

Hochschule Osnabrück
University of Applied Sciences

**Bodenschadverdichtung-
Vermeidung Regeneration Überwachung**

Beiträge zum Diskussionsforum Bodenwissenschaften
am 26.Oktober 2012

Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur

Heft 12

Impressum

Diskussionsforum Bodenwissenschaften, Heft 12 (2012):
Bodenschadverdichtung- Vermeidung, Regeneration, Überwachung

Herausgeber:

Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur

Hochschule Osnabrück

Am Krümpel 31

49090 Osnabrück

Telefon: 0541-969-5110

Telefax: 0541-969-5170

E-Mail: al@hs-osnabrueck.de

Internet: <http://www.al.hs-osnabrueck.de>

Redaktion und Layout:

Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ (H-C.Fruend@hs-osnabrueck.de)

Prof. Dr.-Ing. Olaf Hemker (O.Hemker@hs-osnabrueck.de)

Dipl.-Ing. (FH) Petra Große Erdmann

Corinna Nieland

Für den Inhalt der Einzelbeiträge sind die Autoren verantwortlich.

Vorwort

Knapp die Hälfte eines guten Bodens besteht aus Poren, also Hohlräumen. Mit der steigenden Mechanisierung in der Land- und Forstwirtschaft steigt die Wahrscheinlichkeit von Bodenverdichtungen. Diese nehmen das Ausmaß von Schadverdichtungen an, wenn die Störung des Porensystems zu einer Beeinträchtigung der ökologischen Bodenfunktionen führt.

In der Tagung soll nach einer Bestandsaufnahme des Ausmaßes problematischer Bodenverdichtungen in landwirtschaftlichen Böden und im Wald der Frage nachgegangen werden, ob und wie Bodenverdichtungen wieder rückgängig gemacht werden können. Schließlich sollen Wege zur Vermeidung von Bodenschadverdichtungen aufgezeigt werden. Dabei werden landwirtschaftliche Böden und Waldböden gleichermaßen betrachtet.

Osnabrück, Oktober 2012

Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ

Prof. Dr.-Ing. Olaf Hemker

Anschriften der Referenten

- Stephan Marahrens** Umweltbundesamt Dessau-Roßlau
Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: 0340-2103 2396
e-mail: Stephan.Marahrens@uba.de
www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/index.htm
- PD Dr. Klaus v.Wilpert** Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg
Abt. Boden und Umwelt
79100 Freiburg, Wonnhaldestr. 4
Tel.: 0761-4018-173
e-mail: klaus.wilpert@forst.bwl.de
www.fva-bw.de
- Christine Meyer** Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research
WSL
Soil Sciences
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
Switzerland
Phone +41-44-739 28 27
e-mail: christine.meyer@wsl.ch
- Dr. Gerhard Dumbeck** RWE POWER AG
Abteilung Rekultivierung Land- und Forstwirtschaft
Friedrich-Ebert-Str. 104
50374 Erftstadt
Tel.: 02235/9830021021
e-mail: gerhard.dumbeck@rwe.com
- PD Dr. habil. Joachim Brunotte** Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Bundesforschungsanstalt für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
Inst. für Agrartechnologie und Biosystemtechnik (AB)
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
e-mail: joachim.brunotte@vti.bund.de
- Dr. Herbert Borchert** Abteilungsleiter Forsttechnik, Betriebswirtschaft und Holz
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, D-85354 Freising
Tel.: 08161-71-4640
e-mail: Herbert.Borchert@lwf.bayern.de

Inhalt

Bewertung und Ausmaß von Bodenverdichtungen für die landwirtschaftliche Produktionsfläche in Deutschland	1
<i>Stephan Marahrens</i>	
Bodenverdichtung in der Forstwirtschaft	16
<i>PD Dr. Klaus v. Wilpert</i>	
Einsatz von Schwarzerlen zur Regeneration von mechanisch verdichteten Waldböden	27
<i>Christine Meyer</i>	
Umgang mit Bodenverdichtungen bei der Wiederherstellung von Lössböden im rheinischen Braunkohlenrevier	39
<i>Dr. Gerhard Dumbeck</i>	
Bodenverdichtung in der Landwirtschaft	51
<i>PD Dr. habil. Joachim Brunotte</i>	
Bewertung und Vermeidung von Bodenschadverdichtungen im Wald	62
<i>Dr. Herbert Borchert</i>	

Bewertung und Ausmaß von Bodenverdichtungen für die landwirtschaftliche Produktionsfläche in Deutschland

Stephan Marahrens

1. Einführung

In Deutschland werden 50 % der Landesfläche acker- und pflanzenbaulich genutzt. Hinzu kommen 30 % Wald- und Forstflächen. Dabei werden Maschinen eingesetzt, die je nach Gewicht einen hohen Druck auf den Boden ausüben können. Die ökonomischen Vorgaben haben zum Einsatz immer leistungsfähigerer Maschinen geführt und damit zu einer Steigerung des Bodendrucks. Vom Standpunkt der Vorsorge nach §7 bzw. §17 des Gesetzes zum Schutz unserer Böden (BBodSchG) sind Verdichtungen bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung soweit wie möglich zu vermeiden um die Funktionsfähigkeit unserer Böden langfristig zu garantieren (vgl. Abb.1). Auch wenn wir bisher nicht von einer flächenhaften Verbreitung von Bodenschäden ausgehen, müssen wir „soweit wie möglich“ geeignete Maßnahmen ergreifen, um zusätzliche Bodenverdichtungen zu vermeiden. Damit kommt dem fachlichen Diskurs des „soweit wie möglich vermeiden“ eine zentrale Bedeutung zu.

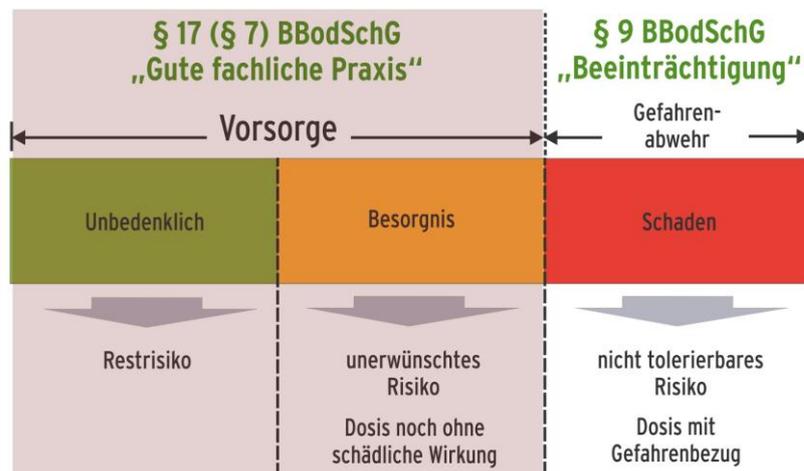


Abbildung 1
Vorsorgekonzeption und Risikobereiche nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung.

2. Was ist Bodenverdichtung?

Böden enthalten Hohlräume in Form von Poren, die mit Luft und Wasser gefüllt sind. Die Hohlräume verlieren an Volumen und Kontinuität, wenn ein Bodendruck ausgeübt wird, der die Stabilität des Bodens überschreitet. Die Folge wird als Bodenverdichtung bezeichnet.

Bodenverdichtung: Prozess bei dem es zu einer Verringerung des Porenraumes und einer Veränderung der Porenstruktur kommt, wenn der Bodendruck die Stabilität des Bodens überschreitet. Ob eine Bodenverdichtung zu einer Beeinträchtigung der Bodenfunktionen nach § 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes führt, hängt von ihrem Ausmaß und ihrer Dauerhaftigkeit ab.

Die natürliche Tragfähigkeit des Bodens ist je nach Zusammensetzung der Bodenteilchen und der Variation der Bodenart unterschiedlich. Die einzelnen Bodenteilchen bilden zusammen eine Struktur, die als Bodengefüge bezeichnet wird. Das Bodengefüge hat einen

zentralen Einfluss auf den Wasser- und Luftaustausch, und bestimmt damit auch den Ernteertrag. Darüber hinaus ist die natürliche Tragfähigkeit von der Bodenfeuchte abhängig, die starken Schwankungen unterworfen sein kann.

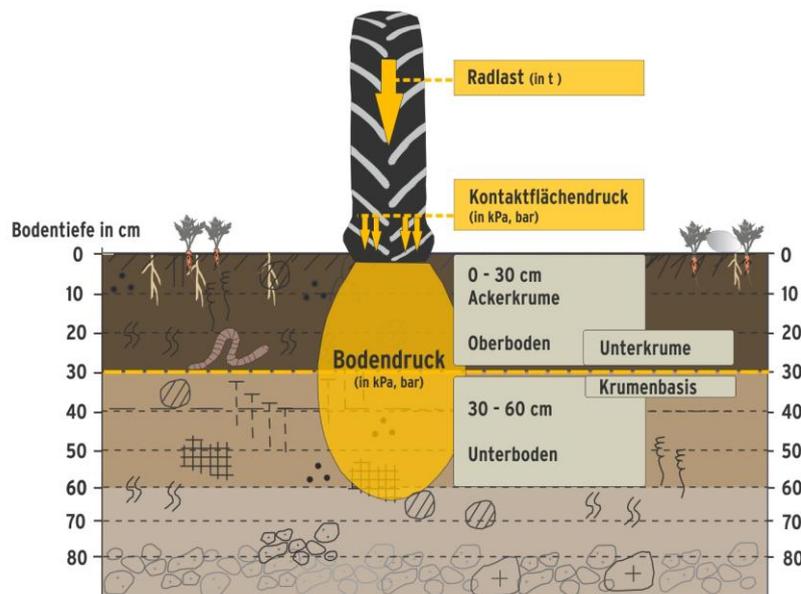
Die variablen, natürlichen Einflussfaktoren machen es schwierig, eine generelle Tragfähigkeit des Bodens gegenüber Druck durch Befahrung zu beschreiben. Neben der Bewertung des „soweit wie möglich vermeiden“ ist die Charakterisierung der Tragfähigkeit des Bodens eine weitere Voraussetzung für eine standortangepasste Bodenbearbeitung nach § 17 BBodSchG.

3. Ursachen bewirtschaftungsbedingter Bodenverdichtung

Neben den natürlichen Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit des Bodens liegt die Ursache von zusätzlichen Verdichtungen unter landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Nutzung in deren maschineller Bearbeitung mit schweren Fahrzeugen. Übersteigt der verfahrensspezifische Bodendruck die momentane Tragfähigkeit des jeweiligen Bodens, kommt es zu einer zusätzlichen Verdichtung.

Die wesentlichen bewirtschaftungsbedingten Einflussfaktoren sind (vgl. Abb. 2):

- die Radlast (Fahrzeuggewicht und Anzahl der Räder),
- der Kontaktflächendruck (Radlast, Reifen- Bandlaufwerks-Aufstandsfläche, Reifeninnendruck) und
- die Anzahl der Überrollungen einer Fahrspur.



Quelle: verändert nach Sommer (1985).

Abbildung 2 Einflussfaktoren und Begriffsbestimmung bei der Verdichtung von Böden.

Die **Radlast** ist das Gewicht, das über einen Reifen abgestützt werden muss. Diese Größe bestimmt vor allem die Tiefenwirkung des Bodendruckes. Dagegen wirkt sich der mittlere **Kontaktflächendruck** besonders auf den Oberboden, die Ackerkrume aus. Der mittlere Kontaktflächendruck ist allerdings eine Durchschnittsgröße, welche die Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche nicht beschreiben kann.

Der mittlere Kontaktflächendruck kann bei einer bestimmten Radlast dadurch reduziert werden, indem dasselbe Gewicht auf einer größeren Reifenfläche abgestützt wird. Dieses Ziel erreicht man durch:

- a) eine Verringerung des Reifeninnendruckes oder
- b) durch die Wahl von breiteren Reifen.

Zur Verminderung des Drucks im Unterboden ist bei gleicher Radlast eine überproportionale Erhöhung der Reifen-Aufstandsfläche erforderlich. Aus Materialgründen kann der Reifeninnendruck jedoch nicht unendlich gesenkt werden. Somit ist für den wirksamen Schutz des Unterbodens eine überproportional breite Bereifung oder die grundsätzliche Verringerung der Radlast sinnvoll. Die **Anzahl der Überrollungen** ist ein weiterer wesentlicher Faktor. Wird eine Fahrspur mit derselben Radlast und demselben Kontaktflächendruck mehrfach befahren, entsteht in der Wirkung eine stufenweise Erhöhung des Bodendruckes.

Eine Verringerung der Anzahl an Überrollungen ist durch die Zusammenlegung von Arbeitsgängen oder die Vergrößerung von Arbeitsbreiten zu erreichen.

In der Praxis sind bestimmte Ursachenfaktoren maßgeblich an der Entstehung von zusätzlichen Verdichtungen beteiligt:

- Befahrung und Bearbeitung bei feuchtem Boden mit geringer Tragfähigkeit,
- Befahrung des frisch gepflügten Ackers,
- Einsatz von Transportfahrzeugen mit Straßenluftdruck auf dem Acker,
- Fahren in der Pflugfurche,
- Staunässe und freies Wasser auf Grund fehlender Kulturtechnik.

Grundsätzlich gilt: je feuchter und feinkörniger ein Boden ist, desto geringer ist seine Tragfähigkeit.

4. Folgen

Ein funktionsfähiger Oberboden besteht aus einer Krümelstruktur mit einer gleichmäßigen Porenverteilung zum Wasser- und Luftaustausch vergesellschaftet mit einer aktiven Bodenfauna und genügend humoser Bodensubstanz.

Eine Verdichtung reduziert das Volumen der Hohlräume. Die unmittelbaren Folgen sind ein behinderter Transport des Wassers, verringerter Luftaustausch und schlechte Wuchsbedingungen für die Pflanzenwurzeln (vgl. Abb. 3 u. 4).

