw residues – combined with healthy varieties and a possible spraying during blossoming – help to reduce the infection risk for Mykotoxin development in cereals.

Thus 'conservation tillage' – augmented with the concept for 'soil conserving passage' – presents a strategy for use and tillage for specific locations in accordance with the German Soil Protection Law. Flexible soil tillage in terms of depth and intensity, together with less strict crop sequences, healthy varieties and targeted plant protection management fulfil the requirements of integrated agriculture and ensure the competitiveness of farms.

7 Literaturverzeichnis

- Aderhold, D. (1995): Einfluß bevorzugter Fließwege auf die Verlagerung von Herbiziden im Bodenprofil. Dissertation, Universität Hannover.
- Aderhold, D. & Nordmeyer, H. (1994): Bevorzugte Fließwege von Wasser und Pflanzenschutzmitteln in strukturierten Böden. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV, S. 681-691.
- Akkan, Z., Flaig, H. & Ballschmiter, K. (2003): Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel in der Umwelt. Emissionen, Immissionen und ihre human- und ökotoxikologische Bewertung. Berlin.
- Arvidson, J., Trautner, A. & van den Acker, J.J.H. (2000): Subsoil compaction – risk assessment and economic consequences. In: Horn, R. et al. (Eds.) Subsoil compaction. Advances in Geocology 31, Catena Verlag, Reiskirchen, S. 3-12.
- Arvidson, J., Trautner, A., van den Acker, J.J.H. & Schjønning, P. (2001): Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestors in Southern Sweden. II. Soil displacement during wheeling and model computations of compactions. Soil & Tillage Research 60 (1-2), S. 79-90.
- ATV-DVWK (2002): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. ATV-DVWK-Merkblatt 901, ATV-DVWK, Bad Hoenfeldt.
- Auerswald, K. & Schmidt, F. (1986): Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen. GLA Fachbereich 1, Geologisches Landesamt München.
- Bach, M. & Frede, H.-G. (1997): Schutzfunktionen von Uferstreifen im Mittelgebirgsraum gegen PSM-Einträge in Fließgewässern. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (330), S. 95-107.
- Bach, M., Huber, A., Frede, H.-G., Mohaupt, V. & Zullei-Seibert, N. (2000): Schätzung der Einträge von Pflanzenschutzmitteln aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer Deutschlands. Berichte (3), Erich Schmidt Verlag, Berlin, 273 S.
- Bahle, F. & Leist, N. (1997): Einfluß konventioneller, integrierter und ökologischer Wirtschaftsweisen sowie einzelner anbautechnischer Maßnahmen auf den Befall von Winterweizen mit samenbürtigen Pflanzen. Gesunde Pflanzen 49 (7), S. 220-225.
- Baker, J.L. (1987): Hydrologic Effects of Conservation Tillage and their Importance Relative to Water Quality. Lewis Publishers Inc. Chelsea, Michigan, 48118, S. 113-124.
- Ball, B.C. & Robertson, E.A.G. (1994): Effects of uniaxial compaction on aeration and structure of ploughed or direct drilled soils. Soil & Tillage Research 31, S. 135-148.
- Bannik, G., Böken, H., Franzius, V., Frauenstein, J., Glante, F., Mieke, A., Reimann, C. & Terytze, K. (2004): Bodenschutz in Europa – Wo stehen wir heute? Bodenschutz (3), S. 78-83.
- Bartels, G. & Rodemann, B. (2003): Strategien zur Vermeidung von Mykotoxinen im Getreide. Gesunde Pflanzen 55 (5), S. 125-135.

- Bauer, G. (2000): Zur Analyse der Daten des Fusarium-Monitorings Bayern. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (3), S. 33-37 und 105-107.
- Beck, R., Lepschy, J. & Obst, A. (1997): Fusarien schon im Herbst aufs Korn nehmen. *dlz agrarmagazin* (9), S. 28-32.
- Beck, R. & Lepschy, J. (2000): Ergebnisse aus dem Fusarium-Monitoring 1989-1999 – Einfluß der produktionstechnischen Faktoren Fruchtfolge und Bodenbearbeitung. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (3), S. 39-47.
- Becker, C. (1997): Dauerhaft pfluglose Bodenbearbeitungssysteme und Betriebsgröße – eine pflanzenbaulich-ökonomische Analyse. Dissertation, Universität Göttingen, 121 S.
- Beisecker, R. (1994): Einfluß langjähriger unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löß- und eines Sandbodens. *Bodenökologie und Bodengenese* (12), 195 S.
- Birzele, B., Meier, A., Hindorf, H., Krämer, J. & Dehne, H.W. (2002): Epidemiology of Fusarium infection and deoxynivalend content in winter wheat in the Rhineland, Germany. *European Journal of Plant Pathology* (108), S. 667-673.
- Bischoff, G., Pestemer, W., Rodemann, B. & Kückler, T. (2001a): Monitoring of Terbutylazin in Surface Waters adjacent to Maize Fields with potential Run-off to prove the Efficiency of Vegetated Buffer Zones – Test Sites in Northern Germany. XII Symposium Pesticide Chemistry, S. 841-848.
- Bischoff, G., Rodemann, B. & Pestemer, W. (2001b): Entry of Pesticides into Surface Waters – New Results of the Lamspringe Run-off Monitoring Project 1999 – 2001. XII Symposium Pesticide Chemistry, S. 849-856.
- Bischoff, G., Pestemer, W., Rodemann, B. & Kückler, T. (2002): Monitoring von Terbutylazin in Oberflächengewässer an abschwemmungsgefährdeten Maisfeldern zur Überprüfung der Wirksamkeit von Abstandsaufgaben. Mitteilung der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (390), S. 370-371.
- Blackwell, P.S., Green, T.W. & Mason, W.K. (1990): Response of biopore channels from roots to compression by vertical stresses. *Soil Science Society America Journal* (54), S. 1088-1091.
- Blevins, R.L., Frye, W.W., Baldwin, P.L. & Robertson, S.D. (1990): Tillage effects on sediment and soluble losses from a Maury silt loam soil. *Journal of Environmental Quality* (19), S. 683-686.
- BML – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1986): Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (PflSchG): Bundesgesetzblatt I 1986, 1505, FNA 7823-5, neugefasst durch Bek. vom 14.05.1998 I 971, 1527, 3512, geändert durch Art. 3 G vom 19.08.2004 II 1154.
- BML – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1991): Berichte über Landwirtschaft SH 205 "Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit" Bd. 3 "Bodenerosion".

- BML – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1993): Berichte über Landwirtschaft SH 206 "Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit" Bd. 4 "Humushaushalt".
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (BBodSchG). Bundesgesetzblatt I 1998, 502, FNA 2129-32, GESTA NO 18, geändert durch Art. 3 G vom 09.12.2004, 3214.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwVO). Bundesgesetzblatt I 2001, 959, FNA 2126-13-1, Änderung durch Art. 263 V vom 25.11.2003 I 2304.
- BMVEL – Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (2001): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. Bonn, 105 S.
- BMVEL – Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (2004): Verordnung über Höchstmengen an Mykotoxinen in Lebensmitteln (MHmV). Bundesgesetzblatt I S. 1248, zuletzt geändert 09.09.2004.
- Bolling, J. (1986): Beanspruchung des Bodens beim Schlepper- und Maschineneinsatz. KTBL-Schrift "Bodenverdichtungen" 308, S. 49-71.
- Bolling, J. & Söhne, W. (1982): Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. Landtechnik (2), S. 54-57.
- Brand-Sassen, H. (2004): Bodenschutz hilft Kosten sparen. Hann. Land und Forst (48), S. 5-6.
- BRD – Bundesrepublik Deutschland (1949): Grundgesetz. Bundesgesetzblatt I, 23.5.1949, FNA 100-1, Bundesgesetzblatt Teil III.
- BRD – Bundesrepublik Deutschland (2004): Gesetz zur Umsetzung der gemeinsamen Agrarpolitik. BGB/I 2004 Nr. 38 vom 26.07.2004.
- Brunotte, J. (1990): Landtechnische Maßnahmen zum bodenschonenden und bodenschützenden Zuckerrübenanbau. Dissertation, Universität Kiel, 205 S.
- Brunotte, J. (2001): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung und Bodenerosion. In: Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. BMVEL, Bonn 2001, S. 33.
- Brunotte, J. (2003): Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis: Bodenerosion mindern, Bodenleben fördern. In: Nachhaltige Bodennutzung – aus technischer, pflanzenbaulicher, ökologischer und ökonomischer Sicht. Landbauforschung Völkenrode SH 256, S. 79-86.
- Brunotte, J. (2004): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf Aus-
trag von Pflanzenschutzmitteln über Dränagen. Jahresbericht der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL, S. 124.
- Brunotte, J. (2005a): Trends der Bodenbearbeitung. Landtechnik (6), S. 310-311.

- Brunotte, J. (2005b): Umfrage zum Einsatz von Technik zur Bodenbearbeitung, Pflege, Ernte und zum Transport auf südniedersächsischen Zuckerrübenbetrieben. Braunschweig (unveröffentlicht).
- Brunotte, J. & Sommer, C. (1993): Fahrgassen im Zuckerrübenanbau – Problemstellung, Durchführung, Wertung. Zuckerrübe 42 (6), S. 344-349.
- Brunotte, J., Roth, C.H., Hollmann, P. & Sommer, C. (1995): Einzelbetrieblicher Nutzen-Kosten-Vergleich von Erosionsschutz durch Mulchsaatverfahren. Landbauforschung Völkenrode 45, S. 122-134.
- Brunotte, J. & Sommer, C. (1996): Gute fachliche Praxis bei der Bodennutzung - Bodenbearbeitung standortangepaßt und bodenschutzorientiert. Zuckerrübe 45 (6), S. 278-281.
- Brunotte, J., Sommer, C., Winnige, B. & Frielinghaus, M. (1998): Ermittlung aktueller Bodenbedeckungsgrade auf Versuchs- und Praxisflächen. TLL/UBA-Vorhaben 10701022. Bericht aus dem Institut für Betriebstechnik der FAL Nr. 246, 35 S.
- Brunotte, J., Winnige, B., Frielinghaus, M. & Sommer, C. (1999): Der Bodenbedeckungsgrad – Schlüssel für gute landwirtschaftliche Praxis im Hinblick auf das Problem Bodenabtrag in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz (2), S. 57-61.
- Brunotte, J. & Wagner, M. (2000): Verbesserung des Strohmanagements im Hinblick auf die Saatguteinbettung bei Mulch- und Direktsaat. Bericht aus dem Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL Nr. 254, 40 S.
- Brunotte, J., Weißbach, M., Rogasik, H., Isensee & E., Sommer, C. (2000): Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrübenerntetechnik. Zuckerrübe 49 (1), S. 34-40.
- Brunotte, J. & Duttmann, R. (2001): Verfahrenstechnische Strategien zur Minderung von Oberflächenabfluss und Bodenerosion. Mitteilung der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin (381), S. 67-81.
- Brunotte, J. & Sommer, C. (2001): Mulchsaatverfahren zu Zuckerrüben – Entwicklung und heutige Bedeutung. Zuckerrübe 50 (4), S. 226-231.
- Brunotte, J. & Wagner, M. (2001): Bodenschonung und Kosteneinsparung. KTBL-Schrift 266, 117 S.
- Brunotte, J. & Wagner, M. (2001): Bodenschonung und Kosteneinsparung. KTBL-Schrift 308, S. 38-48.
- Brunotte, J., Sommer, C. & Lebert, M. (2002a): Ein praxisorientiertes Konzept mit Lösungsansätzen und Ergebnissen zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. In: Schadverdichtungen in Ackerböden – Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. 14. Wissenschaftliche Tagung Universität Bonn 12/2001, S. 136-149.
- Brunotte, J., Voßhenrich, H.-H. & Ortmeier, B. (2002b): Strohmulchverfahren im Zuckerrübenanbau. Zuckerrübe 51 (6), S. 312-314.
- Brunotte, J. & Oldenburg, E. (2003): Auswirkungen gezielter Blütenspritzung bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Ertrag und DON-Gehalt von Winterweizen. Braunschweig (unveröffentlicht).
- Brunotte, J., Voßhenrich, H.-H. & Ortmeier, B. (2003): Strohverteilung und Präzisionsstoppelbearbeitung. Getreide-Magazin 8 (2), S. 114-118.