Da Regenwasser in verdichteten Böden wenig bis gar nicht versickert, kommt es zu sogenannten Binnenhochwässern. Fließt das Regenwasser überwiegend an der Oberfläche ab, kann es bei starken Regenfällen zu Bodenerosion kommen. Die Folge können Hochwasserereignisse und Gewässerbelastungen sein. Eine zunehmende Bodenverdichtung bis hin zu einer dauerhaften Schädigung hat auch Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion. Zur Erzielung eines gleichbleibenden Ertragsniveaus steigen die Aufwände für das Bodenmanagement.

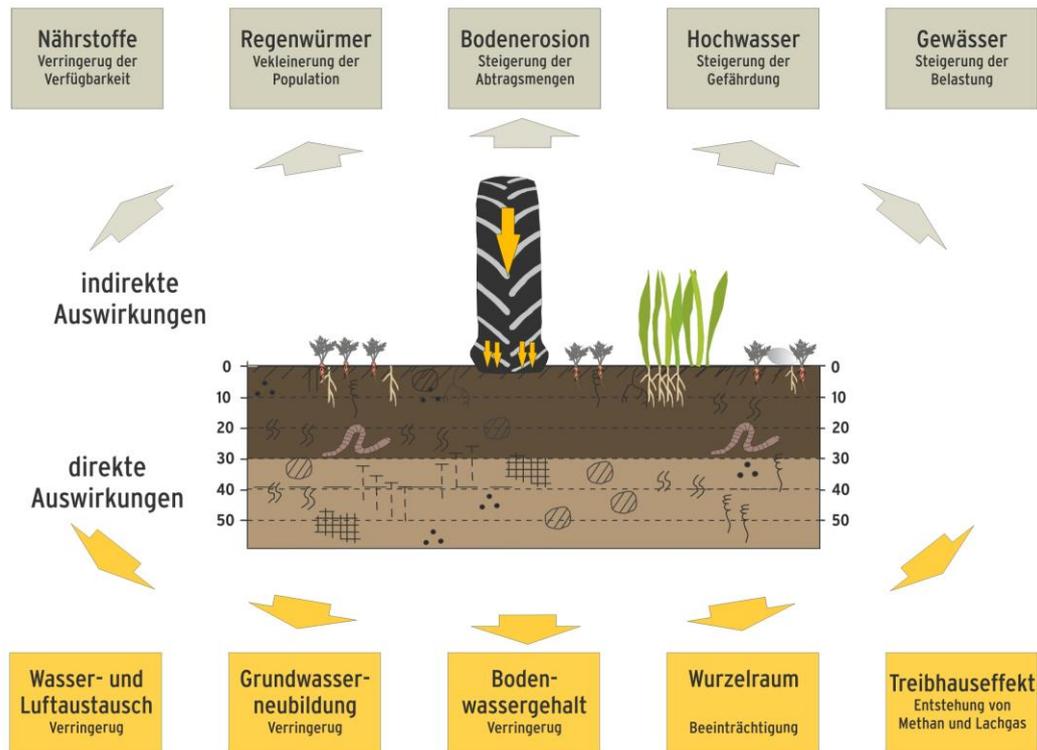


Abbildung 3
Direkte und Indirekte Auswirkungen von Bodenverdichtungen.

5. Kriterien einer Bodenverdichtung

Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) nennt im § 17 allgemeine Anforderungen an die Vorsorge zur Vermeidung von Bodenverdichtungen in Form der Grundsätze zur „Guten fachlichen Praxis“ der landwirtschaftlichen Bodennutzung (GfP). Verbindliche Prüf- und Maßnahmenwerte, wie sie zur Beurteilung der Belastung durch Schadstoffe bestehen, existieren für die Beeinträchtigung des Bodens durch Verdichtung nicht (vgl. Abb. 1).

Sowohl die Beeinträchtigung der Bodenfunktionen als auch der Zusammenhang zwischen einer Bodenverdichtung und der Betroffenheit von Schutzgütern sind von zahlreichen, auch zeitlich variablen Voraussetzungen abhängig. Es ist somit sehr schwierig, allgemein rechtsverbindliche Vollzugswerte für das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung durch Verdichtung festzuschreiben.

Zunächst einmal ist es wichtig, eine Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch messbare und repräsentative Kriterien feststellen zu können. Anhaltspunkte für eine Beeinträchtigung liegen dann vor, wenn alle in Tabelle 1 aufgeführten Kriterien zeitgleich erfüllt sind. Ob nach Überschreitung der Schwellenwerte bereits eine Bedrohung für die Schutzgüter Wasser, Bodenleben und Mensch vorliegt, kann nur im Einzelfall entschieden werden. Im Rahmen der Gefahrenabwehr nach § 9 BBodSchG können notwendige Untersuchungen durchgeführt werden. Neben den vorstehenden Kriterien existieren noch weitere Ansätze zur Ausweisung von Schwellenwerten für den Vollzug (vgl. Vorderbrügge, 2004; Horn u.a., 2009).

Tab. 1: Kriterien zur Ermittlung einer Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch Verdichtung (Lebert u.a., 2004)

Kriterien	Schwellenwerte
Luftkapazität (LK)	< 5 Vol.-%
gesättigte Leitfähigkeit (kf)	< 10 cm/Tag
Feldgefügeansprache: effektiven Lagerungsdichte alternativ: Packungsdichte Spatendiagnose	Klassen 4 oder 5 (Bodenkundliche Kartieranleitung, KA5) (DIN 19682-10, 1998) (Diez u. Weigelt, 1997)

Im Bundes-Bodenschutzgesetz ist in § 17 die Vermeidung von Bodenverdichtungen über die Vorsorge geregelt. Ziel ist es schleichende Verdichtungen zu vermeiden. Vorsorgemaßnahmen sind im Rahmen der landwirtschaftlichen Beratung zu vermitteln. Solche Maßnahmen der „Guten fachlichen Praxis“ unterliegen der ständigen Weiterentwicklung und der Anpassung an den Stand der Technik.

6. Verbreitung und Ausmaß auf landwirtschaftlichen Produktionsflächen

Eine bundesweite Darstellung über das Ausmaß und die Entwicklung tatsächlicher Beeinträchtigungen des Bodengefüges durch Verdichtung ist nicht möglich, da auf dieser Betrachtungsebene keine systematischen und wiederholten Freilandbeobachtungen zur Verfügung stehen. Regionale oder auf Bundesländer beschränkte Untersuchungen aus dem Freiland oder Versuchswesen existieren und sind ebenfalls bundesweit nur eingeschränkt vergleichbar (vgl. Cramer u.a., 2006; Paul u. Fettisov; 2007; ilu, 2008; Brunotte u.a., 2008). Expertenschätzungen besagen, dass auf etwa 10 % bis 20 % der Ackerfläche Beeinträchtigungen vorliegen. Betroffen ist jedoch zumeist nicht die eigentliche Produktionsfläche, sondern schwerpunkthaft der Bereich von Vorgewende und Fahrspuren sowie kleinerer Areale mit ungünstigen Feuchteverhältnissen (vgl. Abb. 4).



Vorgewende nach der Ernte



kleinräumig in Fahrspuren

Abbildung 4
Beispiele für Bereiche mit verdichteter Bodenstruktur.

Für die Betrachtung ist eine Differenzierung der Tiefenlage innerhalb der Bodensäule von Bedeutung (vgl. Abb. 2). Da die Ackerkrume, je nach Bearbeitungsweise mehr oder weniger Tief gelockert werden kann, kommt zwar die Vorsorge zur Anwendung, jedoch besteht die Möglichkeit zusätzliche Verdichtungen und Schäden mit maschinellem Einsatz zu beseitigen. Wohingegen den tieferen Schichten zwischen 30 und 60 cm sowie dem Bereich der Unterkrume ein besonderes Augenmerk gilt, da diese Bereiche nie oder nicht mehr maschinell gelockert werden. Verdichtungen können sich in diesen Tiefen akkumulieren und langfristig erhalten. Eine Besonderheit stellt die Krumbasis dar. Die regionalen Statusbefunde zeigen, dass die Krumbasis besonders häufig durch die Ausbildung von Pflug- oder Schlepperradsohlen verdichtet ist. Diese Sohlen können aber reliktsch sein, wenn inzwischen die Pflugtiefe verringert, das Pflugverfahren verändert oder ganz auf den Pflug verzichtet wurde.

6.1 Bundesweite Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Unterböden

Für die Planung von Vorsorgemaßnahmen und zu Vergleichszwecken bei zukünftigen Beobachtungen ist es notwendig die Gefügeeigenschaften der Ackerböden zu kennen und bundesweit zu beschreiben.

Lebert (2010) hat eine solche Bewertung im Auftrag des Umweltbundesamtes vorgenommen (vgl. auch Lebert u. Schäfer, 2005). Auf Basis von Messwerten von 1300 über das Bundesgebiet verteilten Ackerböden, wurde unter Nutzung der Kriterien aus Tabelle 1 eine Einordnung der Gefügeeigenschaften für den Tiefenbereich von 30 bis 60 cm vorgenommen. Die Einstufung erfolgte durch Zuweisung der Messgrößen nach Tabelle 2 und unter dem Aspekt der Gefügeentwicklung bei zusätzlicher Verdichtung.

Tab. 2: Klassifizierung der Gefügeeigenschaften im Hinblick auf die Beeinträchtigung von Bodenfunktionen (Klasseneinteilung modifiziert nach KA 5).

effektive Lagerungsdichte	Luftkapazität (Vol.%)	gesättigte Leitfähigkeit (cm/Tag)	Gefügeeigenschaften	Klasse
$\geq 1,8$	< 5	< 10	sehr ungünstig	5
$1,7 - < 1,8$	$5 - < 7$	$10 - < 40$	ungünstig	4
$1,6 - < 1,7$	$7 - < 13$	$40 - < 100$	mittel	3
$1,4 - < 1,6$	$13 - < 26$	$100 - < 300$	günstig	2
$< 1,4$	≥ 26	≥ 300	sehr günstig	1

Ungünstige Gefügeeigenschaften bezeichnen nicht einen schlechten, bewirtschaftungsbedingten Gefügezustand, sondern eine Gefahr für die Funktionalität des Bodens bei weiter fortschreitender Verdichtung.

Nach dieser Methodik weisen ca. 10 % der bundesweiten Ackerfläche sehr ungünstige Gefügeeigenschaften auf (vgl. Abb. 5). Dieses Ergebnis resultiert aus einer Übertragung der Klassifizierung anhand der Bodenartengruppen und des Bodenausgangsgesteins auf die Leitbodeneinheiten und Eigenschaften der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte von Deutschland (BGR, 2007). Obwohl auf Grund der starken Generalisierung Grenzen der Interpretation bestehen, zeichnen sich bestimmte Böden als problematisch ab. Betroffen sind besonders in Norddeutschland Böden aus Geschiebelehmen und lehmigen Geschiebemergeln sowie in Süddeutschland Böden mit hohem Tongehalt. Auf weiteren 40 % der Ackerfläche liegen die Bewertungen in einem ungünstigen Bereich unter dem Aspekt einer zusätzlichen Verdichtung. Besonders betroffen sind die Sandlehme der Jungmoränenlandschaften, die Lössböden ohne stabilisierende Bestandteile der

Schwarzerden sowie tonreiche Böden der Flusslandschaften und der Verwitterungsböden in Süddeutschland. Es ist davon auszugehen, dass auf mindestens 50 % der Ackerfläche Gefügeeigenschaften vorliegen, die bei fortschreitender, bewirtschaftungsbedingter Verdichtung zu Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen führen können. Die Methodik kann bei Vorliegen kleinräumiger Informationen auf lokale Betrachtungsräume angewendet werden.

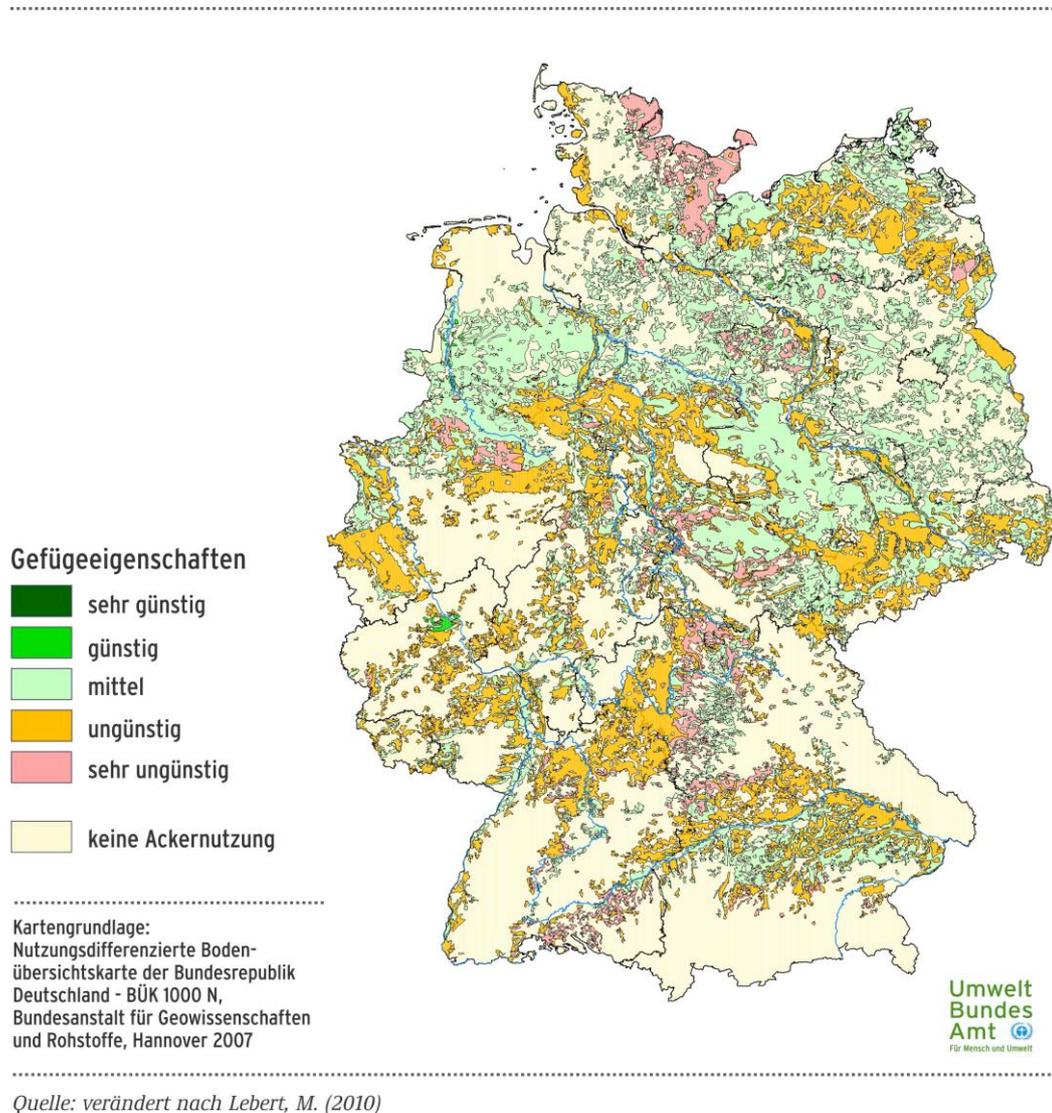


Abbildung 5
Bundesweite Gefügeeigenschaften von Unterböden der Ackerflächen (30 - 60 cm).

7. Bewertung und Planung von Maßnahmen

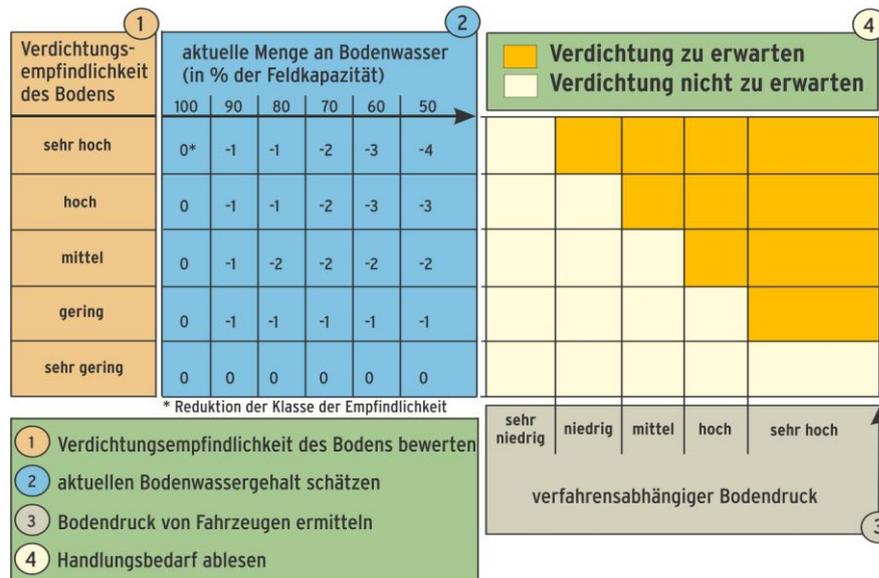
Die Grundsätze der „Guten fachlichen Praxis“ des § 17 BBodSchG beinhalten im Wortlaut, dass: „Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendruckes so weit wie möglich vermieden werden“.

Diese Definition berücksichtigt alle maßgeblichen Einflussgrößen, die es im Rahmen „Guter fachlicher Praxis“ zu beachten gilt.

Praxislösungen zur Bewertung der Bodenschonung im Rahmen der Vorsorge sollten die folgenden Einflussgrößen berücksichtigen (vgl. Abb. 6):

- die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens,
- die momentane Menge an Wasser im Boden,
- den fahrzeugabhängigen Bodendruck.

Mit diesen Größen ist bodenschonende Befahrung und „Gute fachliche Praxis“ planbar. Je nach zu betrachtendem Raumausschnitt ist ein anderer Detaillierungsgrad der benötigten Informationen erforderlich. Die Vorgehensweise hat in der landwirtschaftlichen Beratung bisher noch keine weite Verbreitung gefunden, da Teile der benötigten Informationen derzeit auf Betriebsebene noch schwer zu beschaffen sind.



Quelle: verändert nach Lebert, M. (2010).

Abbildung 6
Schema zur Bewertung bodenschonender Befahrung in der Praxis.

7.1 Bundesweite Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit

Zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. der Tragfähigkeit unserer Böden gibt es unterschiedliche Ansätze (vgl. Tab. 3).

Tab. 3: Verfahren zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden.

Verfahren	Zielsetzung	Tiefenbereich	Art der Ermittlung
Druckbelastbarkeit	Vermeidung von Durchlüftungsschäden	Unterkrume, Krumbasis	Pedotransferfunktionen
Sm nach NIBIS	Beschreibung der Verdichtungsintensität	Unterboden	Bodenart mit Zu- und Abschlügen
Schadverdichtungsfähungsklassen	Vermeidung von Ertragseinbußen	Krume	Bodenart
Vorbelastung	Vermeidung von Verdichtungen	Unterboden	Pedotransferfunktionen

Zur Erfüllung der Vorsorge gilt der Vermeidung zusätzlicher bewirtschaftungsbedingter Verdichtungen im Unterboden das Hauptaugenmerk, da eine Zunahme zu langfristigen Beeinträchtigungen führen kann. Dieser Prämisse wird nach Studien des Umweltbundesamtes (vgl. Lebert u.a., 2004, Lebert, 2010, Paul u.a., 2007; Vorderbrügge u.a., 2011) vor allem das Vorbelastungskonzept gerecht, da es a) für den Unterboden gültig

ist und b) ein Maß dafür ist, ob beim momentanen Zustand des Bodens eine zusätzliche Verdichtung durch einen bestimmten Bodendruck zu erwarten ist.

Da die Anwendung der Pedotransferfunktionen für das Konzept der Vorbelastung auf bodenphysikalische Messgrößen zurückgreift, die maßstabsübergreifend nicht routinemäßig verfügbar sind, hat Lebert (2010) im Auftrag des Umweltbundesamtes anhand der bereits in Kap. 6.1 beschriebenen bundesweiten Messwerte eine Methodik erstellt, die zum Ziel hatte die Bewertung mit allgemein verfügbaren Bodeneigenschaften zu ermöglichen. Auf diese Weise wird die Anwendung in der Praxis vereinfacht und eine Grundlage für die Bewertung und Planung von bodenschonenden Maßnahmen geschaffen.

Tab. 4: Klassifizierung der Vorbelastung und der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit (Lebert u. Schäfer, 2005)

Vorbelastung		mechanische Verdichtungsempfindlichkeit	
in kPa	Klassifizierung	Klasse	Einstufung
< 40	äußerst gering	6	äußerst hoch
40 - < 80	sehr gering	5	sehr hoch
80 - < 120	gering	4	hoch
120 - < 160	mittel	3	mittel
160 - < 200	hoch	2	gering
>= 200	sehr hoch	1	sehr gering

Das Prinzip der Vorbelastung bedeutet, dass ein Boden sehr hoch verdichtungsempfindlich ist, wenn die Vorbelastung sehr gering ist (vgl. Tab. 4). Alternativ zur Berechnung mit Pedotransferfunktionen ist es nun möglich anhand eines Schätzrahmens nach Tabelle 5 die Vorbelastung unter Rückgriff auf die Bodenart und die effektive Lagerungsdichte abzuschätzen. Da die Verdichtungsempfindlichkeit erheblich vom Wassergehalt des Bodens beeinflusst wird und dieser variabel ist, müssen noch Abschläge der Klassen erfolgen, wenn der Boden trockener als bei Feldkapazität (pF 1,8) ist (vgl. Abb. 8 und Lebert, 2010; Rücknagel, 2006). Des Weiteren können noch Abschläge mit zunehmenden Skelettgehalten erfolgen.

Tab. 5: Schätzrahmen für die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden in Deutschland bei Feldkapazität (pF 1,8), für den Tiefenbereich 30 - 60 cm. (Lebert, 2010)

Bodenarten-Gruppe	Klasse der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit				
	LD 1	LD 2	LD 3	LD 4	LD 5
Reinsande	6	3	1	1	1
Lehmsande ohne SI3	6	4	2	1	1
Schluffe	5	5	4	3	2
Sandlehme und SI3	5	5	4	3	3
Sandschluffe	5	4	4	3	2
Lehmschluffe	5	4	3	3	2
Tonschluffe, Normallehme	6	5	4	4	3
Tonlehme	5	5	5	4	4
Schlufftone, Lehmtone	5	5	4	4	4

In der Studie des Umweltbundesamtes wurde der Schätzrahmen auf die Leitbodeneinheiten und Bodeneigenschaften der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte von Deutschland (BGR, 2007) übertragen.

Tabelle 6 bilanziert die bundesweite Ausprägung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerflächen im Tiefenbereich von 30 bis 60 cm für die unterschiedlichen Feuchtezustände der Böden.

Tab. 6: Bilanzierung der bundesweiten Verdichtungsempfindlichkeit bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten. (*Feldkapazität)

Verdichtungs-empfindlichkeit	Flächenanteil in % der Ackerfläche bei Wassergehalten von			
	100 % FK*	80 % FK*	70 % FK*	60% FK*
sehr gering	0	42	42	94
gering	22	0	52	2
mittel	20	52	2	0
hoch	52	2	0	0
sehr hoch	2	0	0	0

Sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit bei hoher Bodenfeuchte weisen die Marschen der Küstenregion, tonige Böden der Flusslandschaften, Geschiebelehme der Jungmoränenlandschaften, Böden der Lössgebiete sowie aus tonig verwitternden Gesteinen auf. Die Empfindlichkeit ist weniger ausgeprägt bei den sandigeren Böden der Jungmoränenlandschaft, der Lössgebiete mit Lehmschluffen und generell den sandigen Landschaften des Altmoränengebietes und der reinen Sande.

Die Bilanzierung unterstreicht die Bedeutung des Wassergehaltes im Boden zur Berücksichtigung bei Vorsorgemaßnahmen. Bei einem Feuchtezustand von 80 % der Feldkapazität, der unter Praxisbedingungen im Jahresverlauf als realistisch einzuschätzen ist, treten „sehr hohe“ und „hohe“ Verdichtungsempfindlichkeit praktisch nicht mehr auf.

7.2 Bundesweite Bewertung der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung

Für die Identifizierung von bundesweiten Schwerpunktgebieten der Gefährdung von gesetzlichen Bodenfunktionen wird die Bewertung der Gefügeeigenschaften mit der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden nach dem Prinzip der Tabelle 7 kombiniert (vgl. Lebert, 2010; Lebert u. Schäfer, 2005).

Die Gefährdung ist besonders hoch, wenn sehr ungünstige Gefügeeigenschaften auf eine sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit treffen.

Tab. 7: Bewertung der Gefährdung von Bodenfunktionen der Ackerflächen durch Verdichtung (Lebert, 2010)

Gefügeeigenschaften (vgl. Abb. 5)	Verdichtungsempfindlichkeit (vgl. Tabelle 6)		Gefährdung von Bodenfunktionen (vgl. Abb. 7, Tab. 8)
sehr günstig	sehr gering	→	sehr gering
günstig	gering	→	gering
mittel	mittel	→	mittel
ungünstig	hoch	→	hoch
sehr ungünstig	sehr hoch	→	sehr hoch

Abbildung 7 (b) zeigt die Gefährdungssituation bei einem mäßig feuchten Zustand von 80% der Feldkapazität. Trotz der bekannten Generalisierung der Bodenkarte wird deutlich, dass gegenüber einem sehr feuchten Zustand bei Feldkapazität (vgl. Abb. 7 a) eine Reduktion der sehr hohen und hohen Gefährdung um ein Drittel erreicht wird (vgl. Tab. 8). Jedoch ist weiterhin auf einem Drittel der Ackerfläche von einer deutlichen und auf einem weiteren Drittel von einer relevanten Gefährdung auszugehen. Mit noch weiter abnehmenden Wassergehalten vermindert sich die Gefährdung, bis bei 60 % der Feldkapazität auf nahezu

der gesamten Ackerfläche Deutschlands nur noch eine mittlere und geringe Gefährdung zu verzeichnen ist.

Das Verfahren kann maßstabsunabhängig angewendet werden. Allerdings sind für die regionale Planungspraxis und auf betrieblicher Ebene kleinräumige Informationen bis hin zum Feldbefund heranzuziehen. Die bundesweite Darstellung dient der Bilanzierung und groben Einordnung von Schwerpunktgebieten und lässt keine Rückschlüsse auf die betriebliche oder lokale Situation zu.