- Brunotte, J., Nolting, K., Lorenz, M., Ortmeier, B. & Voßhenrich, H.-H. (2004): Einfluss unterschiedlicher Fahrwerksausstattungen am Mähdrescher auf Bodendruck und Bodenstruktur. Sickte (unveröffentlicht).
- Brunotte, J. & Oldenburg, E. (2004a): Einfluss von Vorfrucht, Bodenbearbeitung, Sorte und Pflanzenschutz auf den Ertrag und den DON-Gehalt von Winterweizen auf dem Standort Adenstedt. Braunschweig (unveröffentlicht).
- Brunotte, J. & Oldenburg, E. (2004b): Mykotoxingehalte im Winterweizen in Abhängigkeit von Sorte und Bodenbearbeitung. Braunschweig (unveröffentlicht).
- Brunotte, J. & Wollenweber, D. (2004): Klassische Direktsaat – eine Alternative? Zuckerrübe 53 (3), S. 121-124.
- Brunotte, J. & Korte, K. (2005): Bewertung von neuen Systemen der Bodenbewirtschaftung in erweiterten Fruchtfolgen mit Körnerraps und Körnerleguminosen. Abschlussbericht UFOP-Projekt Nr. 521/025, 38 S.
- Brunotte, J. & Oldenburg, E. (2005): Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren und Vorfrucht Weizen auf den DON-Gehalt von Weizen auf vier Standorten in Niedersachsen. Braunschweig (unveröffentlicht).
- Brunotte, J., Ortmeier, B., Lorenz, M., Nolting, K. & Sommer, C. (2005a): Porenvolumen und gesättigte Wasserleitfähigkeit der Statuserhebung "Bodenstruktur von Lössböden in Südniedersachsen 2002". Braunschweig (unveröffentlicht).
- Brunotte, J., Oldenburg, E. & Weinert, J. (2005b): DON-Gehalte von Silomais-Rückständen unterschiedlich anfälliger Maissorten für Stängelfäule. Braunschweig (unveröffentlicht).
- Brunotte, J., Oldenburg, E. & Weinert, J. (2005c): Silomais-Rückstände an der Bodenoberfläche nach unterschiedlicher Zerkleinerung und Bodenbearbeitung. Braunschweig (unveröffentlicht).
- Brunotte, J. & Ortmeier, B. (2005): Fächer zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades durch organische Rückstände. Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL, Braunschweig.
- Brunotte, J., Sommer, C., Isensee, E. & Weisskopf, P. (2005d): Der Boden unter Druck. Landtechnik 60 (3), S. 150-151.
- BSA – Bundessortenamt (2005): Beschreibende Sortenliste – Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen, Hackfrüchte. Hannover, 265 S.
- Buchenauer, H. & Kang, Z. (2002): Cytologische Studien zur Infektion und Ausbreitung von Fusarien in Weizenähren sowie zu Abwehrreaktionen in ährenresistenten und anfälligen Weizensorten. Wissenschaftliche Tagung Bonn, S. 45-54.
- Buchner, W. & Köller, K.-H. (1990): Integrierte Bodenbearbeitung. Verlag Eugen Ulmer, 126 S.
- Buchwald, K. & Engelhardt, W. (1999): Umweltschutz – Grundlagen und Praxis. Band 4: Schutz des Bodens. Economica Verlag, Bonn.
- Buczko, U., Bens, O., Hangen, E., Brunotte, J. & Hüttl, R.F. (2003): Infiltration and macroporosity of a silt loam soil under two contrasting tillage systems. Landbauforschung Völkenrode 53 (2-3), S. 181-190.

- Chamen, W.T.C., Alakukku, J., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., Tijink, F.G.J. & Weisskopf, P. (2003): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction. A review. Part 2: Equipment and field practices. *Soil & Tillage Research* 73, S. 161-174.
- Chaplot, V.A.M. & Le Bissonnais, Y. (2003): Run off Features for Interrill Erosion at Different Rainfall Intensities, Slope Length and Gradients in an Agricultural Loessial Hillslope. *Soil Science Society of America Journal* (67), S. 844-851.
- Czapar, G.F., Kanwar, R.S. & Fawcett, R.S. (1994): Herbicide and tracer movement to field drainage tiles under simulated rainfall conditions. *Soil & Tillage Research* (30), S. 19-32.
- Czeratzki, W. (1972): Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforschung Völkenrode* 22 (1), S. 1587-1593.
- Dachverband Agrarforschung (2003): Umweltindikatoren – Schlüssel für eine umweltverträgliche Land- und Forstwirtschaft. *Agrarspectrum* 36, 273 S.
- Dänicke, S. & Oldenburg, E. (2000): Risikofaktoren für die Fusariumtoxinbildung in Futtermitteln und Vermeidungsstrategien bei der Futtermittelerzeugung und Fütterung. *Landbauforschung Völkenrode*, SH 216, 139 S.
- Danfors, B. (1974): Compaction of the subsoil. Report S 24. Swedish Institut of Agricultural Engineering. Uppsala, Sweden, 91 S.
- Dehne, H.-W., Steiner, U. & Oerke, E.-C. (2002): Mykotoxinbelastung contra Bodenschutz? *Mais* 30 (3), S. 92-94.
- Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (2000): Umweltgutachten 2000. Schritte ins nächste Jahrtausend. Wiesbaden.
- Derpsch, R., Roth, C.H., Sidiras, N. & Köpke, U. (1988): Erosionsbekämpfung in Paraná, Brasilien: Mulchsysteme, Direktsaat und konservierende Bodenbearbeitung. *Schriftenreihe der GTZ* Nr. 205, 270 S.
- Deutscher Bundestag (2004): Umweltgutachten 2004 des Rates von Sachverständigen. Drucksache 15/3600, 02.07.2004.
- Diercks, R. & Heitefuß, R. (1990): Integrierter Landbau – umweltbewußte Pflanzenproduktion. *Verlagsunion Agrar*, 420 S.
- Diez, Th. (1994): Erosionsschäden vermindern. *aid Broschüre* 1108.
- Diserens, E., Anken, Th. & Weisskopf, P (1998): Tragen Unterböden größere Lasten als erwartet? *Agrarforschung* 5 (1), S. 9-12.
- Diserens, E. & Spiess, E. (2004): Wechselwirkung zwischen Fahrwerk und Ackerboden. TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung. *FAT-Berichte Tänikon* Nr. 613, 16 S.
- Dohnberg, A. (2000): Viele Fragen sind noch offen. *DFG-Bericht zur Ökotoxikologie von Pflanzenschutzmitteln*, 5.
- Dumbeck, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. *Dissertation, Gießener Bodenkundliche Abhandlungen* Bd. 3, 236 S.

- Düring, R.-A. & Hummel, H.E. (1994): Der Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf das Verhalten ausgewählter Herbizide im Boden. In: Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden. Wissenschaftlicher Verlag, Gießen. S. 65-82.
- Düring, R.-A. & Hummel, H.E. (1999): Herbicide and metabolite movement in different soils as studied by computer assisted microlysimeters. *Chemosphere* 39 (4), S. 641-654.
- DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1996): Bodenerosion durch Wasser – Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen 239. Bonn.
- Dürr, H.-J., Petelkau, H. & Sommer, C. (1994): Literaturstudie "Bodenverdichtung". Bericht aus dem Institut für Betriebstechnik der FAL, Nr. 219.
- Duttman, R. & Brunotte, J. (2002): Oberirdische Stofftransporte in Agrarlandschaften. *Geographische Rundschau* 54 (2), S. 26-33.
- Ebeling, S. (1999): Versickerung von Niederschlagswasser im ländlichen Raum: Flächenpotential, Beurteilung der Versickerungseignung mit Methodenvergleich und Erarbeitung eines Konzeptes für eine Versickerungsanlage in Adenstedt (Landkreis Hildesheim). Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Hannover.
- Eckart, H., Breitschuh, G. & Sauerbeck, D. (1999): Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung - ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben. *Agrobiol. Research* 52, S. 57-76.
- Eder, J. (2000): Die Entwicklung der Maisanbaufläche in Bayern und der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (3), S. 9-10.
- Edwards, W.M., Norton, L.D. & Redmond, C.E. (1988): Characterising macropores that effect infiltration into non-tilled soil. *Soil Science Society of America Journal* (52), S. 483-487.
- Edwards, W.M., Shipitalo, M.J., Owens, L.B. & Dietz, W.A. (1990): Initial storm effects on macropore transport of surface-applied chemicals in no-tillage soil. *Soil Science of America Journal* (54), S. 1530-1535.
- Edwards, W.M., Shipitalo, M.J., Owens, L.B. Traina, S.J. & Edwards, C.A. (1992): Role of *Lumbricus terrestris* burrows on quality of infiltrating water. *Soil Biology and Biochemistry* (24), S. 1555-1561.
- EG – Europäische Gemeinschaft (2000): EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 22.12.2000, Nr. L 327, S. 1
- EG – Europäische Gemeinschaft (2005): Verordnung Nr. 856/2005 der Kommission vom 06. Juni 2005 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 466/2001 in Bezug auf Fusarientoxine (Abl. Nr. L 143/3), 07.06.2005.
- Ehlers, W. (1975): Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Science* 119 (3), S. 242-249.
- Ehlers, W., Schmidtke, K. & Rauber, R. (2003): Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. *Landnutzung und Landentwicklung* 44, S. 9-18.