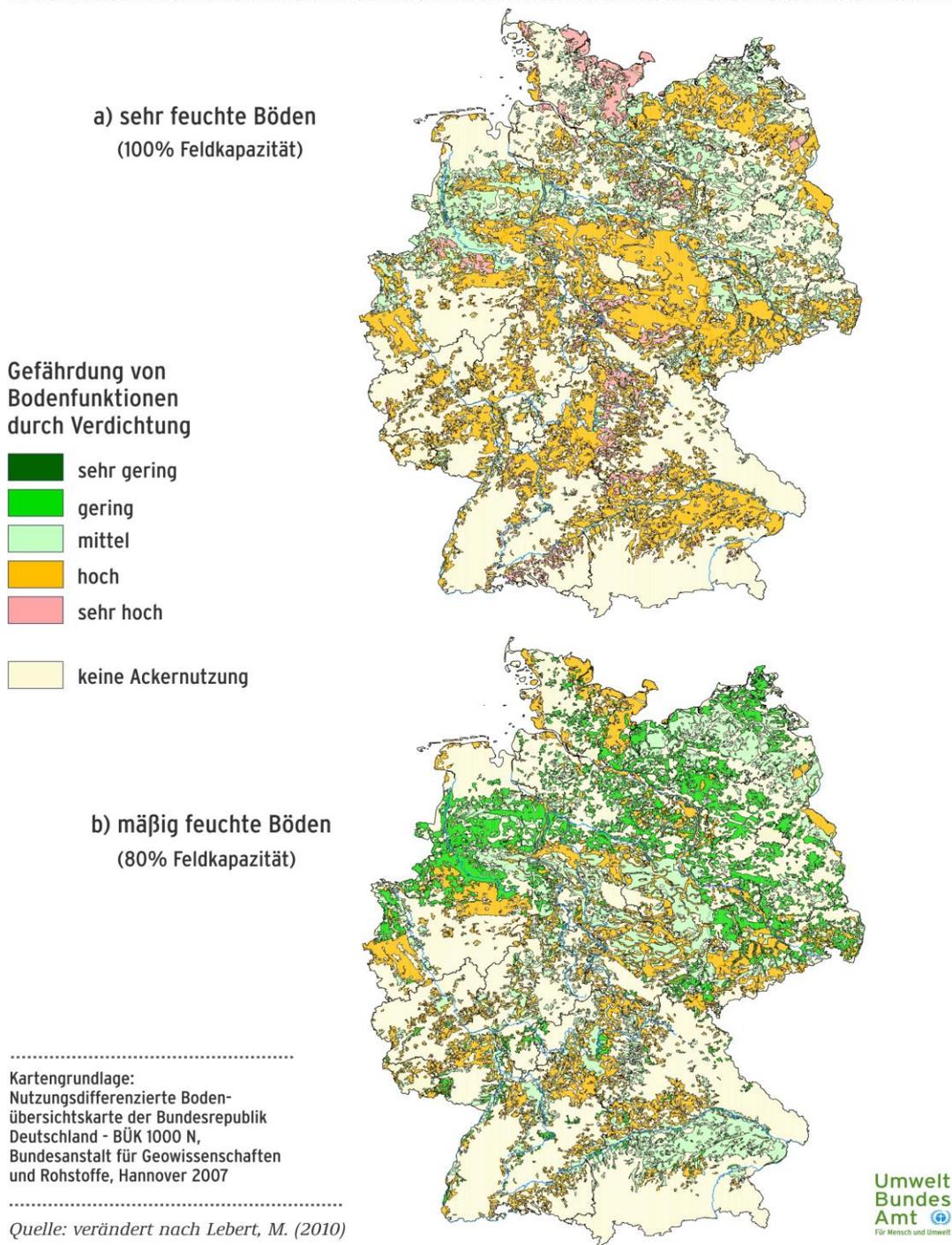


Abbildung 7
Bundesweite Gefährdung von Bdenfunktionen durch Verdichtung für den Tiefenbereich von 30 - 60 cm bei a) sehr feuchten Bodenverhältnissen (Wassermenge bei Feldkapazität) und b) mäßig feuchten Bodenverhältnissen (Wassermenge bei 80 % Feldkapazität)

Tab. 8: Bilanzierung der bundesweiten Gefährdung der Bodenfunktionen durch Verdichtung im Tiefenbereich 30 – 60 cm bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten. (*Feldkapazität)

Gefährdung von Boden- funktionen	Flächenanteil in % der Ackerfläche bei Wassergehalten von			
	100 % FK*	80 % FK*	70 % FK*	60% FK*
sehr gering	0	0	0	0
gering	0	28	28	49
mittel	28	36	60	47
hoch	60	32	8	0
sehr hoch	8	0	0	0

7.3 Bewerten und prüfen der „Befahrbarkeit“ in der Praxis

Für die Beratung und die Planung der Befahrbarkeit auf Betriebsebene sind Konzepte erforderlich, die eine integrierte Bewertung aller Einflussgrößen ermöglichen. Neben den bereits beschriebenen Einflussgrößen: Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der momentanen Menge an Wasser im Boden ist für diese Zwecke eine Beurteilung des fahrzeugabhängigen Bodendruckes als letzter Baustein notwendig.

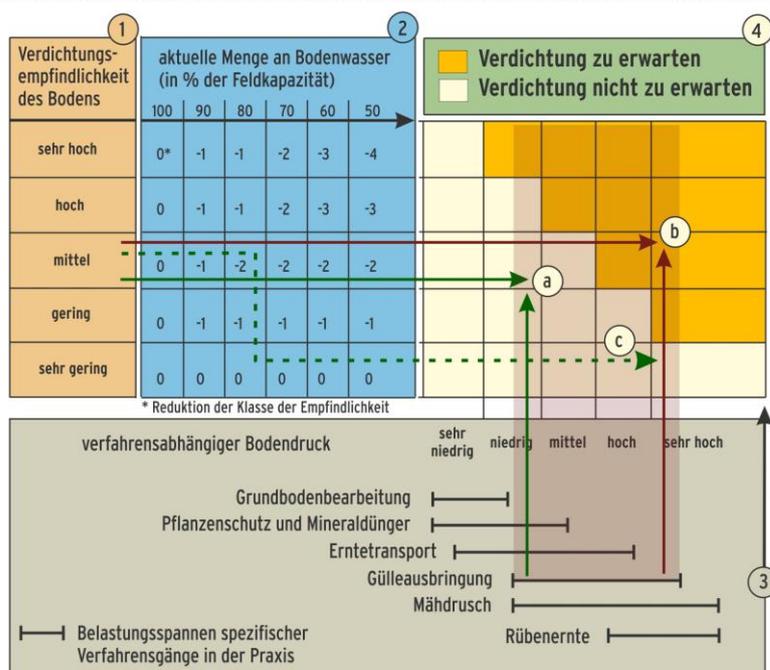
Für die Beurteilung des fahrzeugabhängigen Bodendruckes (vgl. Abb. 6 und 8) müssen die individuellen Fahrzeugeigenschaften:

- Radlast (mit Zuladung Erntegut),
- Bereifung,
- Reifeninnendruck,
- Kontaktflächendruck

bekannt sein und der Tragfähigkeit des Bodens gegenübergestellt werden.

Für den Tiefenbereich zwischen 30 - 60 cm gibt es erste Ansätze, die aber für die vielfältigen Fahrzeugeigenschaften noch weiter differenziert werden müssen. Für den Bereich der oberflächlich bearbeiteten Ackerkrume, existieren bereits Beratungskonzepte, die in der Praxis angewendet werden (vgl. TLL Alfo; Paul u.a., 2007). Derzeit sind weitere Arbeitsgruppen damit befasst Beratungskonzepte aufzustellen, deren Ansätze sich in der wissenschaftlichen Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden und des verfahrensabhängigen Bodendruckes unterscheiden.

In dem hier verfolgten Ansatz auf Basis der Vorbelastung werden bestimmten landwirtschaftlichen Verfahrensgängen in erster Näherung Bodendrucke im Unterboden zugeordnet (vgl. Abb. 8).



Quelle: verändert nach Lebert, M. (2010).

Abbildung 8
 Spannen der Bodenbelastung bei spezifischen Verfahrensgängen in der Praxis (schematisch).
 Beispiel Gülleausbringung bei mittlerer Verdichtungsempfindlichkeit eines sehr feuchten Bodens bei Feldkapazität mit a) verringerter Belastung, b) Beibehaltung der maximalen Belastung und c) Abtrocknung auf 80 % der Feldkapazität bei Ausschöpfung der maximalen Belastung.

Bei der Grundbodenbearbeitung treten relativ geringe Bodenbelastungen auf, wenn eine Bearbeitung ohne Furchenbefahrung erfolgt oder diese bestimmte Anforderungen der Vorsorge erfüllt. Gülleausbringung und Erntetransport haben je nach Fahrzeugeigenschaften in Folge der erheblichen Zuladung einen höheren Bodendruck zur Folge. Die höchsten Belastungen treten sowohl beim Mähdrusch als auch bei der Rübenernte auf. Neben Prüf- und Beratungskonzepten, die auf wissenschaftlich abgeleiteten Schätzverfahren fußen, ist es auf der Betriebsebene möglich über Verfahren der Feldgefügeansprache vorliegende Gefügeschäden zu diagnostizieren. Beispielhaft zu nennen sind die Verfahren des MUNLV-NRW (2008) und vTi/ GKb (2012).

Ein Beratungskonzept, das alle Einflussgrößen berücksichtigt bietet die Möglichkeit den Maschineneinsatz an der Tragfähigkeit des Bodens auszurichten. Die erforderlichen Informationen können aus Bodenkarten, direkt auf der Ackerfläche und aus Tabellenwerken sowie Beratungshilfen ermittelt werden. Hierfür ist auch die Zusammenarbeit von Behörden aus Umwelt, Landwirtschaft und Wetterbeobachtung erforderlich.

Die Wahl der Maßnahmen muss sich an den individuellen Gegebenheiten eines Betriebs orientieren und kann entweder direkt aus einem geeigneten Konzept abgeleitet werden oder durch die Beratungstätigkeit vermittelt werden.

Es gibt eine Vielzahl an Maßnahmen zur Steigerung der Tragfähigkeit des Bodens sowie technischer und betrieblicher Maßnahmen, die „bodenschonendes Befahren“ gewährleisten können (z.B. vgl. Brandhuber u.a., 2008; BMVEL, 2001; ilu, 2008; TLL-AInfo). Ziel aller Maßnahmen ist es entweder die Tragfähigkeit des Bodens zu erhöhen und/oder die technischen Möglichkeiten und Arbeitsabläufe an die momentane Tragfähigkeit des Bodens anzupassen, so dass im Betriebsablauf selten der Zustand „Verdichtung zu erwarten“ eintritt, wie in Abbildung 8 dargestellt.

8. Handlungsfelder

Der aktuelle Kenntnisstand zur Bodenverdichtung, gibt klare Hinweise darauf, dass betriebliche Vorsorge sowohl für die Ackerkrume als auch für tiefere Bodenschichten erforderlich ist. Anhand bestehender Konzepte für Unterboden und Ackerkrume wird es der Bodenschutzberatung und den Betrieben ermöglicht, maßstabsunabhängig bis hin zum Ackerschlag und für verschiedene Feuchtezustände die Verdichtungsempfindlichkeit zu bewerten. Dieses Vorgehen ermöglicht es Druckbelastungen und zusätzliche Verdichtungen gemäß den Anforderungen des § 17 Bundes-Bodenschutzgesetz so weit wie möglich zu vermeiden. Wissenschaft und Praxis sind gefordert den gesetzlichen Passus „so weit wie möglich“ zu konkretisieren und weiterzuentwickeln. Die Ermittlung von Schwerpunktgebieten mit erhöhter Gefährdung der Bodenfunktionen kann in den Betrachtungsräumen von den Bodenschutzbehörden und in der Beratung dazu genutzt werden, regionale Bodenschutzkonzepte gegen Bodenverdichtung zu initiieren.

Ein wirksamer Schutz gegen schleichende Bodenverdichtung kann nur durch Beratung und Verbesserung der benötigten Informationen für die handelnden Akteure erfolgen. Da die Menge an Wasser im Boden eine Schlüsselrolle einnimmt, ist es von großer Bedeutung Informationen zum momentanen Bodenwassergehalt zur Verfügung zu stellen.

Die Bewertung der Auswirkungen eines sich wandelnden Niederschlagsregimes auf die Befahrbarkeit der Böden ist eine wichtige Aufgabe im Rahmen der Anpassung an das Klima. Die vorliegenden Szenarien deuten darauf hin, dass die Böden in einigen Regionen grundsätzlich feuchter, in anderen trockener werden.

Die bestehenden Bausteine für Konzepte zur Planung und Beratung können nicht zuletzt ein Beitrag zur Qualifizierung der europäischen Bodenschutzstrategie sein. Deutschland sollte an dieser Stelle gestalten und die hohen eigenen Standards in Europa etablieren helfen.

Vorsorge bedeutet zwar steigende Anforderungen an Management und Technik, jedoch garantiert eine optimierte und schonende Befahrung die Einsparung von Betriebsmitteln und langfristig die Sicherung der Erträge und Betriebseinkommen.

9. Literaturhinweise und Vertiefung

Böken, H., Künkel, K.-J. (2002): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. IN: ROSENKRANZ, BACHMANN, KÖNIG, EINSELE [Hrsg.]: Handbuch Bodenschutz, Kennziffer 4010. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Brandhuber, R., Demmel, M., Koch, H.-J., Brunotte, J. (2008): DLG-Merkblatt 344: Bodenschonender Einsatz von Landmaschinen – Empfehlungen für die Praxis. DLG e.V., Frankfurt a.M.

Brunotte, J. u.a. (2008): Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. Berichte über Landwirtschaft, 86(2) S. 262-284.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007): Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland BÜK 1000 N (Version 2.3)

Bundesministerium Für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) (2001): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. Vergriffen, Neubearbeitung durch BMELV in Vorbereitung.

Cramer, B.; Botschek, J.; Weyer, T. (2006): Untersuchung zur Bodenverdichtung nordrhein-westfälischer Böden. In: Bodenschutz, H. 3, S. 64-71.

Demmel, M. und Brandhuber (2010): Befahren bei Nässe vermeiden! Mit Technik und Management den Boden vor Verdichtung schützen. In: LOP Landwirtschaft ohne Pflug, Heft 5 2010

Horn, R., Fleige, H. u. Peth, S. (2009): Gute fachliche Praxis aus der Sicht der Bodenkunde. Vorsorge- und Maßnahmenwerte als Grundlage für die Bewertung der Verdichtungsgefährdung von Böden in der Landwirtschaft. In: Bodenschutz 3/09, S. 80-85

Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ilu) (Hrsg.) (2008): Strategien zum Bodenschutz – Sachstand und Handlungsbedarf. Tagungsband zur Fachveranstaltung von ilu, GKB und KTBL a, 5. und 6. Dezember 2007 in Bonn.