- Ellner, F.M. (2002): Fusarium-Toxine in Getreide – Vorkommen und Vermeidungsstrategien. Wissenschaftliche Tagung Bonn, S. 14-22.
- Ellner, F.M. (2004): Ergebnisse mehrjähriger Feldversuche zur Wirkung Strobilurin haltiger Fungizide auf die Mykotoxin-Bildung in unterschiedlichen Weizensorten. In: 26. Mykotoxin-Workshop. LfL-Schriftenreihe (3), S. 30.
- Ellner, F.M. (2006): Einfluss von Lagergetreide auf die DON-Gehalte. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Schriftliche Mitteilung, Berlin.
- El Titi, A. (2003): Getreidekrankheiten bei Konservierender Bodenbearbeitung – Ökologische Zusammenhänge beachten. Landwirtschaft ohne Pflug (3), S. 17-21.
- Epperlein, J. & Joschko, M. (2002): Population von Regenwürmern nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung und vor/nach Befahren mit Zuckerrüben-Vollerntern. Schriftliche Mitteilung, Berlin.
- Erlach, F., Gröblichhoff, F.-F. & Lütke Entrup, N. (2004): Gewässerbelastung lässt sich reduzieren. Landwirtschaft ohne Pflug (1), S. 10-14.
- EU – Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2002): Hin zu einer spezifischen Bodennutzungsstrategie. Brüssel, 16.4.2002, KOM (2002) 179 endgültig.
- Europarat (1972): Europäische Bodencharta. Brüssel.
- European Commission, Scientific Committee on Food (1999): Opinion on Fusarium toxins; Part 1: Desoxynivalenol (DON).
- FAO – Food and Agriculture Organisation (1981): World Soil Charter. Rome: C 81/27 FAO.
- Fischer, P., Bach, M., Gäth, S., Mollenhauer, K. & Frede, H.-G. (1995): Geringere Herbizideinträge in Oberflächengewässer durch reduzierte Bodenbearbeitung? Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (76), S. 253-256.
- Fischer, P., Bach, M. & Frede, H.-G. (1998): Belastung über den Gully. DLG-Mitteilungen (5), S. 39-40.
- Foy, C.L. & Hiranpradit, H. (1989): Movement of atrazine by water from application sites in conventional and no-tillage corn production. In: Pesticides in terrestrial and aquatic environments. Proceedings of a National Conference, 11.-12. Mai 1989, Blackburg, Virginia Water Resource Research Center, VPI and State University (USA), S. 355-377.
- Frank, R., Braun, H.E., Hove Holdrinet, M. van, Sirons, G.J. & Ripley, B.D. (1982): Agriculture and water quality in the Canadian Great Lakes basin: V. pesticide use in 11 agricultural watersheds and presence in stream water, 1975-1977. Journal of Environmental Quality (11), S. 497-505.
- Frede, H.G. (1982): Struktur-Inhomogenität von Ackerkrumen als Wirkungen landtechnischen Gerätes. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 34, S. 193-198.
- Frede, H.-G., Beisecker, B., Lütkemöller, D. & Gäth, S. (1994): Auswirkungen langfristiger differenzierter Bodenbearbeitung auf die Porenraumstruktur und den Wasser- und Stofftransport eines Löß- und eines Sandbodens. In: Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden. Wissenschaftlicher Verlag, Gießen. S. 91-116.

- Frede, H.-G., Fischer, P. & Bach, M. (1998): Reduction of herbicide contamination in flowing waters. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (161), S. 395-400.
- Friebe, B. (1992): Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. *Wiss. Verlag Fleck, Gießen*, 213 S.
- Friebe, B. & Henke, W. (1992): Regenwürmer und deren Abbauleistung bei abnehmender Bearbeitungsintensität. In: *Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden*. 3. Symposium Gießen, 12./13.05.1992, S. 139-145.
- Frielinghaus, M. (1997a): Erosionsbedingte Verlagerungspfade für Nähr- und Schadstoffe in der Landschaft und Möglichkeiten ihrer Unterbrechung. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* (330), S. 87-94.
- Frielinghaus, M. (1997b): Merkblätter zur Bodenerosion in Brandenburg. *ZALF-Berichte Nr. 27*.
- Frielinghaus, M. (1998): Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg Vorpommern - Bodenerosion. *Geol. Landesamt Mecklenburg-Vorpommern*, 80 S.
- Frielinghaus, M., Petelkau, H. & Schmidt, R. (1992): Wassererosion in norddeutschen Jungmoränengebieten. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* 33, S. 22-33.
- Frielinghaus, M. & Bork, H.-R. (1999): *Schutz des Bodens*. *Economica Verlag, Bonn*, 157 S.
- Frielinghaus, M. & Winnige, B. (2000): Maßstäbe landwirtschaftlicher Bodennutzung, Erarbeitung eines Bewertungs- und Entscheidungssystems zur Indikation der Wassererosion. *UBA-Texte*. 43-00, ISSN 0722-186 X.
- Gieska, M., Rienk van der Ploeg, R., Schweigert, P. & Pinter, N. (2003): Physikalische Bodendegradierung in der Hildesheimer Börde und das Bundes-Bodenschutzgesetz. *Berichte über Landwirtschaft* 81 (4), S. 485-511.
- Graff, O. (1983): *Unsere Regenwürmer: Lexikon für Freunde der Bodenbiologie*. *Hannover: Schaper*, 112 S.
- Graff, O. & Hartge, K.-H. (1974): Der Beitrag der Fauna zur Durchmischung und Lockerung des Bodens. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 18, S. 447-460.
- Griffin, O., Bao, M.L., Barbieri, C., Burrini, D. & Pantani, F. (1997): Occurrence of pesticides in the Arno river and in potable water – a survey of the period 1992-1995. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* (59), S. 202-209.
- Gross, D. (1989): Antimikrobielle Abwehrstoffe in Gramineen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 96, S. 535-553.
- Gysi, M. (2001): Bodenverdichtung: Vorbelastung als Stabilitätsmaß. *FAT-Berichte Tännikon Nr. 566*, 8 S.
- Haider, J. & Auerswald, K. (1997): Prozesse bei der Pflanzenschutzmittelverlagerung mit Oberflächenabfluß und Bodenabtrag. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* (330), S. 19-30.

- Håkansson, I., Vorhees, W.B., Elonen, P., Raghavan, G.S.V., Lowery, B., van Wijk, A.L.M., Rasmusson, K. & Riley, H. (1987): Effects of high axle-load traffic on sub-soil compaction on crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil & Tillage Research* 10, S. 259-268.
- Hakimi, S., Liang, J., Wu, X., Rosenberger, C., Castro, S. & Shah, D. (1997): Gene therapy for plants. *Cereal Research Communications* 25, S. 745-747.
- Hall, J.K. & Mumma, R.O. (1990): Dicamba mobility in conventionally tilled and non-tilled soil. *Soil & Tillage Research* (30), S. 3-17.
- Hangen, E., Buczko, U., Bens, O., Brunotte, J. & Hüttl, R.F. (2002): Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil & Tillage Research* 63 (3-4), S. 181-186.
- Hansen, N.C., Moncrief, J.F., Gupta, S.C., Capel, P.D. & Olness, A.E. (2001): Herbicide Banding and Tillage System Interactions on Run off Losses of Alachlor and Cyanazine. *Journal of Environmental Quality* (30), S. 2120-2126.
- Harrach, T. & Vorderbrügge, T. (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: *Berichte über Landwirtschaft* 204, S. 69-82.
- Harris, G.L., Jones, R.L., Catt, J.A., Mason, D.J. & Arnold, D.J. (1995): Influence of agricultural management and pesticide sorption on losses to surface waters. *Proceedings of a Symposium by the British Crop Protection Council. BCPC Monograph* (62), S. 4ff.
- Hartge, K.H. & Sommer, C. (1979): Bodenverdichtungen und ihre Beurteilungen. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 20, S. 257-268.
- Hartge, K.H. & Sommer, C., (1980): The effect of geometric patterns of soil structure on compressibility. *Soil Science* 130 (4), S. 180-185.
- Heatwole, C.D., Zacharias, S., Dillaha, T.A. & Mostaghimi, S. (1991): Tillage effects on fate and transport of pesticides in a coastal plain soil: I. Surface run off. *ASAE-Paper Nr. 91-2543, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan.*
- Hecker, J.-M. (2002): *Morphometrie und Dynamik verschlammter Bodenoberflächen.* Wiss. Verlag Berlin, 321 S.
- Heier, T., Jain, S.K., Kogel, K.-H. & Pons-Kühnemann, J. (2005): Influence of N-fertilization and Fungicide Strategies on Fusarium Head Blight Severity and Mycotoxin Content in Winter Wheat. *Journal of Phytopathology* 153, S. 551-557.
- Heisler, C., Rogasik, H., Brunotte, J. & Joschko, M. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung und biologische Aktivität. *Landbauforschung Völkenrode* 4, S. 199-211.
- Helming, K. (1992): *Die Bedeutung des Mikroreliefs für die Regentropfenerosion.* Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Hirschfeld, T., Goßmann, M., Ellner, F. & Büttner, C. (2005): Mykotoxingehalt in Triticale. *Getreide-Magazin* (2), S. 124-127.
- Hoffer, G.N., Johnson, A.G. & Atanasof, D. (1918): Corn root rot and Wheat scab. *Journal of Agricultural Research* 14, S. 611-612.

- Homdork, S., Fehrmann, H. & Beck, R. (2000): Effects of field application of Tebuconazole on yield components and the mycotoxin content of Fusarium-infected wheat grain. *Journal of Phytopathology* 148, S. 1-6.
- Höner, G. (2005): Reiner Tisch mit flachen Furchen. *Top agrar* (5), S. 94-97.
- Horn, R. (1981a): Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngößen. *Schriftenreihe FB 14, TU Berlin* 10, 200 S.
- Horn, R. (1981b): Die Bedeutung von Böden für die mechanische Belastbarkeit. *Landwirtschaftsentwicklung und Umweltforschung* Nr. 10.
- Horn, R., Lebert, M. & Burger, N. (1991): Mechanische Belastbarkeit der Böden Bayerns. Bayer. Staatministerium für Landentwicklung und Umweltfragen, *Materialien* 73, 178 S.
- Horn, R., van den Akker, J.J.H. & Arvidsson, J. (2000): Subsoil compaction. *Advances in Geocology* 32. Catena Verlag, ISBN 3-923381-44-1.
- Horn, R. & Fleige, H. (2001): Prediction of the Mechanical Strength and Ecological Properties of Subsoils for a Sustainable Landuse. *Landnutzung und Landentwicklung* 42, S. 277-283.
- Isensee, E., Weißbach, M., Sommer, C. & Brunotte, J. (2001): Bodenschonung mit moderner Technik – Grundlagen und Empfehlungen. *DLG/KTBL-Arbeitsunterlagen B/ 2001*, 30 S.
- Isringhausen, S., Duttmann, R. & Mosimann, T. (1999): Überprüfung räumlich differenzierter Prognosen erosionsbedingter Stofftransporte durch Feldbeobachtungen. *Wasser & Boden* 51 (12), S. 25-32.
- Jahn, M. (1994): Untersuchungen zur Bekämpfung von *Fusarium culmorum* an Winterweizen. *Mitteilung aus der Biologischen Bundesanstalt* (301), S. 72.
- Jasinski, B. & Lebert, M. (2003): New method for monitoring tire-soil individual stresses. *Landbauforschung Völkenrode* SH 256, S. 73-78.
- Jégou, D., Brunotte, J., Rogasik, H., Capowiez, Y., Diestel, H., Schrader, St. & Cluzeau, D. (2001): Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *European Journal of Soil Biology* 38, S. 329-336.
- Joschko, M., Rogasik, H. & Brunotte, J. (1997): Einfluss Konservierender Bodenbearbeitung auf Bodentiere und Bodengefüge von Lehmböden. *Landbauforschung Völkenrode* SH 178, S. 69-82.
- Kenimer, A.L., Mostaghimi, S., Young, R.W., Dillaha, T.A. & Shanholtz, V.O. (1987): Effects of residue cover on pesticide losses from conventional and no-tillage systems. *Transactions of the ASAE* (30), S. 953-959.
- Keudel, M. & Schrader, S. (1999): Axial and radial pressure exerted by earthworms of different ecological groups. *Biology and Fertility of Soils* 29, S. 262-269.
- Kimbrough, R.A. & Litke, D.W. (1996): Pesticides in streams draining agricultural and urban areas in Colorado. *Environmental Science and Technology*, 30, S. 908-916.