Lebert, M., Brunotte, J., u.a. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/ Regelungen zur Gefahrenabwehr, UBA-Texte 46/04 <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2831.pdf>

Lebert, M., Böken, H. (2004): Vermeidung von Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. In: Bodenschutz 2/04, S. 36-43

Lebert, M., Schäfer, W. (2005): Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Zeitschrift f. Bodenschutz 2/05, S. 42-46.

Lebert, M. (2010): Entwicklung eines Prüfkonzepes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden, UBA-Texte 51/2010

<http://www.uba.de/uba-info-medien/4027.html>

Ministerium f. Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) (Hrsg.) (2009): Bodenverdichtungen vermeiden – Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen.

Paul, R.; Fettisov, A. (2007): Einschätzung des Beratungsbedarfs für den Schutz der ackerbaulich genutzten Böden Thüringens vor Schadverdichtung. Themenblatt- Nr.: 46.17.220 der TLL, 11 S.

Rücknagel, J. (2006): Entwicklung eines Models zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten. Schriftenreihe Pflanzenbauwissen. Inst. f. Agrar- und Ernährungswiss., Martin-Luther-Univ. Halle, Band 1.

Stahl, H., Marschall, K., Götze, H. (2005): Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 10, Heft 15.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) – Ainfo: Das Agrarinformationssystem http://www.tll.de/ainfo/ai_idx.htm vTi und GKB (2012): Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker (3. Auflage)

Vorderbrügge, T. (2004): Vorschlag zur Ableitung von Bodenwerten für die Beurteilung von Bodenschadverdichtungen gemäß den Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes. In: Bodenschutz 2/04, S. 44-53

Vorderbrügge, Th., Brunotte, J. (2011): Teil I: Validierung von Pedotransferfunktionen. In: Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden) – Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis., Landbauforschung Vol. 61, No.1, 03.2011

zur Person:

Stephan Marahrens

Studium der Geographie (Diplom) mit Vertiefung Bodenkunde an der Universität Hannover, Diplom im Jahr 2001, Tätigkeit im Umweltbundesamt - Abteilung Wasser und Boden - seit 2005 und dort u.a. zuständig für Berichtswesen und Bewertungen im nichtstofflichen Bodenschutz (Erosion, Verdichtung), Koordinierung und Pflege der Bodenzustandsdaten (stofflich/ nichtstofflich), Kontaktstelle zum Boden-Dauerbeobachtungsprogramm der Länder und Pflege des länderübergreifenden Datensatzes, Redaktion des „Reiseführer – Die Böden Deutschlands“.

Bodenverdichtung in der Forstwirtschaft

Klaus v. Wilpert, Jürgen Schäffer

Für die Berücksichtigung der Belange des Bodenschutzes bei zunehmender Mechanisierung von Forstbetriebsarbeiten müssen Qualitätsnormen definiert und in verbindliche Handlungsanweisungen überführt werden. Um eine Akzeptanz in der Praxis zu erreichen, muss ein Befahrungskonzept neben dem Bodenschutz auch ökonomische und technische Aspekte berücksichtigen. Aufgrund der Prognoseunsicherheit eines ökologischen Schadenseintritts wird zur Bodenvorsorge eine Trennung von Produktions- und Befahrungsflächen und Minimierung des Anteils befahrener Flächenanteile vorgeschlagen.

Seit etwa 40 Jahren werden schwere Maschinen bei der Waldbewirtschaftung eingesetzt. Das Einsatzspektrum von Forstmaschinen wurde im Laufe der zurückliegenden Jahrzehnte zunehmend erweitert und umfasst heute neben der Rückung auch die mechanisierte Aufarbeitung im Bestand. Die Leistungsfähigkeit und Maschinengewichte stiegen in der Folge drastisch an, Fahrzeuggewichte einschließlich Ladung liegen heute nicht selten über 30 t.

Der Waldboden stellt ein weitgehend ungeschütztes Widerlager für die statischen und dynamischen Kräfte dar, die während des Maschineneinsatzes auftreten. Unter mitteleuropäischen Verhältnissen übersteigt die Krafteinwirkung in aller Regel die vom Mineralboden mobilisierbaren Scherkräfte. Die daraus resultierende Bodenverformung lässt sich durch einfache bodenphysikalische Kenngrößen wie z.B. die Lagerungsdichte oder die Porengrößenverteilung beschreiben. Diese Parameter sind aber nur bedingt geeignet die Beeinträchtigung des Wasser- und Gashaushaltes oder aber der Wurzelraumfunktion zu beschreiben. So ist in verformten Böden die Entsorgung von Kohlendioxid gehemmt und die Sauerstoffversorgung der Wurzeln eingeschränkt. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Intensität der Wurzelraumschließung durch die physiologisch aktiven Feinwurzeln aus. Die Feinwurzel-dichte stellt daher eine für die Beurteilung der Auswirkungen von befahrungsbedingten Strukturveränderungen geeignete ökologische Monitoringgröße dar.

Ökologische Folgen der Befahrung von Waldböden

Beeinträchtigung der Bodenbelüftung

Für ein optimales Wurzelwachstum müssen Wurzelspitzen gleichzeitig Anschluss an alle drei Komponenten des Bodens haben. Die Festsubstanz ist der mittel- und langfristige Speicher für Nährelemente und ermöglicht die Verankerung des Wurzelwerks zur Stabilisierung der oberirdischen Biomasse. Über die Bodenlösung wird der Wasser- und Nährstoffbedarf gedeckt. Die Bodenluft versorgt die atmungsaktiven Wurzeln mit Sauerstoff und dient zugleich der Entsorgung des bei der Atmung gebildeten Kohlendioxids. Der für das Wurzelwachstum essentielle Durchdringungsbereich der Komponenten muss für die Gewährleistung stabiler Waldbestockungen tief in den Mineralboden hinein reichen.

Als zentraler Schlüsselparameter für die Charakterisierung der ökologischen Folgen von Bodenstrukturstörungen kann die Belüftung angesehen werden (Hildebrand, 1986, 1994, Gaertig et al., 1999, Gaertig, 2001). Die maximale Verformung, die durch Holzerntemaschinen verursacht wird, findet im oberen Mineralboden statt. Da der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre zwingend über die Bodenoberfläche abgewickelt werden muss, haben oberflächliche Veränderungen der Bodenstruktur tief reichende Folgen für die Bodenbelüftung und die Ausbreitungsmöglichkeiten von Wurzeln. Im Boden erfolgt der Gastransport überwiegend aufgrund von Partialdruckunterschieden, d.h. auf diffusivem Weg. Die Flussrate ist abhängig vom antreibenden Konzentrationsgradienten und dem Diffusionskoeffizienten (D_s), der als Proportionalitätsfaktor die Behinderung des Gastransports durch den Boden charakterisiert. Der

relative scheinbare Gasdiffusionskoeffizient (D_s/D_0) beschreibt, um wie viel die Diffusion durch einen Bodenkörper im Vergleich zur Diffusion in der freien Atmosphäre reduziert ist. Neben dem Porenvolumen sind weniger der Porendurchmesser, sondern vielmehr die Porenkontinuität und die Tortuosität Strukturparameter, die die Effektivität des Gasaustausches zwischen Boden und Atmosphäre bestimmen.

Auf der Befahrungsversuchsfläche Weil im Schönbuch wurde die Beeinträchtigung von Bodenfunktionen nach einer sechs Jahre zurückliegenden Befahrung mit Maschinenaggregaten, die typischerweise in Durchforstungen eingesetzt werden (Gesamtgewichte von über 15 t), untersucht. Es ist davon auszugehen, dass nach dieser Zeit sich der bodenphysikalische Zustand und die Wurzelraumerschließung in einem Gleichgewicht befinden und eine Regeneration der Porenraumstruktur noch nicht stattgefunden hat. Der Oberboden in der Fahrspur und im Zwischenspurbereich wirkt immer noch als "Schleuse" für den Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre. Eine visuelle Folge dieser Belüftungsstörung ist ein Auftreten von anaeroben oder teilanaeroben Phasen, die sich profilmorphologisch in Form von "Minipseudogleyen" in den obersten 10 bis 20 cm Bodentiefe in der Fahrspur ausprägen.

Abbildung 1 zeigt für diese Versuchsfläche Tiefenprofile der relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten, die mit der von Frede (1996) beschriebenen Kammermethode an fünf 100 cm³-Stechzylinderproben pro Tiefenstufe und Befahrungssituation bestimmt wurden. Die Messungen der D_s -Werte wurden bei einer Wasserspannung von -60 hPa durchgeführt, die weiten Grobporen (Durchmesser >50 µm) waren in diesem Zustand entwässert und standen für die Belüftung zur Verfügung. Neben der im Gelände eindeutig an der Spureintiefung erkennbaren Fahrspur wurde der zwischen den beiden Fahrspuren liegende Zwischenspurbereich und der ca. 50 bis 80 cm außerhalb der Fahrspur liegende und in den angrenzenden Bestand vermittelnde Randbereich beprobt. Signifikante Unterschiede zwischen den Fahrspursituationen, die mit dem multiplen nicht parametrischen Dunn-Test auf einem Niveau von $p < 0.05$ ermittelt wurden, sind mit Kleinbuchstaben dargestellt ($a < b < c$). Die horizontalen Linien entsprechen der einfachen Standardabweichung. Standortlich handelt es sich bei dem Substrat um einen Luvisol (aus Löss über Angulatensandstein, Skelettgehalt im schluffig-lehmigen A_n - und E-Horizont unter 10%, Übergang in den tonig-lehmigen B_t zwischen 40 und 50 cm).

Die höchsten D_s/D_0 -Werte im Oberboden wurden auf der Kontrollfläche festgestellt. In keiner der vier untersuchten Tiefenstufen im Bereich des Fahrspurrandes war ein signifikanter Unterschied zur Kontrollfläche zu belegen. Um den Faktor 10 geringere Diffusionswerte charakterisieren dagegen den Oberboden in der Fahrspur, das Tiefenprofil zeigt bis in die Tiefe von 34 cm im Gegensatz zur Kontrolle keinen ausgeprägten Tiefengradienten. Im Zwischenspurbereich liegen die D_s/D_0 -Werte auf einem deutlich niedrigeren Niveau als im unbefahrenen Bestand bzw. der Fahrspurrandsituation. Erst in 30 bis 34 cm Bodentiefe sind die Diffusionswerte zwischen den untersuchten Straten wieder vergleichbar. Diese Tiefenstufe stellt damit die Untergrenze der verformten Bodenzone dar.

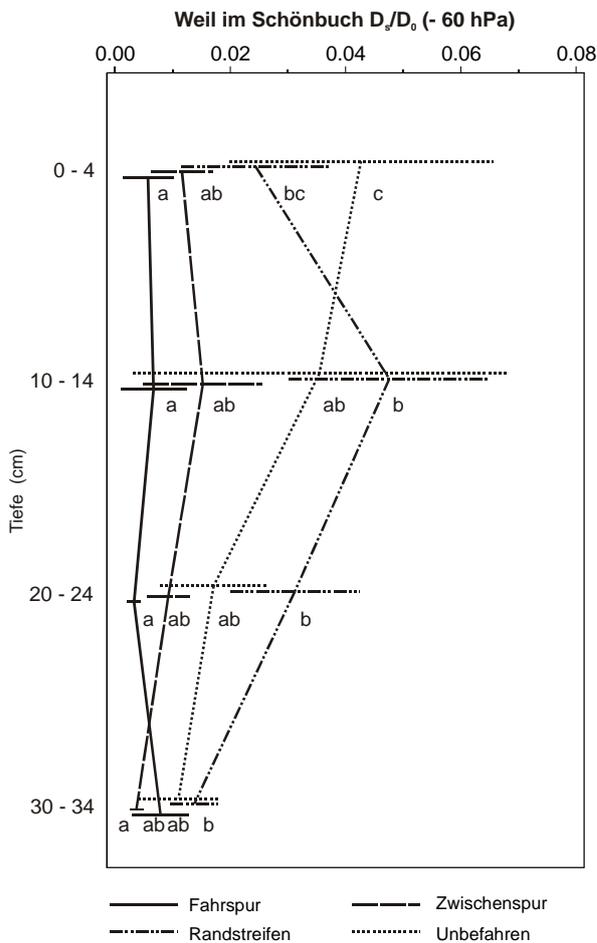


Abbildung 1: Tiefenprofile der relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten (D_s/D_0) bei einer Wasserspannung von -60 hPa für die Fahrspursituationen in Weil im Schönbuch (6 Jahre nach Befahrung).

Wenn der Gasaustausch durch eine befahrungsbedingte Bodenverformung im Bereich der Bodenoberfläche gestört ist, so führt dies in erster Linie zu einer Erhöhung der CO_2 -Konzentration in der Bodenluft. In einem mehr oder weniger schmalen Elastizitätsbereich kann infolge des erhöhten Konzentrationsgefälles zur Außenluft die Entsorgung von CO_2 begünstigt werden. In diesem Fall ist die biologische Aktivität des Bodens nicht signifikant beeinträchtigt. In der Regel ist die diffusive Gasdurchlässigkeit des

Bodens nach Befahrung jedoch so stark vermindert, dass diese negative Rückkopplung außer Kraft gesetzt ist und die CO_2 -Entsorgung und O_2 -Nachlieferung gestört sind. Damit sinkt die Respirationsrate des Bodens. Dies beeinflusst die strukturschaffende Aktivität von Bodenorganismen und vor allem den besonders Energie konsumierenden Vorgang des Wurzelwachstums.