- Kirby, J.M, & Blackwell, P.S (1989): Design of soil slots to resist wheel track compaction. *Soil Technology* 2, S. 147-161.
- Klinghagen, G. & Frahm, J.(2002): Unterschiedliche Anbauintensitäten und Fusariumbelastung. Wissenschaftliche Tagung Bonn, S. 23-31.
- Koch, H.-J, Brandhuber, R., Stockfisch, N. & Schäfer-Landefeld, L. (2002): Bodenschutz bei Zuckerrübenenernte und Gülleausbringung. *Zuckerrübe* (1), S. 34-37.
- Koch, H.-J., Pringas, C. & Scherer, J. (2004a): Wechselwirkungen der Bodenbearbeitung mit den Faktoren Vorfrucht, Sorte, Fungizideinsatz auf die Deoxynivalenol-Konzentration im Korn von Winterweizen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 16, S. 45-46.
- Koch, H.-J., Tomanová, O. & Heuer, H. (2004b): Wirkung der Überrollung mit einem Rübenroder auf Bodenstruktur und Pflanzenertrag – Erste Ergebnisse aus einem Systemversuch Bodenbearbeitung Harste. *Forum Zuckerrübe Nord*, Braunschweig, 14.12.2004.
- Kommission der EG (2002): Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie. Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuß sowie an den Ausschuß der Regionen.
- König, W. (2004): Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- Kördel, W. & Klöppel, H. (1997): Run off-Versuche an Großparzellen. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* (330), S. 31-38.
- Kreuger, J. (1998): Pesticide in stream water within an agricultural catchment in Southern Sweden. *The Science of the Total Environment*, 216, S. 227-251.
- Kröcher von, C. (2004): Fusariumtoxine sind 2004 kein Problem. *Hann. Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung* (39), S. 7-8.
- Kropf, U. & Schlüter, K. (2005): Ährenfusarium: Gefahr nicht nur während der Blüte! *top agrar* (6), S. 42-45.
- Krska, R., Baumgartner, R. & Josephs, R. (2001): The state-of-the-art in the analysis of estrogenic mycotoxins in cereals. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 369, S. 469-476; 371, S. 285-299.
- KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz. *KTBL-Arbeitspapier*, 130 S.
- KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2006): Optimierung der Schlaglängen. Schriftliche Mitteilung der Arbeitsgruppe, Braunschweig (unveröffentlicht).
- KWS – Kleinwanzlebener Saatzucht AG, Agroservice (2005): Agrartechnische Versuche zu Bodenbearbeitungssystemen bei Zuckerrüben. *Fachtagung*, Januar 2005.
- Lang, S. & Hurle, K. (1997): Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer durch Run off. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* (330), S. 7-18.

- Larink, O. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenleben. KTBL-Arbeitspapier 266, S. 80-90.
- Larink, O., Heisler, C., Söchtig, W., Lübben, B. & Wickenbrock, L. (1993): Auswirkungen auf Bodenfauna, Bodenflora und Pflanzenertrag. KTBL-Schrift 362, S. 142-156.
- Lebert, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuther Bodenkundliche Berichte 12, Universität Bayreuth.
- Lebert, M., Brunotte, J. & Sommer, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden – Regelungen zur Gefahrenabwehr. UBA-Texte 46/04, ISSN 0722-186 X.
- Lebert, M. & Schäfer, W. (2005): Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz (2), S. 42-46.
- Lebert, M., Brunotte, J., Sommer, C. & Böken, H. (2006): Bodengefüge gegen Verdichtungen schützen – Lösungsansätze für den Schutz landwirtschaftlich genutzter Böden. J. Plant Nutr. Soil Science 2006, 169, S. 633-641.
- Leisse, N. & Puhl, T. (1994): Wirtschaftliche Bedeutung von Halmbasisfusariosen an Getreide und ihre Stellung im Gesamtkomplex Fusarium. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt (301), S. 399.
- Lennartz, B., Wichtmann, W., Weber, K. & Widmoser, P. (1997): Pflanzenschutzmitteleinträge in Oberflächengewässer durch Dränung. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (330), S. 39-62.
- Liebenroth, I., Dunkelgod, P., Gunia, W. & Thiere, J. (1983): Auswertungsrichtlinien MMK - Stand 1983. AdL. FZB Müncheberg, 55 S.
- Lienemann, K., Meier, A., Oerke, E.-C., Steiner, U. & Dehne, H.-W. (2000): Control of Fusarium head blight in wheat. Modern Fungicides and Antifungal Compounds III, S. 253-261.
- Linke, C. (1998): Direktsaat – eine Bestandsaufnahme unter besonderer Berücksichtigung technischer, agronomischer und ökonomischer Aspekte. Dissertation, Universität Hohenheim, 482 S.
- Logan, T.J., Davidson, J.M., Baker, J.L. & Overcash, M.R. (1987): Effects of conservation tillage on groundwater quality – nitrates and pesticides. Lewis Publisher, Chelsea, Michigan (USA).
- Lücke, W., von Hörsten, D. & Hage, H. (2004): Mährescherhächsler – Neuentwicklung mit großer Wurfweite und Beschädigung des Verlustgetreides. Landtechnik (1), S. 30-31.
- Lütke Entrup, N. & Oehmichen, J. (2000): Perspektiven für den Integrierten Landbau. In: Lehrbuch des Pflanzenbaus 2, S. 1-21.
- Lütke Entrup, N. & Gröblichhoff, F.F. (2001): Bodenbewirtschaftung im Umbruch. Tagung Soest, 08.-19.05.2001, 231 S.
- Lütke Entrup, N., Barth, H.-K., Gröblichhoff, F.F. & Erlach, F. (2002): Boden- und Stoffabtrag von ackerbaulich genutzten Flächen – Ausmaß und Minderungsstrategien. Abschlussbericht. Fachhochschule Südwestfalen.

- Mähner, T. (1999): Wachstum und Ertrag von Getreide nach mechanischer Bodenbelastung in unterschiedlichen Bearbeitungssystemen. Dissertation, Universität Göttingen, 204 S.
- Masloff, S. & Selig, S. (2005): Mykotoxine – Was tun, wenn 2005 ein Mykotoxinjahr wird? DLG-Mitteilungen (5), S. 12-17.
- Masse, L., Patni, N.K., Jui, P.Y. & Clegg, B.S. (1996): Tile Effluent Quality and Chemical Losses Under Conventional and No Tillage – Part 2: Atrazine and Metolachlor. Transactions of the ASAE 39 (5), S. 1673-1679.
- Mastel, K. (2004): Fusarien im Mais ernst nehmen. DLG-Mitteilungen (9), S. 48-50.
- Matthies, A., Menck, B.-H. & Bleiholder, H. (2000): Fusarium-toxins in winter wheat – results from 1998-1999 as well as possibility for fungicide treatments. Mitteilung aus der Biologischen Bundesanstalt (376), Tagungsband 52, Deutsche Pflanzenschutztagung Freising-Weihenstephan, S. 72.
- Mauler-Machnik, A. (2000): Einfluß pflanzenbaulicher Maßnahmen auf Auftreten und Epidemiologie von Ährenfusariosen und Mykotoxinen. Mitteilung der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft 376. Tagungsband. 52. Internationale Pflanzenschutztagung Freising-Weihenstephan, S. 66-67.
- Mazzoncini, M., Lorenzi, R., Risaliti, R., Sorce, C., Ginanni, M. & Curadi, M. (1999): Clortoluron dissipation in clay soil under different tillage systems. In: Human and environmental exposure to xenobiotics. Proceedings of the XI. Symposium Pesticide Chemistry. S. 413-423.
- Mc Kenzie, B.M. & Dexter, A.R. (1988a): Axial pressures generated by earthworm *Aporretodea rosea*. Biology and Fertility of Soils 5 (4), S. 323-327.
- Mc Kenzie, B.M. & Dexter, A.R. (1988b): Radial pressures generated by earthworm *Aporretodea rosea*. Biology and Fertility of Soils 5 (4), S. 328-332.
- Mc Keyes, E. (1985): Soil cutting and tillage. Elsevier, Amsterdam, 217 S.
- Meinert, G. (2003): Bodenschutz gleich Fusarien? DLG-Mitteilungen (2), S. 16-19.
- Miedaner, T. & Schneider, B. (2002): Züchtungsstrategien zur Verringerung von Ährenfusariosen und Mykotoxingehalten bei Getreide. Wissenschaftliche Tagung Bonn, S. 55-67.
- Mielke, H. & Weinert, J. (1996): Untersuchungen zur Wirkung verschiedener Fungizide gegenüber dem Erreger der partiellen Taubährigkeit. Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst 48, S. 93-95.
- Mielke, H., Rodemann, B., Bartels, G. & Ellner, F.M. (2000): Ährenfusariosen im Weizenanbau. Getreide-Magazin (2), S. 104-108.
- Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2004): Bodenschutz in der Landwirtschaft. Düsseldorf.
- Mollenhauer, K. & Ortmeier, B. (1995): Untersuchungen zum Einfluß der konservierenden Bodenbearbeitung auf Oberflächenabfluß und Bodenerosion. In: Einführung von Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung in die Praxis. KTBL, Darmstadt, S. 131-162.

- Mosimann, Th., Sanders, S., Brunotte, J., Grocholl, J., Marahrens, S., Preuss, E. & Streun, M. (2004): Bodenerosion selbst abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater in Niedersachsen. Universität Hannover, 29 S.
- Mosimann, Th., Sanders, S. & Brunotte, J. (2005): Erosionsschutz in Fahrgassen – Wirkung der Intervallbegrünung in verschiedenen Kulturen und Bearbeitungsverfahren. 13 S. (eingereicht in Pflanzenbauwissenschaften).
- Münchhausen von, H. & Nieberg, H. (1997): Agrar-Umweltindikatoren: Grundlagen, Verwendungsmöglichkeiten und Ergebnisse einer Expertenbefragung. In: Umweltverträgliche Pflanzenproduktion, S. 13-30, ISBN 3-535-02476-5.
- Munzert, M. & Lepschy, J. (2005): Verfahren zur Abschätzung des DON-Gehaltes. Getreide-Magazin (1), S. 46-47.
- Newmark, N.M. (1942): Influence charts for computation of stress in elastic foundation. Eng. Exp. Stat. Bull. Series No. 338, University of Illinois, Bulletin 40 (2), Urbana.
- Nieder, R. (1998): Bodenbearbeitung und Nährstoffaustrag. KTBL-Arbeitspapier 266, S. 91-116.
- Nitzsche, O., Schmidt, W. & Gebhart, C. (2002): Fusarium pfluglos bekämpfen. Landwirtschaft ohne Pflug (5), S. 22-24.
- NLÖ – Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (2003): Nachhaltiges Nds. 23 – dauerhaft umweltgerechter Entwicklung. NLÖ Hildesheim, 52 S.
- Nolting, K., Brunotte, J., Lorenz, M. & Sommer, C. (2006): Entwicklung eines Online-Sensorsystems zur Erkennung der aktuellen Befahrbarkeit von Ackerböden. BMBF-Projekt 03300316. Projektbericht 2006, 30 S.
- O’Sullivan, M.F. & Simota, C. (1995): Modelling the environmental impacts of soil compaction: a review. Soil & Tillage Research 35 (1-2), S. 69-84.
- Obst, A. (1988): Wie man Ährenfusariosen vermeidet. DLG-Mitteilungen (9), S. 470-471.
- Obst, A., Lepschy, J., von Gleissenthall, J. & Huber, G. (1992): Zur gezielten Bekämpfung der Ährenfusarien bei Weizen – Beobachtungen und Versuchsergebnisse aus Bayern. Gesunde Pflanzen 44, S. 40-47.
- Obst, A., Bechtel, A. (2000): Witterungsvoraussetzungen für den Ährenbefall des Weizens mit *Fusarium graminearum*. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (3), S. 81-88.
- Obst, A., Gammel, P. (2000): Fungizide gegen den Ährenparasiten *Fusarium Graminearum*. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (3), S. 89-98.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2001): Environmental Indicators for Agriculture, Volume 3. OECD Publications. 2 rue André-Pascal, 75775 Paris le desc 16.
- Oerke, E.C., Meier, A., Lienemann, K., Meyer, G., Muthomi, J., Schade-Schütze, A., Steiner, U. & Dehne, H.-W. (2002): Auftreten und Bekämpfung von *Fusarium*-Arten im Rheinland. Wissenschaftliche Tagung Bonn, S. 32-44.