Abbildung 2 zeigt für zwei Quertransekte über Fahrtrassen einer bereits 14 Jahre zurück liegenden Befahrung auf einem grusigen Cambisol (Skelettgehalt im Oberboden zwischen 25% und 50%) die Erhöhung der CO_2 -Konzentrationen in der Fahrspur in einer Bodentiefe von 10 cm. In den Fahrspuren lagen die CO_2 -Konzentrationen zwischen 0.7 Vol.% und 1.6 Vol.%, die mittleren CO_2 -Konzentrationen sind im Vergleich zur unbefahrenen Referenzsituation (0.3 Vol.%) um den Faktor 3 bis 4 erhöht. Dies bedeutet, dass selbst auf diesem weniger befahrungssensitiv eingestuftem, skelettreicheren Substrat Beeinträchtigungen der diffusiven Gasleitfähigkeit über mehr als ein Jahrzehnt erhalten bleiben.

**CO_2 - Konzentrationen in 10 cm Bodentiefe
14 Jahre nach Befahrung**

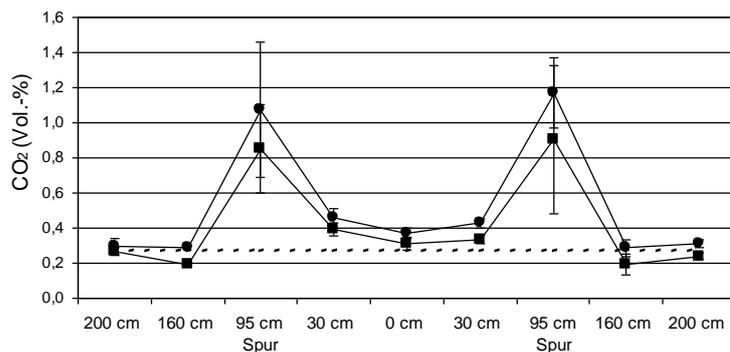


Abbildung 2: CO_2 -Konzentration in der Bodenluft in einer Bodentiefe von 10 cm. Die Messungen erfolgten 14 Jahre nach der Befahrung auf einer grusigen Braunerde. Gestrichelte Linie: Referenzwert für die unbefahrene Bestandessituation.

Auswirkungen der Befahrung auf die Wurzelraumfunktion

Im Vergleich zu den weiteren Baumkompartimenten ist der Sauerstoffbedarf von Baumwurzeln insbesondere der physiologisch aktiven Feinwurzeln überproportional hoch. Hildebrand (1986, 1987) fand eine negative Korrelation zwischen zunehmender Lagerungsdichte und dem Wachstum von Buchenkeimlingen sowie der Feinwurzelproduktion bei Fichte. Er interpretierte diesen Befund als Folge reduzierter Sauerstoffverfügbarkeit. Durch künstliche Sauerstoffanreicherung konnte Murach et al. (1993) höhere Wachstumsraten der Feinwurzeln im tieferen Mineralboden erreichen. In einem Laborversuch zeigten Qi et al. (1994), dass die Wurzelwachstumsraten von Douglasiensämlingen mit zunehmenden CO₂-Konzentrationen exponentiell abnehmen. In einem Vergleich von bodenstrukturgestörten Eichenbeständen mit ungestörten Referenzsituationen fanden Gaertig et al. (2001), dass eine Verringerung des relativen scheinbaren Diffusionskoeffizienten von 0.1 auf 0.01 an der Bodenoberfläche zu einer signifikanten Verringerung der Feinstwurzeldichten bis in eine Bodentiefe von 70 bis 80 cm führte.

Es ist davon auszugehen, dass in Folge der über Jahre hinweg verringerten Belüftung des Bodens im Bereich der Fahrspur und auch im Zwischenspurbereich auf der Versuchsfäche Weil im Schönbuch eine Hemmung der Wurzelraumschließung eingetreten ist und dies quantitativ an verringerten Feinwurzelintensitäten nachgewiesen werden kann.

Abbildung 3 zeigt die Feinwurzelichten (Durchmesser < 2 mm, gezählt in einem Raster von 4 * 4 cm) über ein bestockungsfreies Fahrspurtransekt von 4 m Breite und 60 cm Tiefe. Die Distanz des Transektes zu den nächstliegenden Fahrtrassenrandbäumen betrug ca. 1m. An diesem Transekt wurden auch die Stechzylinderproben für die Bestimmung der Diffusionskoeffizienten, die in Abbildung 1 dargestellt sind, entnommen.

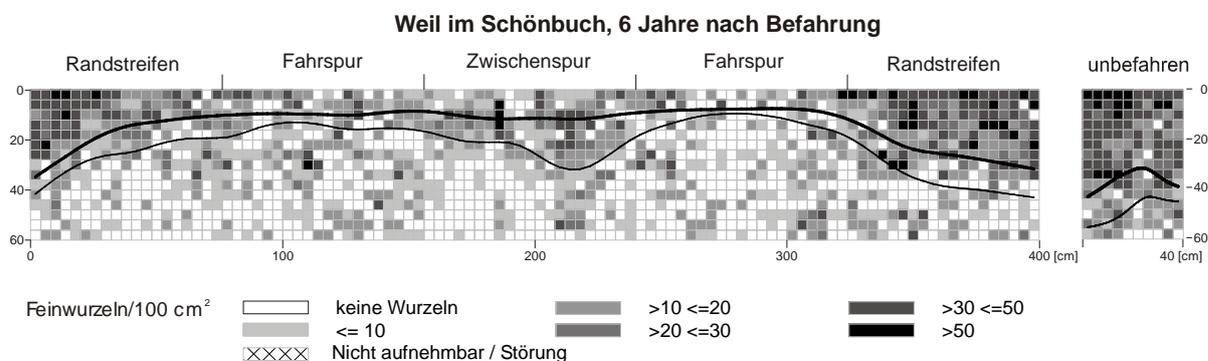


Abbildung 3: Verteilungsmuster der Feinwurzelichten (Durchmesser < 2 mm) auf einem Fahrspurtransekt in Weil im Schönbuch (links). Rechts dargestellt ist die unbefahrene Kontrolle. Obere Linie entspricht dem Grenzwert für eine intensive Feindurchwurzelung (20 Feinwurzeln pro 100 cm²), die feinere Linie einer extensiveren Durchwurzelung (10 Feinwurzeln pro 100 cm²).

Sowohl für die Feinwurzelichte als auch für die Durchwurzelungstiefe wurden die geringsten Werte unter der Fahrspur gefunden. Selbst unmittelbar an der Bodenoberfläche wiesen in diesem Bereich zahlreiche Zählzellen keine Feinwurzeln auf. Die intensiv durchwurzelte Zone mit mehr als 20 Feinwurzeln pro 100 cm² verlief unter der gesamten Fahrtrasse nahezu oberflächenparallel in einer Tiefe von 10 bis 12 cm. Erst im Randbereich stieg die Durchwurzelungstiefe deutlich an und erreichte am Profilrand nahezu die Tiefe des Kontrollprofils. Der Bereich extensiverer Durchwurzelung (mehr als 10 Feinwurzeln pro 100 cm²) folgt im Verlauf der intensiver durchwurzelten Zone. Im Zwischenspurbereich ist eine im Vergleich zur Fahrspursituation tiefer reichende Durchwurzelung gegeben. Im Kontrollprofil findet sich über die gesamte Tiefe eine homogenere Feindurchwurzelung.

Diese Intensität und Durchwurzelungstiefe wird auch 50 bis 80 cm außerhalb des Fahrspurbereichs noch nicht erreicht.

Dieser Befund verdeutlicht, dass in Folge der Befahrung nicht nur im unmittelbar verformten Bereich reduzierte Feinwurzelndichten auftreten. Über die gesamte Fahrtrasse und darüber hinaus ist ein negativer Befahrungseinfluss auf die Wurzelraumerschließung eingetreten. Das auf der Versuchsfläche Weil im Schönbuch vorgefundene Verteilungsmuster der Feindurchwurzelung korrespondiert mit dem Ergebnis eines zweidimensionalen Modells der Sauerstoffverteilung unter Fahrspuren, das von Schack-Kirchner et al. (1993) vorgestellt wurde. Bei diesem beschränkte sich die Zone reduzierter Sauerstoffverfügbarkeit wie beim Verteilungsmuster der Feinwurzeln nicht nur auf den unmittelbar verformten Bereich, sondern reichte weit in den nicht überfahrenen Boden hinein.

Praxisuntersuchung zur Dauerhaftigkeit von Befahrungsschäden

An gut dokumentierten Praxis-Fahrspuren, die zwischen 6 und 24 Jahren alt und seit der letzten Befahrung nachweislich nicht mehr befahren waren, wurden Untersuchungen des Belüftungsstatus und der Feinwurzel – Tiefenverteilung mit dem Ziel durchgeführt, anhand dieser unechten Zeitreihe Regenerationsansätze zu identifizieren (v. Wilpert und Schäffer, 2006). Außerdem sollten mit dieser explorativen Studie ungefähre Zeitdauer und räumliche Entwicklung natürlicher Regenerationsvorgänge auf Fahrtrassen orientierend eingeschätzt werden. Die Randbedingungen der Studie sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Rahmenbedingungen der Regenerationsstudie

	Weil im Schönbuch	Wolfegg	Ettenheim 1	Ettenheim 2	Mengen
Geologie	Löss	Glazialer Lehm	Löss		Glazialer Lehm
Bestand	Fichtenstangenholz mit Buche, Lärche	Fichtenbaumholz	Buchendickung mit Eiche, Fichte, Kiefer		Fichtenstangenholz
Alter	35 - 40	50 - 55	18	24	35
Erntemaßnahme	Durchforstung	Durchforstung	Streifenkahlschlag		Räumung nach Sturm
Erntetechnik	<i>Timberjack 1270</i> (16 t Gewicht) <i>Ponse HS 10</i> (~15 t Gewicht)	<i>FMG 746/250</i> <i>ÖSA Super Eva</i> (12.6 t Gewicht)	<i>Motormanuell</i>		<i>Motormanuell</i>
Rücketechnik	<i>Valmet Forwarder</i> (Gesamtgewicht: >15 t)	<i>FMG 678</i> <i>Mini-Bruunett</i> (Gesamtgewicht: 16 t)	<i>Welte Ökonom/Unimog U90</i> (Gesamtgewicht: 9 - 10 t)		<i>Eicher "Königstiger"</i> (Eigengewicht ca. 3 t)
Zeit seit Ernte	6 Jahre	12 Jahre	18 Jahre	24 Jahre	35 Jahre

Die Untersuchung von Tiefenprofilen des Diffusionskoeffizienten ergaben, dass unter den Fahrspuren 6 Jahre nach der Befahrung eine signifikante Verminderung der diffusiven Luftleitfähigkeit gegenüber der Kontrollfläche bis in 24 cm Bodentiefe zu beobachten war und nach 14 Jahren bis in 14 cm (Abbildung 4). In den Oberbodenschichten bis 24 cm ist der

relative Diffusionskoeffizient in den ersten 14 Jahren nach der Befahrung durchschnittlich um den Faktor 4-10 gegenüber der Kontrolle vermindert, was eine Erhöhung des Fließwiderstands für den Bodenluftaustausch in der gleichen Größenordnung bedeutet. Das heißt, dass an der Schnittstelle zwischen Boden und Atmosphäre, über die die Bodenbelüftung zwingend erfolgen muss, eine Reduktion der Gasdurchlässigkeit eingetreten ist, welche die Belüftung des gesamten darunter liegenden Bodenprofils einschränkt. Damit werden sowohl das Wurzelwachstum im gesamten Bodenprofil behindert als auch die strukturschaffende Bioturbationsleistung der Bodenfauna – der einzige effektive Prozess der Regeneration natürlicher Bodenfunktionen nach befahrungsbedingten Bodenschäden.

Ältere Fahrspuren zeigten in den obersten 14 cm Bodentiefe eine erste Erholung der belüftungsrelevanten Bodenstruktur, die jedoch auch 18 und 24 Jahre nach der Befahrung noch lange nicht die auf den Kontrollflächen gemessene Gasdurchlässigkeit voll wiederhergestellt hat, sondern nur ein Zwischenstadium, das sich nicht mehr signifikant zwischen Fahrtrassen und Kontrollfläche unterscheidet. Die Gasdiffusionskoeffizienten betragen auf den Fahrspuren immer noch ca. 50% der Kontrolle. Dies ist schon als deutlicher Hinweis auf die erhebliche Dauerhaftigkeit der durch Befahrung ausgelösten Störung ökologischer Bodenfunktionen zu werten.

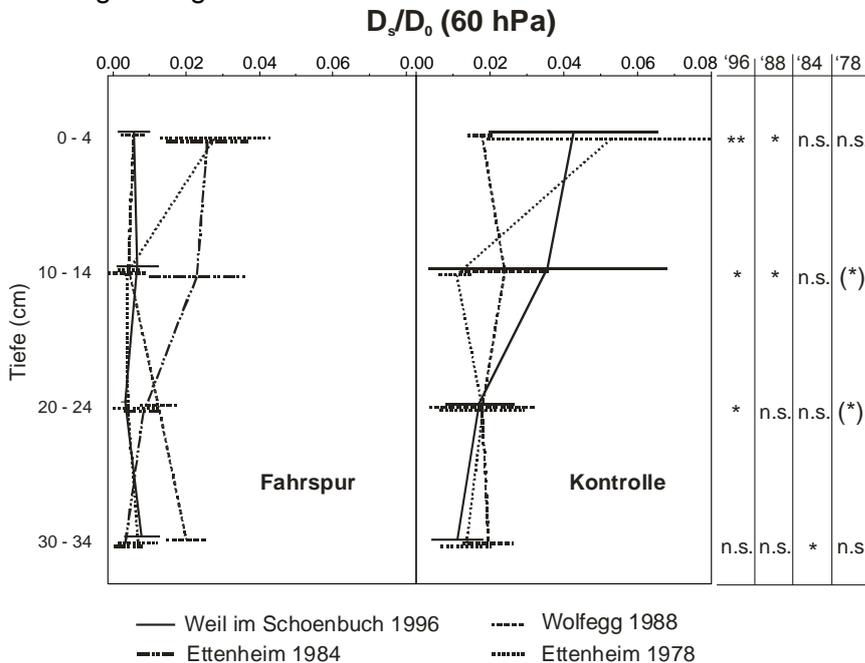


Abbildung 4: Tiefenprofile des relativen Gasdiffusionskoeffizient (D_s/D_0) bei Feldkapazität (60 hPa) an 6 – 24 Jahre alten Fahrspuren und Kontrollflächen. Signifikanzniveaus für den Unterschied zwischen Fahrspur und Kontrolle: (***) $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, (*) $p < 0.1$, n. s. = nicht signifikant. Querbalken: einfache Standardabweichung

Die unter den unterschiedlich alten Fahrspuren beobachteten Tiefenprofile der Feinwurzeldichte und deren relative Unterschiede zur Kontrolle können als direkter „Bioindikator“ der Regeneration der Wurzelraumfunktion des Boden interpretiert werden. Wenn der Luftaustausch über die Bodenoberfläche wieder den hohen Sauerstoffbedarf physiologisch aktiver und wachsender Wurzeln decken kann, steigt die Feinwurzeldichte wieder auf das natürlich, auf den unbefahrenen Kontrollflächen beobachtete Maß an (Abbildung 5). Dabei ist zu beachten, dass eine Behinderung der Bodenbelüftung im Bereich der Bodenoberfläche die Durchwurzelungsintensität im gesamten Bodenprofil vermindert.

Das heißt, dass eine Regeneration der Feinwurzeldichte noch stärker als die Regeneration von Bodenstruktur und Belüftung an der Bodenoberfläche beginnt und erst allmählich in tiefere Bodenschichten voranschreitet.

Relative Feinwurzeldichten unter Fahrspuren

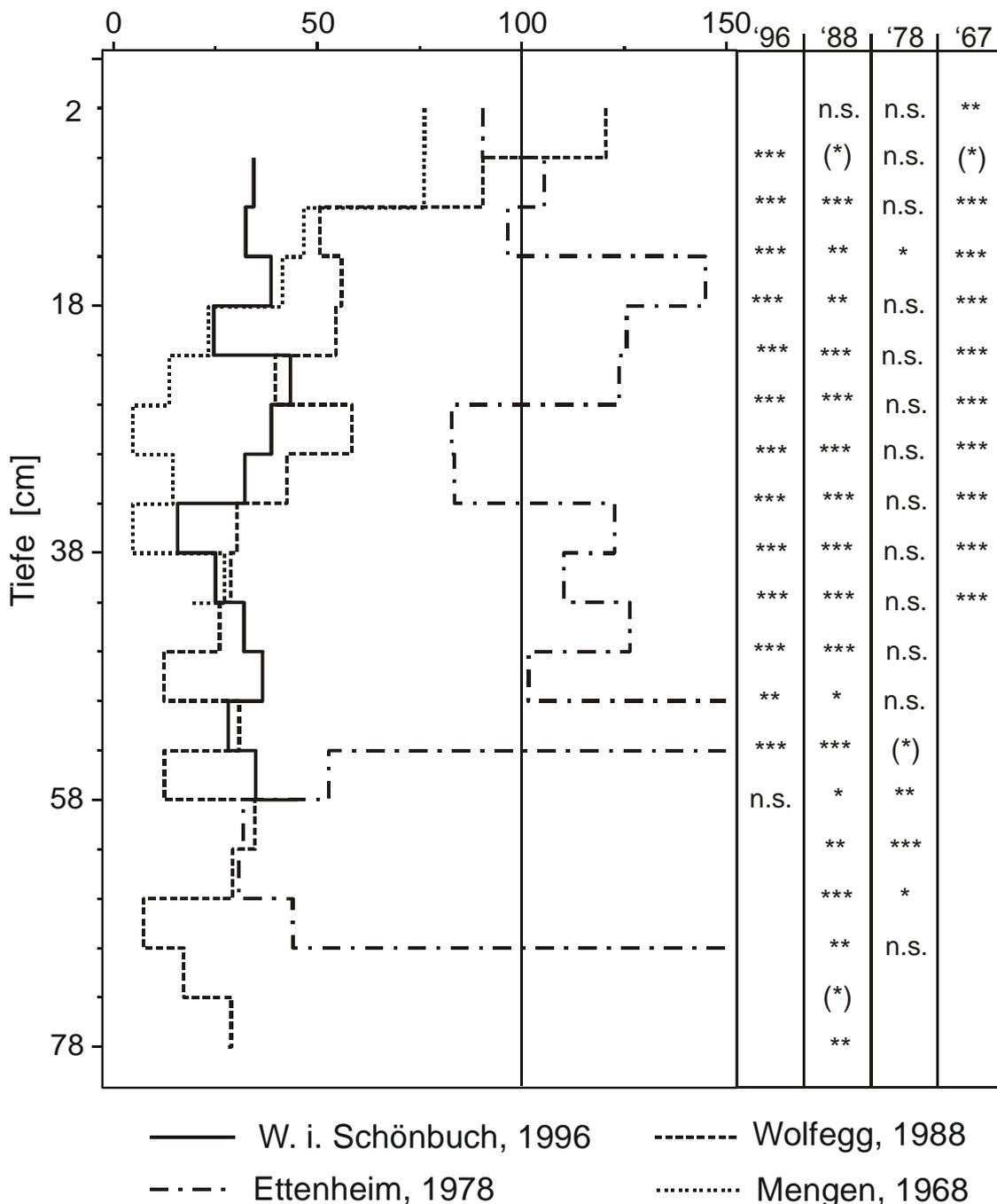


Abbildung 5: Tiefenprofile der relativen Feinwurzeldichte in Prozent der Kontrollfläche an 6 – 24 Jahre alten Fahrspuren. Vertikale Kontrolllinie (100%) = Kontrollfläche. Signifikanzniveaus im nichtparametrischen Wilcoxon Test für den Unterschied zwischen Fahrspur und Kontrolle: (***) $p < 0.001$, (**) $p < 0.01$, (*) $p < 0.05$, (•) $p < 0.1$, n. s. = nicht signifikant. Querbalken: einfache Standardabweichung

Bis 18 Jahre nach der Befahrung sind die Feinwurzeldichten durch das gesamte beobachtete Bodenprofil überwiegend auf 50% der Kontrolle oder darunter reduziert. Eine schwach ausgeprägte Regeneration der Feinwurzeldichte beginnt nach 14 Jahren von der Bodenoberfläche her und erreicht eine Tiefe von maximal 8 cm. Vier Jahre später, 18 Jahre nach der Befahrung, reicht die Erholung der Feinwurzeldichte bis in 20 cm Tiefe.

Vierundzwanzig Jahre nach der Befahrung scheint sich die Feinwurzeldichte im gesamten Bodenprofil weitgehend erholt zu haben – sie pendelt um die 100 % - Linie, entspricht also den Messwerten auf der Kontrollfläche. Allerdings sind die Flächen in Ettenheim mit den ältesten Fahrspuren insofern nicht ganz mit den anderen Flächen zu vergleichen, als die dortigen Laufholzbestände eine höhere Wurzelaktivität als die Fichtenbestände auf den jüngeren Flächen aufweisen. Außerdem waren die dort eingesetzten Forstmaschinen leichter und verursachten somit keine so tief in den Boden reichenden Verdichtungsschäden (Vossbrink und Horn, 2004), wie auf den jüngeren Flächen, auf denen schwerere Maschinen im Einsatz waren (s. Tabelle 1). Die Vermutung für die Regeneration von Befahrungsschäden günstiger Rahmenbedingungen auf der Praxisfläche Ettenheim wird von qualitativen Beobachtungen an mehreren, bis zu 30 Jahre alten Rückegassen bestätigt, die allerdings nicht in eine systematische Studie einbezogen waren wie das hier vorgestellte Material. Diese Einzelbeobachtungen zeigten auch nach 30 Jahren keine effektive Regeneration der Wurzelraumfunktion unter den Trassenflächen.

Konsequenzen für Bodenschutzstrategien in der Praxis

Es bleibt festzuhalten, dass die Regeneration von Bodenschäden durch Befahrung, insbesondere, wenn die auf den Boden wirkende Gesamtlast >10 - 15 t beträgt und die Tiefenwirkung der Bodenverformung i.d.R. den gesamten Hauptwurzelraum erfasst (Vossbrink und Horn, 2004), unter günstigen Randbedingungen ca. 25 Jahre, im Normalfall deutlich längere Zeiträume benötigt.

Da im Zuge des technischen Fortschritts ständig steigende Maschinengewichte und Auflasten (Schack-Kirchner und Hildebrand, 2009) zu signifikanten Bodenverformungen in den Unterböden (50 – 60 cm) führen, in denen sowohl biologische als auch physikalische Strukturbildungsprozesse mit geringer Rate oder gar nicht ablaufen, ist mit einer effektiven Regeneration dort nicht zu rechnen.

Es bedarf einer differenzierten Bodenschutzstrategie, um eine solch dauerhafte Schädigung der Bodenstruktur und Einschränkung essentieller Bodenfunktionen wie die Bodenbelüftung zu minimieren bzw. zu vermeiden und gleichzeitig eine maschinengestützte Holzernte zu ermöglichen (Schäffer, 2005). Mit der Richtlinie Feinerschließung (MLR, 2003) wurde eine solche praxisorientierte Bodenschutzstrategie für mechanisierte Holzerntemaßnahmen in Baden-Württemberg erlassen. Verbindliche Festlegungen in dieser Richtlinie sind:

- Flächiges Befahren von Waldbeständen ist zu unterlassen
- Konzentrierung notwendiger Befahrung auf Wege, Maschinenwege und Rückegassen
- Dauerhafte Kennzeichnung und Dokumentation von Rückegassen
- Erhaltung von deren technischer Befahrbarkeit, ggf. mittels Teilbefestigung
- Möglichst vorhandene Wege und Fahrtrassen weiter nutzen, um flächige Akkumulation von Befahrungsschäden zu vermeiden
- Der Rückegassenabstand wird an die Befahrungssensitivität des Bodens angepasst. Der Regelabstand von Rückegassen ist 40 m. In dichten Jungbeständen können zeitlich begrenzt Rückegassen im 20 m - Abstand angelegt werden. Nicht mehr benötigte Rückegassen sind aufzulassen und, wenn nötig, die Regeneration von Bodenschäden durch aktive Maßnahmen wie mechanische Lockerung und Hilfspflanzenanbau zu unterstützen.

Weitergehende Bodenschutzmaßnahmen als in den meisten Befahrungsrichtlinien anderer Länder sind in Baden-Württemberg durch die Festlegung des Regelabstands zwischen Rückegassen von 40 m und durch die Bestimmung, Bodenschäden auf nicht mehr benötigten Trassen durch aktive Regenerationsmaßnahmen zu beseitigen, gegeben. Um sowohl den organisatorisch – technischen Anforderungen der mechanisierten Holzernte als

auch dem Bodenschutz gleichermaßen Rechnung zu tragen und der Gefahr von durch zu restriktiven Regeln provozierten Ausweichhandlungen vorzubeugen, wurde eine standortsdifferenzierte Festlegung von Rückegassenabständen in Abhängigkeit von der Befahrungsempfindlichkeit der Substrate getroffen (Tab. 2). Dabei wurden sowohl Aspekte wie die mechanische Stabilität der Böden durch Steinigkeit berücksichtigt als auch die überproportional hohe physikalische Regenerationsrate auf Tonböden durch Quellen und Schwinden. Auf letzteren müssen jedoch i.d.R. aufgrund der extrem hohen Sensitivität gegenüber einer Störung der technischen Befahrbarkeit Alternativen zur Befahrung auf Rückelinien, z.B. Horizontal-Seillinienverfahren in Betracht gezogen werden.

Tabelle 2: Befahrungsempfindlichkeit der Waldböden in Baden-Württemberg und Rückegassenabstände nach der Richtlinie Feinerschließung (MLR 2003)

Bodenarten-/Substratgruppe	Flächenanteil	Befahrungsempfindlichkeit		Hangneigung	
		bodenökologisch	technisch	Ebene, Hänge geringerer Neigung	Steilhänge/ Sonderstandorte
Tone, Zähtone, Mergeltone	2%	-	+	98 %	2%
Kalkverwitterungslehme, Mergelböden	7%	-	-/+	89%	11%
Tonlehme	3%	+	+	100%	-
Schlufflehme	24%	+	+	94%	6%
schluffige, sandige, sandig-tonige, grusige und steinige Lehme	12%	+	+	88%	12%
schwach lehmige bis lehmige Sande und Feinsande, lehmige Grusböden und Grushänge, Kies- und Schotterlehme	34%	-/+	-/+	74%	26%
Lehmfreie bis schwach lehmige Sand-, Grus-, Kies- und Steinschuttböden	10%	-	-	36%	64%
Blockhänge, Blocklagen und Felshänge	3%	-	-	34%	66%
Substrate mit großer bodenartlicher Bandbreite	4%	-/+	-/+	41%	59%
Standorte mit mehr als 20 cm organischer Auflage, v.a. Moore und Missen	1%	-/+	-/+	82%	18%

40m-Gassen (39%)
 20/40m-Gassen (39%)
 20m-Gassen (22%)

In Tabelle 2 ist auf den Lehmen, den leistungsfähigsten Standorten, welche die höchste Befahrungsempfindlichkeit aufweisen, bindend die Einhaltung eines Rückegassenabstands von 40 m vorgeschrieben. Dies betrifft in Baden-Württemberg einen Flächenanteil von knapp 40 %. Auf Böden mit geringerer Neigung zu dauerhaften, ökologischen Befahrungsschäden - hier sind stärker steinige und tonige Böden zusammengefasst (letztere wegen ihres physikalischen Regenerationsvermögens) - wird ein Rückegassenabstand von 20 m zugelassen. Dies trifft auf etwas mehr als 20 % der Fläche zu. Auf tonigen Böden ist diese Festlegung außer durch ihr Regenerationsvermögen durch die Tatsache begründet, dass auf diesen gegenüber einer Zerstörung der technischen Befahrbarkeit außerordentlich empfindlichen Substraten durch den 20 m Rückegassenabstand die Befahrungsintensität und damit die Gefahr von Gleisbildung vermindert wird. Auf sandigeren, steinigere Lehmen wird eine zeitlich begrenzte Nutzung von Trassen im 20 m Abstand für die Erst- und ggf. Zweidurchforstung in Jungbeständen zugelassen. Dieser Ausnahmetatbestand ist durch den in dichten Jungbeständen begrenzten Aktionsradius mechanisierter Holzernteverfahren begründet. Da in dieser Bestandesphase geringere Holzmassen anfallen, können zudem

leichtere Maschinen eingesetzt werden. Die Richtlinie schreibt vor, nach der Jungbestandsphase jede zweite Rückegasse aufzulassen und, wenn nötig, aktiv zu rekultivieren. In älteren Beständen wird aufgrund des längeren Holzes und der höheren Maschinenreichweiten ein Gassenabstand von 20 m nicht mehr benötigt.