- Offenbacher, G. (2002): Zur Analytik von Fusarium-Toxinen. In: Band Wissenschaftliche Fachtagung Bonn, 7.11.2001, S. 4-13.
- Oldenburg, E. (2004): Crop cultivation measures to reduce mykotoxin contamination in cereals. *Journal of Applied Botany und Food Quality* 78, S. 174-177.
- Oldenburg, E., Weinert, J. & Wolf, G.A. (1999): Einfluß von Pflanzenschutzmaßnahmen auf den Fusariumtoxin-Gehalt in Weizen. *Proceedings*, 21. Mykotoxin-Workshop Jena, 07.-09. Juni 1999, S. 30-34.
- Oldenburg, E. & Brunotte, J. (2002): Mykotoxine – ein spezifisches Problem bei konservierender Bodenbearbeitung? *Getreide-Magazin* (3), S. 148-149.
- Oldenburg, E. & Bramm, A. (2004): Einfluss der Stickstoffdüngung auf Fusariumtoxin-Gehalt in Winterweizen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 16, S. 175-176.
- Oldmann, C.R., Hakkeling R.T.A. & Sombrock V.G. (1991): World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation. *Global Assessment of Soil Degradation GLASOD*. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Olfe, G. (1993): Zur Bodenbelastung durch den Schlepper- und Maschineneinsatz in der pflanzlichen Produktion. *KTBL-Schrift* 362, S. 12-28.
- Patni, N.K., Masse, L. & Jui, P.Y. (1996): Tile Effluent Quality and Chemical Losses Under Conventional and No Tillage – Part 1: Flow and Nitrate. *Transactions of the ASAE* 39 (5), S. 1665-1672.
- Paul, R. (1999): Zur Verdichtungsgefährdung im Rahmen des Bodengefügeschutzes auf großen Flächen. In: *Einfluß der Großflächen-Landwirtschaft auf den Boden*. Kolloquium, 06.05.1999, Jena, S. 54-59.
- Paulsen, H.-M., Oldenburg, E. & Böhm, H. (2004): Monitoring of fusarium toxin contents in various crops and grassland in different organic farm types. In: *Quality of organic production and its improvement*. International Conference, October 14-15, Lithuanian University of Agriculture, Kaunas, S. 23-24.
- Pestemer, W. (2000) In: Bahadir, M., Parlar, H. & Spiteller, M. (Hrsg.): *Springer Umweltlexikon*, 2. Auflage. Springer Berlin, Heidelberg, New York. ISBN: 3-540-63561-0.
- Pestemer, W., Rodemann, B. & Reese-Stähler, G. (2001): Rückstände von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer. *Mitteilung der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin* (381), S. 31-34.
- Pestemer, W., Süß, A., Bischoff, G., Mueller A.C. & Stähler, M. (2005): Anleitung zur Durchführung eines chemisch-biologischen Monitoring von Pflanzenschutzmitteln in Gewässern der Agrarlandschaft. *Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin* H. 125, 43 S.
- Petelkau, H. (1984): Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag. *Tagungsbericht*. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin, S. 25-34.
- Petelkau, H. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtungen. *KTBL-Arbeitspapier* 266, S. 56-79.

- Petelkau, H., Seidel, K. & Frielinghaus, M. (2000): Ermittlung des Verdichtungswiderstandes von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen. Abschlussbericht zum Werkvertrag Nr. 350.214 des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg.
- Piorr, H.P., Frielinghaus, M. & Müller, L. (2000): Soil Indicator Systems – the basis of soil conservation decisions. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 93, S. 161-164.
- Pringas, C. (2005): Reduzierte Bodenbearbeitungsintensität in einer Zuckerrüben-Winterweizen-Winterweizen-Fruchtfolge – Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Dissertation, Universität Göttingen, 147 S.
- Pontzen, R. & Mauler-Machnik, A. (1994): Zum Einfluß von Tebuconazol auf die Mykotoxinbildung durch Getreidefusariosen. Mitteilung aus der Biologischen Bundesanstalt (301), S. 406.
- Prochnow, A. (1999): Angepaßtes Befahren von Niedermoorgrünland. Schriftenreihe des Landschafts-Fördervereins Nuthe-Nieplitz-Niederung e.V. 3, 106 S.
- Quillin, K.J. (2000): Ontogenetic scaling of burrowing forces in the earthworm *Lumbricus terrestris*. Journal of Experimental Biology 203 (18), S. 2757-2770.
- Reese-Stähler, G., Kreye, H., Rodemann, B. & Pestemer, W. (2001): Rückstände in Oberflächengewässer. Mitteilung der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin (381), S. 97-115.
- Richter, G. (1998): Bodenerosion. Wissensch. Buchgesellschaft, Darmstadt. 26 l + S.
- Richter, O., Söndgerath, D. & Dieckkrüger, B. (1996): Wasser- und Stoffdynamik in Agrarökosystemen. Landschaftsökologie und Umweltforschung (24).
- Rintelen, J. (2000): Ist das starke Auftreten von *Gibberella zeae* (*Fusarium graminearum*) an Getreideähren auf die Zunahme des Maisanbaus zurückzuführen? Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (3), S. 11-14.
- Ripke, F.O., Warnecke – Busch, G., Garrelts, J. (2001): Technische Lösungsansätze zur Minimierung des Eintrags von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer durch Abtrift. Mitteilung der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (381), S.82-96.
- Rodemann, B. (2003): Auf resistente Sorten setzen. DLG-Mitteilungen (3), S. 44-46.
- Rodemann, B. & Bartels, G. (2004): Fusariumbefall – Schadbild und Ausbreitung. Mais 32 (1), S. 4-7.
- Rogasik, H., Joschko, M. & Brunotte, J. (1994): Nutzung der Röntgen-Computertomographie zum Nachweis von Gefügeveränderungen durch Mulchsaat. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 73, S. 111-114.
- Rogasik, H. & Brunotte, J. (2000): Gefügeveränderung im Unterboden auf dem Vorgewende nach Befahrung mit Zuckerrüben-Vollernter. Braunschweig (unveröffentlicht).

- Rosner, J. & Klik, A. (2005): Konservierende Bodenbearbeitungssysteme. *Gesunde Pflanzen* (57), S. 179-186.
- Roth, C.H. (1992): Die Bedeutung der Oberflächenverschlammung für die Auslösung von Abfluß und Abträgen. Habilitation, TU Berlin, 179 S.
- Roth, C.H. (1995): Physik. Grundlagen der Wassererosion. In Blume et al.: *Handbuch der Bodenkunde*. Landsburg/Lech. Ecomed 1996. Kapitel 6.3.1.1.
- Roth, C.H. & Joschko, M. (1991): A note on the reduction of run off from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (154), S. 101-105.
- Rüdiger, A. (1989): Beitrag zur quantitativen Bewertung der Bodenbelastung durch Radlaufwerke. Dissertation, Universität Dresden, 99 S.
- Ruhm, E. (1983): Schlechte Voraussetzungen für eine gute Ernte. *Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung* (4), S. 3-4.
- Sadeghi, A.M. & Isensee, A.R. (1997): Alachlor and cyanazine persistence in soil under different tillage and rainfall regimes. *Soil Science* 162 (6), S. 430-438.
- Sander, K.W., Witt, W.W. & Barrett, W. (1989): Movement of triazine herbicides in conventional and conservation tillage systems. *Proceedings of a National Conference, 11.-12. Mai 1989, Blackburg, Virginia Water Resource Research Center, VPI and State University (USA)*, S. 378-382.
- Sanders, S. & Mosimann, Th. (2005): Erosionsschutz durch Intervallbegrünung in Fahrgassen. *Wasser und Abfall* (10), S. 34-38.
- Sauer, T.J. & Daniel, T.C. (1987): Effects of tillage system on run off losses of surface-applied pesticides. *Soil Science Society of America Journal* (51), S. 410-415.
- Schäfer, W. (2005): Cross Compliance – Bewertung der Wassererosionsgefährdung. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Bremen. Schriftliche Mitteilung.
- Schäfer, W., Severin, K., Mosimann, Th., Brunotte, J., Thiermann, A. & Bartelt, R. (2003): Bodenerosion durch Wasser und Wind. In: *Bodenqualitätszielkonzept Niedersachsen Teil: Bodenerosion und Bodenversiegelung*. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hildesheim, S. 13-29.
- Schäfer-Landefeld, L. & Brandhuber, R. (2001): Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Vorbelastung von Böden – ein tragfähiges Konzept? *Bodenschutz* (2), S. 48-52.
- Schäfer-Landefeld, L., Brandhuber, R., Fenner, St., Koch, H.-J. & Stockfisch, N. (2004): Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. *Soil & Tillage Research* (75), S. 75-86.
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1979): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 10. Auflage. F. Enke Verlag, Stuttgart.
- Schick, V. (1991): Minderung von Spurschäden auf Ackerflächen. Dissertation, Universität Kiel, 176 S.
- Schiller, R. & Gatzweiler, E. (1998): Forschung für den Gewässerschutz. *Akzente* (2), S. 14-15.

- Schlüter, K., von Blücher, B. & Kropf, U. (2003): Blattkrankheiten und Fusarien – bei Mulchsaat ein Problem? *Getreide-Magazin* (1), S. 44-47.
- Schmidt, J., Werner, M., Michael, A. & Schmidt, W. (1996): Erosion 2 D/3 D – ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Hrsg.: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden. ISBN 3-00-001 453-5.
- Schmidt, J., Werner, V., Michael, M. & Schmidt, W.-A. (1999): Planung und Bemessung von Erosionsschutzmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. *Wasser und Boden* 52 (12), S. 19-24.
- Schmidt, W. (1994): Bodenerosion durch Wasser in Sachsen. Broschüre Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Schmidt, W., Nitzsche, O., Stahl, H. & Marschall, K. (2003): Umsetzung des Bodenschutzes – Erfahrungen aus Sachsen. In: Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung – Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung. UBA-Texte 35/04, S. 61-70.
- Schmidt, W. & Nitzsche, O. (2004): Fusariumrisiko in Maisfruchtfolgen senken. *Mais* 32 (1), S. 8-11.
- Schmidt, W.-A. (1999): Untersuchungen der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. In: Bodenschonung und Kosteneinsparung. KTBL-Schrift 266, S. 86-95.
- Schneider, M., Hertl, P. & Düfer, B. (1997): Pflanzenschutzmittelabschwemmung von landwirtschaftlichen Flächen – Eine Literaturlauswertung und Betrachtung. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* (330), S. 63-86.
- Schnieder, F. (2005): Erfahrungen bei der Bekämpfung von Ährenfusariosen. *Getreide-Magazin* (2), S. 104-107.
- Schoenbeck, F. (1979): Pflanzenkrankheiten. B.G. Teubner Stuttgart.
- Schröder, D. & Schneider, R. (2005): Beste fachliche Praxis zur Vermeidung von Bodenschadverdichtungen. *Getreide-Magazin* (2), S. 144-148.
- Schulze, M. & Brunotte, J. (2004): Akzeptanz von Mulchsaatverfahren im Zuckerrübenanbau. Schriftliche Mitteilung, Bockenem.
- Schulze-Lammers, P., Tschape, M. & Strätz, J. (2001): Bodenbelastung durch Rad- und Achslasten von Landmaschinen in der Zuckerrübenernte. 14. Wissenschaftliche Fachtagung Bonn, 5.12.2001.
- Schwabe, M., Rath, F., Golomb, A., Engels, R. & Krämer, J. (1993): Immunologischer Schnellnachweis von Fusarium in Getreide. *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 11, S. 408-412.
- Schwark, A. (2005): Bewirtschaftung und Status von Ackerböden in Schleswig-Holstein. Dissertation, Universität Kiel, 144 S.
- Schwertmann, U., Vogl, W. & Kainz, M. (1987): Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Verlag Eugen Ulmer.
- Shipitalo, M.J., Dietz, W.A. & Edwards, W.M. (2000): Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil & Tillage Research*, 53, S. 167-183.

- Shipitola, M. & Gibbs, F. (2000): Potential of Earthworm Burrows to Transmit Injected Animal Wastes to Tile Drains. *Soil Science Society of America Journal*, 64, S. 2103-2108.
- Sims, G.K., Buhler, D.D. & Turco, R.F. (1994): Residue management impact on the environment. In: *Managing agricultural residues*. Unger, P.W., Lewis Publishers, Boca-Raton, Ann Arbor, London, Tokio, S. 77-98.
- Smith, S. Jr., Johnson, R.M. & Pepperman, A.B. (2001): Formulation and Tillage Effects on Atrazine and Alachlor in Shallow Ground Water in Upland Corn Production. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* (67), S. 113-121.
- Snijders, C.H.A. (1990): Systematic fungal growth of *Fusarium culmorum* in stems of winter wheat. *Journal of Phythology* 129, S. 133-140.
- Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C., 1994: *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier Science B.V., ISBN 0-444-88286-3.
- Söhne, W. (1953): Druckverteilung und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik* (5), S. 49-63.
- Sommer, C. (1974): Die Verdichtungsempfindlichkeit zweier Ackerböden – ein Beitrag zum Verhalten von Böden unter vertikaler Belastung im Saugspannungsbereich bis pF 2,7. Dissertation, TU-Braunschweig. *Landbauforschung Völkenrode*, SH 26.
- Sommer, C. (1998a): Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. *Bodenschutz* (1), S. 12-16
- Sommer, C. (1998b): Konservierende Bodenbearbeitung - ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. Habilitation, Braunschweig/Kassel. *Landbauforschung Völkenrode*, SH 191.
- Sommer, C. (2003): Techniken und Verfahren zur ressourcenschonenden Bodennutzung – Rückblick und Perspektiven. *Landbauforschung Völkenrode*, SH 256, S. 101-110.
- Sommer, C., Ruhm, E. & Altemüller, H.-J. (1981): Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenertrag. *Kalibriefe* 15 (7), S. 429-448.
- Sommer, C., Brandhuber, R., Brunotte, J. & Buchner, W. (2001a): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. *Bund-Länder Papier, BMVEL Bonn*, S. 14-41.
- Sommer, C., Brunotte, J. & Ortmeier, B. (2001b): Bodenverdichtung – Felduntersuchungen zu Lösungsansätzen. *Zuckerrübe* (6), S. 364-371.
- Sommer, C., Brunotte, J. & Lebert, M. (2002): Der Boden unter Druck – was ist zu tun? Handlungsempfehlungen und Botschaften. *Zuckerindustrie* 127 (9), S. 682-689.
- Sommer, C. & Brunotte, J. (2003): Lösungsansätze zum Problembereich Bodenschadverdichtung in der Pflanzenproduktion. *Landnutzung und Landentwicklung* (5), S. 220-228.
- Sonderhoff, W. (1988): Messungen zum Status der Bodenverdichtung und Bedeutung von Mechanisierungsverfahren. Dissertation, Universität Kiel, 142 S.

- Spiess, E. & Diserens, E. (2001): Zuckerrüben: Erntetechnik und Bodenschutz - vielseitige Wechselbeziehungen zwischen Technik, Erntequalität und Ökologie. FAT-Berichte Tänikon Nr. 567, 20 S.
- Stemann, G. & Lütke Entrup, N. (2002): Anbaualternative für spitze Rechner. Landwirtschaft ohne Pflug (2), S. 5-9.
- Stemann, G. (2004): Fusarium: Weizen nach Mais trotzdem pfluglos bestellen? top agrar (10), S. 56-59.
- Sutton J.C. (1982): Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. Canadian Journal of Plant Pathology 4, S. 195.
- Tebrügge, F. (1994): Introduction on the EU-Concerted Action: "Experience with the applikation of no-tillage production in the West-European countries". Proceedings of the EC-Workshop I, Gießen. 27.-28. Juni. Wiss. Fachverlag, Gießen.
- Tenholtern, R. & Feldwisch, N. (2004): Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr bei Bodenerosion durch Wasser. Bodenschutz (4), S. 112-117.
- Tijink, F.G.J. (2003): Technical guidelines for preventing subsoil compaction. Landbau-forschung Völknerode, SH 256, S. 39-48.
- Timmermann, F. & Mokry, M. (1990): Bilanzierung ausgewählter Herbizide landwirtschaftlich genutzter Böden im Untersuchungsgebiet, 35 S.
- Tischner, H. & Doleschel, P. (2003): Einflussfaktoren auf den Befall und die Toxinbildung durch Ährenfusarien an Weizen. Getreide-Magazin (2), S. 68-74.
- Trojan, M.D. & Linden, D.R. (1998): Macroporosity and hydraulic properties of earthworm affected soils as influenced by tillage and residue management. Soil Science Society of America Journal (62), S. 1687-1692.
- Tyler, D.D. & Thomas, G.W. (1977): Lysimeter measurements of nitrate and chloride losses from soil under conventional and no-till corn. Journal of Environmental Quality (6), S. 63-66.
- UNCED – United Nations Conference on Environment and Development (1992): Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen. Umweltgipfel in Rio de Janeiro.
- UNEP – United Nations Environment Programme (1982): Weltbodenstrategie - internationale Zusammenarbeit zur vernünftigen Nutzung der Bodenressourcen.
- Van der Veer, S., Meyer, M., Chervet, A. & Sturny, W.G. (2006): Mechanische Bodenbelastung bei der Zuckerrübenernte nach Pflug und Direktsaat – Direktsaat verbessert Tragfähigkeit. Landwirtschaft ohne Pflug (1), S. 28-35.
- Van Hoof, F., van Ackermann, P. & Celens, J. (1992): N-Herbicides in the river Meuse basin in Belgium and their behaviour during water treatment. Water Supply (10), S. 81-88.
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2006): Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. Richtlinie 6101, Düsseldorf, 31 S.
- Vetter, H. & Lichtenstein, H. (1968): Die biologische Auflösung von Unterbodenverdichtungen. Landwirtschaftliche Forschung SH 22, S. 85-88.

- Vorhees, W.B., Young R.A. & Lyles, L. (1979): Wheel traffic considerations in erosion research. *American Society of Agricultural Engineers* 22, S. 344-349.
- Voßhenrich, H.-H. (1995): Vergleich zwischen Pflug, Kreiselegge, Drillsaat und Fräsohlsaart. Habilitation, Universität Kiel, 178 S.
- Voßhenrich, H.-H. & Brunotte, J. (2004): Fehler beim Strohmanagement vermeiden. *Hannoversche Land- u. Forstwirtschaftliche Zeitschrift* (34), S. 19-23.
- Voßhenrich, H.-H., Brunotte, J. & Ortmeier, B. (2003): Methoden zur Bewertung der Strohverteilung und Einarbeitung. *Landtechnik* (2), S. 92-93.
- Voßhenrich, H.-H., Brunotte, J. & Ortmeier, B. (2005): Gitterrastermethode mit Strohindex zur Bewertung der Stroheinarbeitung. *Landtechnik* (6), S. 328-329.
- Watts, D.W. & Hall, J.K. (1996): Tillage and application effects on herbicide leaching and run off. *Soil & Tillage Research* (39), S. 241-257.
- Wegener, M. & Wolf, A. (1995): Halmbasiskrankheit auch durch Fusarien. *Der Pflanzenarzt* (4), S. 23.25.
- Wegener, U. (2001): Dauerhafte Bodenbearbeitungsverfahren in Zuckerrübenfruchtfolgen – Ertragsbildung, Rentabilität, Energiebilanz und Bodenerosion. Dissertation, Universität Göttingen, 145 S.
- Weickel, J. & Winkler, E. (2000): Passiver Hochwasserschutz durch bodenschonende Bearbeitung. *Landesausstellung für Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Mainz*. Heft 10, 133 S.
- Weinert, A. (1995): Einfluß und Zusammenwirken verschiedener Faktoren auf den Fusarium-Ährenbefall im Getreide. *Schriftliche Mitteilung, Göttingen*.
- Weißbach, M. (1994): Wirkung von Fahrwerken auf den Boden, insbesondere im Grenzbereich Boden/Pflanze. Dissertation, Universität Kiel, 227 S.
- Weißbach, M. (2003): Landtechnische Untersuchungen zur Wirkung bodenschonender Fahrwerke an Schleppern und Arbeitsmaschinen mit verschiedenen Radlasten. Habilitation, Universität Kiel, 197 S.
- Weißbach, M. & Isensee, E. (2000): Gute fachliche Praxis beim Einsatz leistungsfähiger Erntetechnik. *Landtechnik* (1), S. 12-13.
- Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (1987): *Our common future*. Brundlandt-Bericht.
- Werner, D. (1999): Bodenerosionsschutz im Landwirtschaftsbetrieb. In: *Einfluß der Großflächenlandwirtschaft auf den Boden*. Kolloquium Jena 6.5.97, S. 60-66.
- Werner, D. & Paul, R. (1999): Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. *Wasser und Boden* 51 (12), S. 10-14.
- Werner, D. & Thämert, W. (1989): Zur Diagnose des physikalischen Bodenzustandes auf Produktionsflächen. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 33 (12), S. 729-739.
- Werner, W., Olf, H.-V., Auerswald, K. & Isermann, K. (1991): Stickstoff- und Phosphoreintrag in Fließgewässer über "diffuse Quellen". In: Hamm, A. (Hrsg.): *Studie*

über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässer. Academia Verlag, St. Augustin, S. 665-764.

Wessolek, G., König, R. & Renger, M. (1992): Entwicklung und Anwendung von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen für Hangstandorte. Boden-Ökologie und Bodengenese 8, Berlin, 96 S.

Wiesenhof, M., Schutte, B. & Köller, K. (2004): Hohenheimer Messmethoden zur Stoppelbearbeitung. Landtechnik (1), S. 14-15.

Wilde, Th. (1999): Regeneration von Ackerböden nach starker landtechnischer Belastung. Dissertation, Universität Kiel, 169 S.

Wishmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. USDA Agric. Handbook Nr. 537.

Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz beim BMU (2000): Wege zum Vorsorgenden Bodenschutz. Erich Schmidt Verlag. ISBN 3502 05867 2.

Wosnitza, A. (2000): Verbesserung der Fusariumresistenz-Bewertung bei Weizen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (3), S. 59-74.

Zimmerling, B. & Schmidt, W. (2002): Beitrag der konservierenden Bodenbearbeitung zum vorbeugenden Bodenschutz. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 7, S. 23-51.

Zimmermann, G. (2000): Nutzung der gentechnischen Resistenz zur Eindämmung von Fusarium-Ährenkrankheiten. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (3), S. 49-57.

Abkürzungen/Glossar

2D	zweidimensionales Erosionsmodell
3D	dreidimensionales Erosionsmodell
A	Abtrag des Bodens in t/ha
AB	Applikation Blüte
ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
AFP	Antifungal Protein
Amistar	Getreidefungizid aus der Wirkstoffgruppe der Strobilurine
Atrazin	Maisherbizid – Wirkstoff
ATV-DVWK	Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
Azol	systemische Wirkstoffgruppe zur Bekämpfung von Pilzkrankheiten
Azoxystrobin	Getreidefungizid – Wirkstoff
BB	Bodenbearbeitung
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BD	Bodenbedeckungsgrad
"best case"	bester Fall
BML	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BSL	Bundessortenliste
BÜ	betriebsübliche Fungizid-Applikation
BZ	Bodenzahl
Caramba	Getreidefungizid aus der Wirkstoffgruppe der Azole
CC	Cross Compliance = Einhalten gesetzlicher Standards und festgelegter Regeln, die die Direktzahlungen der EU an die Betriebe gewährleisten
C-Faktor	Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor
Chloridazon	Rübenherbizid – Wirkstoff
Chlortoluron	Getreideherbizid – Wirkstoff

C/N	Kohlenstoff-/Stickstoff-Verhältnis
cm/d	Zentimeter pro Tag
CT	Computertomographie
d	Tag
<i>d</i>	Durchmesser
DAL	Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung
DGPS	Differential Global Positioning System ist eine Bezeichnung für Verfahren, die durch das Ausstrahlen von Korrekturinformationen die Genauigkeit der Navigation mittels GPS erhöhen können.
DIN	Deutsche Industrie Norm(en)
DON	Desoxynivalenol
DRIP	Drainage- und Run off-Input von Pflanzenschutzmitteln
DS	Direktsaat
dt	Dezitonne
dt·ha ⁻¹ ·a ⁻¹	Dezitonne pro Hektar und Jahr
DT ₅₀	Der DT ₅₀ -Wert steht für die Anzahl von Tagen, in der 50 % des Wirkstoffes abgebaut werden.
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.
E DIN	DIN-Norm für Erosionsermittlung
EG	Europäische Gemeinschaft
ELISA	Immunoaffinitäts-Test zur Ermittlung des DON-Gehaltes
EMiL	GIS-gestütztes Erosionsmanagement in der Landwirtschaft
Epoxiconazol	Getreidefungizid – Wirkstoff
Ethofumesat	Rübenherbizid – Wirkstoff
EU	Europäische Union
€	Euro
€·ha ⁻¹ ·a ⁻¹	Euro pro Hektar und Jahr
€/dt	Euro pro Dezitonne
F.	Fusarium
FAO	Food and Agriculture Organization (Welternährungskommission)
Fenpropidin	Getreidefungizid – Wirkstoff
Fenpropimorph	Getreidefungizid – Wirkstoff
FF	Frühjahrespflugfurche
FK	Feldkapazität

Folicur	Getreidefungizid aus der Wirkstoffgruppe der Azole
FuE	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
Fumonisine	Schimmelpilzgifte (Mykotoxine), die von Schimmelpilzen der Gattung <i>Fusarium</i> gebildet werden. Fumonisine werden hauptsächlich durch die Schimmelpilze <i>Fusarium moniliforme</i> , <i>F. proliferatum</i> und <i>F. authophilum</i> gebildet.
Fungizid	Pflanzenschutzmittel zur Bekämpfung von Pilzkrankheiten
Gantry	In der Breite ausschiebbares, kranähnliches Trägerfahrzeug, das sich auf 8-12 m breitem, fest angelegtem Boden bewegt.
g/ha	Gramm pro Hektar
g/m ²	Gramm pro Quadratmeter
g/m ³	Gramm pro Kubikmeter
G	Gründigkeit des Bodens
GIS	Geoinformationssysteme
Gladio	Getreidefungizid aus der Wirkstoffgruppe der Azole
ha	Hektar
Herbizid	Pflanzenschutzmittel zur Bekämpfung von Ungräsern und Unkräutern
HF	Herbstpflugfurche
HPLC	chromatographisches Verfahren zur Bestimmung des DON-Gehaltes
HSM	Hydrostatische Setzungsmessung
Interflow	bodeninnerer Wasserabfluss auf undurchlässigen Schichten
Isoproturon	Getreideherbizid – Wirkstoff
K-Faktor	Bodenerodierbarkeitsfaktor
kf	Wasserleitfähigkeit
kg	Kilogramm
kg/a	Kilogramm pro Jahr
kg/m ²	Kilogramm pro Quadratmeter
K _{oc} -Wert	Koeffizient für organischen Kohlenstoff (Adsorptionsneigung)
kPa	Kilopascal
Kresoxim-Methyl	Getreidefungizid – Wirkstoff
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
kW	Kilowatt
KWS	Kleinwanzleber Saatzucht

L.	Lumbricus
LS-Faktor	Topografie-Faktor
IU	lehmiger Schluff
m ²	Quadratmeter
Metazachlor	Rapsherbizid – Wirkstoff
Metconazol	Getreidefungizid – Wirkstoff
mg	Milligramm
mg/kg	Milligramm pro Kilogramm
mg/l	Milligramm pro Liter
Mio.	Million(en)
mm	Millimeter
mm/h	Millimeter pro Stunde
Modulation	Zusätzliche Zahlungen der EU und der Länder an die Betriebe für Leistungen zum Umweltschutz, die über die gute fachliche Praxis hinausgehen.
MMK	mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung
MSmL	Mulchsaat mit Lockerung
MSmL-mH	Mulchsaat mit Lockerung, mit vorgeschaltetem Häckseln
MSmL-oH	Mulchsaat mit Lockerung, ohne vorgeschaltetes Häckseln
MSmS	Mulchsaat mit Saatbettbereitung
MSoL	Mulchsaat ohne Lockerung
MSoS	Mulchsaat ohne Saatbettbereitung
µg/l	Mikrogramm pro Liter
N	Stickstoff
n	Anzahl Stichproben
NIBIS	Niedersächsisches Boden- und Informationssystem
NIRS	Nah-Infrarotspektrum
NLÖ	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie
NRW	Nordrhein-Westfalen
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
P	Erosionsschutzfaktor
Pendimethalin	Maisherbizid – Wirkstoff
P	Pflug

pF	Kennzeichnung der Wasserspannung (p = Potenz, F = Freie Energie)
Pi	Reifeninnendruck
Propiconazol	Getreidefungizid – Wirkstoff
Prothioconazol	Getreidefungizid – Wirkstoff
PSM	Pflanzenschutzmittel
Quinmerac	Rübenherbizid – Wirkstoff
R-Faktor	Regen- und Oberflächenabflussfaktor
r	Radius
R	Radialreifen
Rü	Rüben
Rü-WW	Rüben-Winterweizen
RW	Regenwurm
s	Standardabweichung
Spiroxamine	Getreidefungizid – Wirkstoff
Strobilurin	systemische Wirkstoffgruppe zur Bekämpfung von Pilzkrankheiten
SVGK	Schadverdichtungsgefährdungsklassen
St	Strohmulch
t	Tonne
T	Ton
t·ha ⁻¹ ·a ⁻¹	Tonne pro Hektar und Jahr
tL	toniger Lehm
TBA	Terbuthylazin (= Herbizidwirkstoff im Maisanbau)
Tebuconazol	Getreidefungizid – Wirkstoff
Terbuthylazin	Maisherbizid – Wirkstoff
Tracer	Markierungsstoff (hier: Bromid), mit dessen Hilfe u. a. der Verlauf von Poren im Boden verfolgt werden kann.
TS	Trockensubstanz
TS/m ²	Trockensubstanz pro Quadratmeter
U	Schluff
UBA	Umweltbundesamt
UNEP	United Nations Environment Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

VK	Variationskoeffizient(en)
VO	Verordnung
Vol.-%	Volumenprozent
WG	Wintergerste
WGi	Anfangswassergehalt
"worst case"	schlimmster Fall
WW	Winterweizen
Zerealien	Gericht aus Getreideflocken
ZF	Zwischenfruchtanbau
ZON	Zearalenon
ZR	Zuckerrüben

Verzeichnis Abbildungen

- Abb. 1:** Rückstandsverhalten: PSM-Dynamik in Agrarökosystemen (aus Pestermer, Springer Umweltlexikon, 2000)
- Abb. 2:** Infektionswege der Fusarien (Weinert, 1995)
- Abb. 3:** DON-Gehalt von Winterweizen (Ernte 1993-1999) in Abhängigkeit von Vorfrucht und Bodenbearbeitung (nach Beck & Lepschy, 2000)
- Abb. 4:** Porenvolumen und Bodendichte als Funktion der Bodentiefe 1952 (---) und 1982 (...) nach Ruhm (1983) und nach Brunotte et al. (2005a) (—)
- Abb. 5:** Gesättigte Wasserleitfähigkeit der Statuserhebung "Bodenstruktur von Lössböden" in Südniedersachsen 2002 (Brunotte et al., 2005a)
- Abb. 6:** Zuckerrüben-Vorgewende mit 2,5 bar Druckbelastung und 20-facher Überrollung: 3-D-Visualisation des Makroporensystems (Rogasik & Brunotte, 2000)
- Abb. 7** Konzept "Bodenschonendes Befahren" (Sommer, 1998a, geändert)
- Abb. 8:** Bodendruckmessung unter Mähdrescher-Reifen mit unterschiedlichem Reifeninnendruck und unter einem Bandlaufwerk (Brunotte et al., 2004)
- Abb. 9:** Population von Regenwürmern nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung und vor/nach Befahren mit Zuckerrüben-Vollernter (nach Epperlein & Joschko, 2002)
- Abb. 10:** Bodendruck und Setzung mit 2,1 bar Reifeninnendruck (Nolting et al., 2005)
- Abb. 11:** Bodendruck und Setzung mit 0,8 bar Reifeninnendruck (Nolting et al., 2005)
- Abb. 12:** Spurtiefenverteilung beim Rübenroden (Nolting et al., 2005)
- Abb. 13:** Schema für die Abhängigkeit des Reifeninnendrucks von der Bodentragfähigkeit (VDI-Richtlinie 6101, 2005)
- Abb. 14:** Auf den Reifeninnendruck bezogener Spurflächenanteil eines 100-ha-Marktfruchtbetriebs am Beispiel Zuckerrübenanbau (KBTL, 2006)
- Abb. 15:** Problembereich Oberflächenabfluss und Bodenerosion (Brunotte, 2003)

- Abb. 16:** Gefährdungsstufen der Bodenfruchtbarkeit (Mosimann et al., 2004; Schäfer, 2005)
- Abb. 17:** Geräteinsatz bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Brunotte & Sommer, 1996)
- Abb. 18:** Bodenbedeckungsgrade in % (Brunotte et al., 1998)
- Abb. 19:** Bodenbearbeitungsverfahren in Abhängigkeit von Klima, Strohverteilung und Saatguteinbettung (Brunotte et al., 2003)
- Abb. 20:** Regenwurmaktivität (Strohhaufen/m²) in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad (%) 2002 (Brunotte et al., 2002a)
- Abb. 21:** Abflussminderung in Abhängigkeit von biogenen Vertikalporen (Roth & Joschko, 1991)
- Abb. 22:** Dreidimensionale Visualisierung des Makroporenraumes (Makroporen >1 mm) nach Röntgen-Computertomografie von ungestörter Bodensäule ($d = 10$ cm) bei konventioneller Bodenbearbeitung am Standort Adenstedt (Rogasik et al., 1994)
- Abb. 23:** Dreidimensionale Visualisierung des Makroporenraums (Makroporen >1 mm) nach Röntgen-Computertomografie von ungestörter Bodensäule ($d = 10$ cm) bei konservierender Bodenbearbeitung am Standort Adenstedt (Rogasik et al., 1994)
- Abb. 24:** Ertragsniveau von Zuckerrüben nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung über einen Zeitraum von 15 Jahren am Standort Adenstedt (Brunotte & Sommer, 2001)
- Abb. 25:** Akzeptanz für Mulchsaatverfahren im Zuckerrübenanbau – Region südliches Niedersachsen (Schulze & Brunotte, 2004)
- Abb. 26:** Einflussfaktoren auf Run off durch Oberflächenabfluss und Makroporenfluss
- Abb. 27:** Anlage eines Feldversuchs zum Nachzulassungs-Monitoring (Pestemer et al., 2005)
- Abb. 28:** Einflussfaktoren auf den Mykotoxingehalt im Getreide
- Abb. 29:** Einfluss von Vorfrucht, Bodenbearbeitung, Sorte und Pflanzenschutz auf den DON-Gehalt von Winterweizen auf dem Standort Adenstedt, 1999-2003 (Brunotte & Oldenburg, 2004a)

- Abb. 30:** Einfluss von Vorfrucht, Bodenbearbeitung, Sorte und Pflanzenschutz auf den Ertrag von Winterweizen auf dem Standort Adenstedt, 1999-2003 (Brunotte & Oldenburg, 2004a)
- Abb. 31:** Auswirkungen gezielter Blütenspritzung bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Ertrag und DON-Gehalte von Winterweizen (Brunotte & Oldenburg, 2003)
- Abb. 32:** DON-Gehalte von Silomais-Rückständen unterschiedlich anfälliger Maissorten für Stängelfäule (Brunotte et al., 2005b)
- Abb. 33:** Silomais-Rückstände an der Bodenoberfläche nach unterschiedlicher Zerkleinerung und Bodenbearbeitung (Brunotte et al., 2005c)
- Abb. 34:** Mykotoxingehalte im Winterweizen in Abhängigkeit von Sorte und Bodenbearbeitung (Brunotte & Oldenburg, 2004b)
- Abb. 35:** Einfluss 'Konservierender Bodenbearbeitung' auf Bodenschadverdichtung, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide
- Abb. 36:** Wechselwirkungen zwischen **Bodenschadverdichtung**, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung (**grün** = positive, **rot** = negative Abhängigkeit)
- Abb. 37:** Wechselwirkungen zwischen **Bodenerosion**, Run off, Bodenschadverdichtung und Mykotoxinbildung (**grün** = positive, **rot** = negative Abhängigkeit)
- Abb. 38:** Wechselwirkungen zwischen **Run off**, Bodenerosion, Bodenschadverdichtung und Mykotoxinbildung (**grün** = positive, **rot** = negative Abhängigkeit)
- Abb. 39:** Wechselwirkungen zwischen **Mykotoxinbildung**, Bodenerosion, Run off und Bodenschadverdichtung (**grün** = positive, **rot** = negative Abhängigkeit)

Verzeichnis Tabellen

- Tab. 1:** Pflanzenschutzmitteleinträge in die Oberflächengewässer in Deutschland aus diffusen Quellen; Mittelwerte und Spannbreiten der Modellschätzung, summiert über 42 Wirkstoffe (Bezugsjahr 1993/94) (Bach et al., 2000)
- Tab. 2:** Höchstgehalte für Fusarientoxine in Lebensmitteln (EG, 2005)
- Tab. 3:** Auswirkungen von 2- und 6-reihigen Zuckerrüben-Erntesystemen auf den Ertrag der Folgefrucht 'Weizen' (Brunotte et al., 2002a, erweitert)
- Tab. 4:** Vollzugstaugliche Parameter zur Erkennung eines Bodengefügeschadens bindiger Böden und deren Schadensschwelle (Lebert et al., 2004)
- Tab. 5:** Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren und Vorfrucht Weizen auf den DON-Gehalt von Weizen auf vier Standorten in Südniedersachsen, 1999-2005 (nach Brunotte & Oldenburg, 2005)

Dank

Die vorliegende Schrift ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betriebstechnik und Bauforschung unter der Leitung von Herrn Professor Dr. agr. habil. Franz-Josef Bockisch an der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. habil. Wilfried Pestemer, Frau Professor Dr. agr. habil. Carmen Büttner und Herrn Professor Dr. agr. habil. Jürgen Hahn, die mich ermutigt haben, diese Arbeit an der Humboldt-Universität zu Berlin im Fachgebiet Agrartechnik anzufertigen und mir bei der fachlichen Auseinandersetzung eine große Hilfe waren.

Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Claus Sommer, Herrn PD Dr. agr. Hans-Heinrich Voßhenrich und Herrn Professor Dr. habil. Edmund Isensee möchte ich für die sehr gute fachliche und persönliche Unterstützung, die anregenden Diskussionen und die stete Hilfsbereitschaft ganz herzlich danken.

Herrn Ing. grad. Berthold Ortmeier, Herrn Dipl.-Ing. Klaus Nolting, Herrn Dipl.-Ing. Marco Lorenz und Frau Dr. Elisabeth Oldenburg danke ich sehr für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Feldversuche und für die fachliche Diskussion der Themen.

Mein großer Dank gilt Frau Dorothea Mika für die äußerst sorgfältige Unterstützung bei der Fertigstellung des Manuskriptes und Herrn Ralph Kröckel für die Anfertigung der Zeichnungen.

Abschließend möchte ich meiner Frau Anne und meinen Kindern Philip, Kathleen und Lukas meinen ganz besonderen Dank aussprechen für die Inspiration, ihr Verständnis und die große Unterstützung, die sie mir während dieser Zeit entgegengebracht haben.

PD Dr. sc. agr. Joachim Brunotte

274	Folkhard Isermeyer (Hrsg.) (2004) Ackerbau 2025	9,00€
275	Abdelaziz Ibrahim Abdelaziz Aly Omara (2004) Further development of a mobile wind energy plant for a low-pressure irrigation system	9,00€
276	Gerold Rahmann . Hiltrud Nieberg . Susanne Drengemann . Alois Fenneker . Solveig March . Christina Zurek Bundesweite Erhebung und Analyse der verbreiteten Produktionsverfahren, der realisierten Vermarktungswege und der wirtschaftlichen sowie sozialen Lage ökologisch wirtschaftender Betriebe und Aufbau eines bundesweiten Praxis-Forschungs-Netzes (2004)	13,00€
278	Maria del Carmen Lamas (2005) Factors affecting the availability of uranium in soils	8,00€
279	Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2005) Bestimmung von Ammoniak-Einträgen aus der Luft und deren Wirkung auf Waldökosysteme (ANSWER-Projekt)	7,00€
280	Hans-Joachim Weigel und Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2005) Biologische Senken für atmosphärischen Kohlenstoff in Deutschland — Tagungsband	9,00€
281	Albert Sundrum and Friedrich Weißmann (eds.) (2005) Organic pig production in free range systems	7,00€
282	Folkhard Isermeyer . Alexander Gocht . Werner Kleinhanß . Bernd Küpker . Frank Offermann . Bernhard Osterburg . Joachim Riedel und Ulrich Sommer (2005) Vergleichende Analyse verschiedener Vorschläge zur Reform der Zuckermarktordnung	7,00€
283	Luit J. De Kok and Ewald Schnug (eds.) (2005) Proceedings of the 1st Sino-German Workshop on Aspects of Sulfur Nutrition of Plants	11,00€
284	Rainer Oppermann and Gerold Rahmann (2005) Transforming Rural Communication Three sociological case studies in a developed an urbanized rural area of northern Germany: regional partnership Lübeck bay, organic farming and nature protection	7,00€
285	Jyldyz Uzakbaeva (2005) Effect of different tree species on soil quality parameters in forest plantations of Kyrgyzstan	8,00€
286	Silvia Haneklaus, Rose-Marie Rietz, Jutta Rogasik and Susanne Schroetter (eds.) (2005) Recent advances in in agricultural chemistry	11,00€
287	Maria del Carmen Rivas (2005) Interactions between soil uranium contamination and fertilization with N, P and S on the uranium content and uptake of corn, sunflower and beans, and soil microbiological parameters	8,00€
288	Alexandra Izosimova (2005) Modelling the interaction between Calcium and Nickel in the soil-plant system	8,00€
290	Gerold Rahmann (Hrsg.) (2005) Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2005	9,00€
292	Franz-Josef Bockisch und Elisabeth Leicht-Eckardt (Hrsg.) (2006) Nachhaltige Herstellung und Vermarktung landwirtschaftlicher Erzeugnisse	15,00€
293	Judith Zucker (2006) Analyse der Leistungsfähigkeit und des Nutzens von Evaluationen der Politik zur Entwicklung ländlicher Räume in Deutschland und Großbritannien am Beispiel der einzelbetrieblichen Investitionsförderung	12,00€
294	Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2006) Möglichkeiten der Dekontamination von "Unerwünschten Stoffen nach Anlage 5 der Futtermittelverordnung (2006)"	15,00€

295	Hiltrud Nieberg und Heike Kuhnert (2006) Förderung des ökologischen Landbaus in Deutschland — Stand, Entwicklung und internationale Perspektive	14,00€
296	Wilfried Brade und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2006) Schweinezucht und Schweinefleischerzeugung - Empfehlungen für die Praxis	12,00€
297	Hazem Abdelnabby (2006) Investigations on possibilities to improve the antiphytopathogenic potential of soils against the cyst nematode <i>Heterodera schachtii</i> and the citrus nematode <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	8,00€
298	Gerold Rahmann (Hrsg.) (2006) Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2006	9,00€
299	Franz-Josef Bockisch und Klaus-Dieter Vorlop (Hrsg.) (2006) Aktuelles zur Milcherzeugung	8,00€
300	Analyse politischer Handlungsoptionen für den Milchmarkt (2006)	12,00€
301	Hartmut Ramm (2006) Einfluß bodenchemischer Standortfaktoren auf Wachstum und pharmazeutische Qualität von Eichenmisteln (<i>Viscum album</i> auf <i>Quercus robur</i> und <i>petraea</i>)	11,00€
302	Ute Knierim, Lars Schrader und Andreas Steiger (Hrsg.) (2006) Alternative Legehennenhaltung in der Praxis: Erfahrungen, Probleme, Lösungsansätze	12,00€
303	Claus Mayer . Tanja Thio . Heike Schulze Westerath . Pete Ossent . Lorenz Gyga . Beat Wechsler und Katharina Friedli (2007) Vergleich von Betonspaltenböden, gummimodifizierten Spaltenböden und Buchten mit Einstreu in der Bullenmast unter dem Gesichtspunkt der Tiergerechtigkeit	8,00€
304	Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2007) Calculations of Emissions from German Agriculture — National Emission Inventory Report (NIR) 2007 for 2005	16,00€
[304]	Introduction, Methods and Data (GAS-EM)	
[304A]	Tables	
	Berechnungen der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft — Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2007 für 2005	
[304]	Einführung, Methoden und Daten (GAS-EM)	
[304 A]	Tabellen	
305	Joachim Brunotte (2007) Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide	14,00€
306	Uwe Petersen . Sabine Kruse . Sven Dänicke und Gerhrad Flachowsky (Hrsg.) (2007) Meilensteine für die Futtermittelsicherheit	10,00€