Es ist damit zu rechnen, dass im Zuge der Umsetzung eines solchen Organisationskonzepts ein Bedarf für die aktive Unterstützung der Regeneration von Befahrungsschäden auf aufgelassenen Fahrtrassen bestehen wird. Da über die technischen Vorgehensweisen einer solchen aktiven Förderung und deren Effizienz wenig bekannt ist, werden derzeit von diversen Arbeitsgruppen Versuche angelegt und betrieben, welche die Entwicklung praxistauglicher Konzepte zur aktiven Regeneration von Befahrungsschäden zum Ziel haben. Dabei werden Hilfspflanzenanbauten (z.B. Lüscher und Sciacca, 2009), mechanische Bodenlockerung in Kombination mit Hilfspflanzenanbau und Kalkung (Kremer, 2008) getestet. Ein interessanter Ansatz ist der Einsatz von Gräsern und krautigen Pflanzen, deren Wurzeln über ein Aerenchym verfügen und so in teilanaerobe und anaerobe Bodenpartien einwachsen und diese lockern können (Gaertig und Green, 2009). Die Flatterbinse (*Juncus effusus*) verfügt über ein solches Regenerationspotential, wie Klimo (1983) anhand von Messungen der Lagerungsdichte nachweisen konnte.

Die hier vorgestellten Organisationskonzepte zur praktischen Realisierung von Bodenschutz während der mechanisierten Holzernte sollen in das strategische Konzept zum Nachhaltigkeitsmanagement des Landesbetriebs ForstBW als integraler Bestandteil aufgenommen werden. Durch diese politische Verankerung soll die Umsetzung von Bodenschutzstrategien während der Holzernte verbessert und durch Dokumentation diese Vorsorgeleistung sichtbar gemacht und bewertet werden.

Literatur

- Frede, H.G. (1986): Der Gashaushalt von Waldböden. Göttinger Bodenkundliche Berichte, Bd. 87, 130 S.
- Gaertig, T., Green, K. (2009): Die Waldbodenvegetation als Weiser für Bodenstrukturstörungen. In: Walderschließung und Bodenschutz, Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 79, 83-105.
- Gaertig, T. (2001): Bodengashaushalt, Feinwurzeln und Vitalität von Eichen. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, H. 40, 157 S.
- Gaertig, T., H. Schack-Kirchner und E.E. Hildebrand (2001): Steuert Gasdurchlässigkeit im Boden Feinstwurzeldichte und Vitalität bei Eiche. AFZ/Der Wald 25, 1344-1347.
- Gaertig, T., K. v. Wilpert und H. Schack-Kirchner (1999): Bodenbelüftung als Steuergröße für das Feinwurzelnwachstum. Allg. Forst- u. Jagdztg. 170, 81-87.
- Hildebrand, E.E. (1994): Forest Soils - Medium for Root Growth. In: Proceedings from ECE-FAO-ILO Interactive Workshop and Seminar FORSITRISK Soil, Tree, Machine Interactions 4.-8.7.94 in Feldafing, Germany.
- Hildebrand, E.E. (1987): Die Struktur von Waldböden – ein gefährdetes Fließgleichgewicht. Allg. Forst Zeitschr. 42, 424 –426.
- Hildebrand, E.E. (1986): Der Einfluss der Strukturschädigung von Feinlehm auf die Wurzelentwicklung zweier Fichtenklone. Mitt. Verein Forstl. Standortskunde u. Forstpflanzenzüchtung 32, 50-56.
- Klimo, E. (1983): The influence of clear cut logging on soil properties and the cycle of elements in the ecosystem of spruce forest. Lesnictvi, 29, 427-512.
- Kremer, J. (2008): Regenerationsvermögen befahrungsbedingt strukturveränderter Böden. LWF aktuell, 67, 13-15.
- Lüscher, P., Sciacca, S. (2009): Bodenbeeinträchtigungen im Wald: Probleme und Lösungsansätze in der Schweiz. In: Walderschließung und Bodenschutz, Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 79, 11-18.
- MLR (Ministerium für Ländlichen Raum Baden-Württemberg) (2003): Richtlinie der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zur Feinerschließung von Waldbeständen. 27 S.

- Murach, D., L. Isle, F. Klaproth, A. Parth und H. Wiedemann (1993): Rhizotron-Experimente zur Wurzelverteilung der Fichte. Forstarchiv 64, 191-194.
- Qi, J., J.D. Marshall, K.H. Mattson (1994): High soil carbon dioxide concentrations inhibit root respiration of Douglas fir. New Phytol. 128, 435-442.
- Schack-Kirchner, H., E.E. Hildebrand und K. v. Wilpert (1993): Bodensauerstoffgehalt unter Fahrspuren, Einsatz eines Simulationsmodells. Allg. Forst Zeitsch. 3, 118-121.
- Schack-Kirchner, H., Hildebrand, E. E. (2009): Wie lässt sich das „Verformungsexperiment“ in unseren Waldböden stoppen? In: Walderschließung und Bodenschutz, Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 79, 1-9.
- Schäffer, J. (2005): Befahrung von Waldböden – Strategien zur Schadensminimierung. Bodenschutz, 03, 76-82.
- Vossbrink, J.; Horn, R. (2004): Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. Eur. J. Forest Res., 123, 259-267.
- v. Wilpert, K. Schäffer, J.: (2006): Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. European Journal of Forest Research, 125/2, 129-138.

Zur Person:

LtdFDir

PD Dr. Klaus v. Wilpert

Forstl. Vers. u. Forschungsanst. Baden-Württemberg (FVA)

Abteilungsleiter

Abteilung Boden und Umwelt (BU)

Während meiner Forschungsarbeit an der Forstlichen Versuchs u. Forschungsanstalt Baden-Württemberg war ich mit Schwerpunkt mit Aufbau, Betrieb und Auswertung der Messnetze der Forstlichen Umweltüberwachung im Wald befasst. Schwerpunktbereiche sind die Bodenzustandserfassung im Wald (BZE), die Ernährungsinventur im Wald, das Depositionsmessnetz und das Stoffflussmessnetz (Level II).

In den letzten 5-10 Jahren wurden unter meiner Leitung statistisch basierte Regionalisierungsmodelle entwickelt, die bodenchemische und –physikalische Zustandsgrößen ausgehend von den in systematischen Gitternetzen vorliegenden Daten der Umweltmessnetze in Bereichen schätzen, in denen keine Messungen vorliegen. Diese quasi-kontinuierlichen Geländemodelle sind eine wertvolle Planungsgrundlagen.

OFR

Dr. Jürgen Schäffer

Forstl. Vers. u. Forschungsanst. Baden-Württemberg (FVA)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Abteilung Boden und Umwelt (BU)

Schwerpunkt meiner Forschungstätigkeit an der FVA lag im Bereich der Bodenphysik Untersuchung von Bodenstruktur- und Belüftungsstörungen befahrener Waldböden und Wurzelraum im Vordergrund. Daneben befasste ich mich mit der Wirkung von Waldböden Senke klimarelevanter Spurengase.

Zu meinen Aufgaben zählt weiterhin die Betreuung von Düngeversuchsflächen und Monitoringmessnetzen und deren Auswertung sowie die Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur Bodenschutzkalkung.



Einsatz von Schwarzerlen zur Regeneration von mechanisch verdichteten Waldböden

Christine Meyer

1. Einleitung

"Immer grösser, immer schwerer", getreu diesem Motto durchlebte die Forsttechnik in den letzten Jahrzehnten eine rasante Entwicklung. Aber nicht nur der technische Fortschritt, sondern vor allem wirtschaftliche Aspekte und der Klimawandel veränderten die Waldwirtschaft in den letzten Jahrzehnten nachhaltig. Doch zu welchem Preis für unsere Waldböden? Nachdem der Begriff Bodenschadverdichtung in der Landwirtschaft „ein alter Bekannter“ ist, gewinnt er auch in der Waldwirtschaft zunehmende Bedeutung.

Durch den Einsatz schwerer Forstmaschinen kommt es häufig zu ausgeprägten Bodenverdichtungen unter Rückegassen und dadurch zu negativen Auswirkungen auf die Struktur und Funktionalität der betroffenen Waldböden. Problematisch diesbezüglich sind Veränderungen gekoppelter Eigenschaften wie der Erhöhung der Lagerungsdichte, Verminderung des Gesamt- bzw. Grobporenraumes, der gesättigten Wasserleitfähigkeit und des Gasdiffusionskoeffizienten im Ober- und Unterboden (Hildebrand, 1983; Whalley et al., 1995). Begleiterscheinungen sind Vernässung und Durchlüftungsprobleme, sowie eingeschränkte bzw. alternierende biologische Aktivität. All diese Faktoren und Prozesse können letztendlich zur Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit sowie der Bodenfunktionen führen. Laut der Schweizer Umweltschutzgesetzgebung ist dies das Problem, denn: „Dieses Gesetz soll Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche oder lästige Einwirkungen schützen sowie die natürlichen Lebensgrundlagen, insbesondere die biologische Vielfalt und die Fruchtbarkeit des Bodens, dauerhaft erhalten (USG: Art. 1).“ Dies führt zur Regelung vorbeugender Maßnahmen: „Wenn der Boden (Wald) bewirtschaftet wird, sind unter Berücksichtigung der Feuchtigkeit des Bodens Fahrzeuge, Maschinen und Geräte so auszuwählen und einzusetzen, dass Verdichtungen des Bodens vermieden werden, welche die Bodenfruchtbarkeit langfristig gefährden (VBBo: Art. 6).“

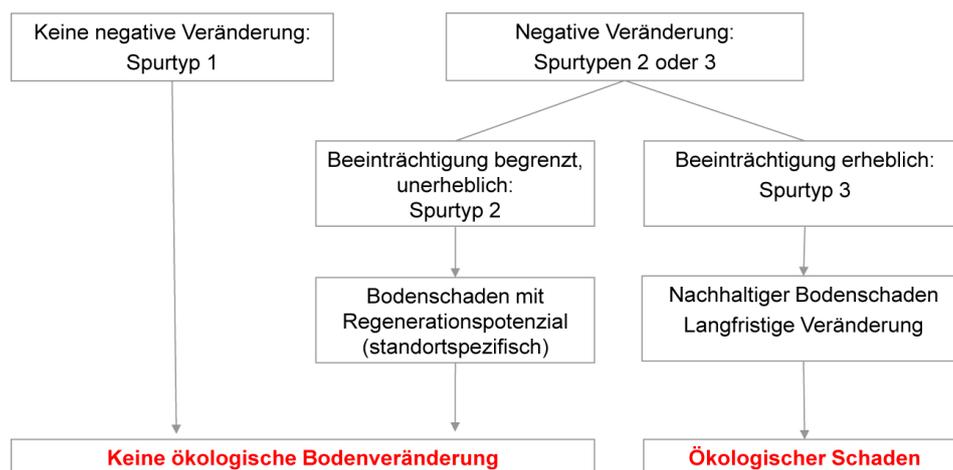


Abb.1: Bewertung einer ökologischen Bodenveränderung durch das Befahren von Waldböden, nach Thees and Lemm (2009)

Somit ist die erste Herausforderung an die Waldwirtschaft die Vermeidung der Bodenschadverdichtung durch sorgfältige Planung eines systematischen Rückegassensystems (unter Berücksichtigung der Verdichtungsempfindlichkeit) und die

Einhaltung bestimmter „Fahrstandards“ (z.B. Befahrung nur bei geeigneten Bodenbedingungen, Anpassen der Reifeninnendrucke, etc.). Die Schwierigkeit bei der Umsetzung dieser Richtlinien ist jedoch die Definition und das Erkennen eines ökologischen Schadens (Abb. 1). Nicht jede Fahrspur ist gleichbedeutend mit einem Bodenschaden, der sich negativ auf das Bestandeswachstum auswirkt (Thees and Lemm, 2009). Ein schwerwiegender Schaden im ökologischen Sinn liegt erst vor, wenn der Unterboden betroffen ist. Veränderungen im Unterboden sind jedoch nicht direkt sichtbar und können nur durch indirekte Merkmale bestimmt werden. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen des WSL-Projekts "Physikalischer Bodenschutz im Wald" eine Fahrspurtypisierung als Kommunikationsmittel für die Praxis erarbeitet, mit welcher Verdichtungsschäden schnell optisch beurteilt und eingestuft werden können.

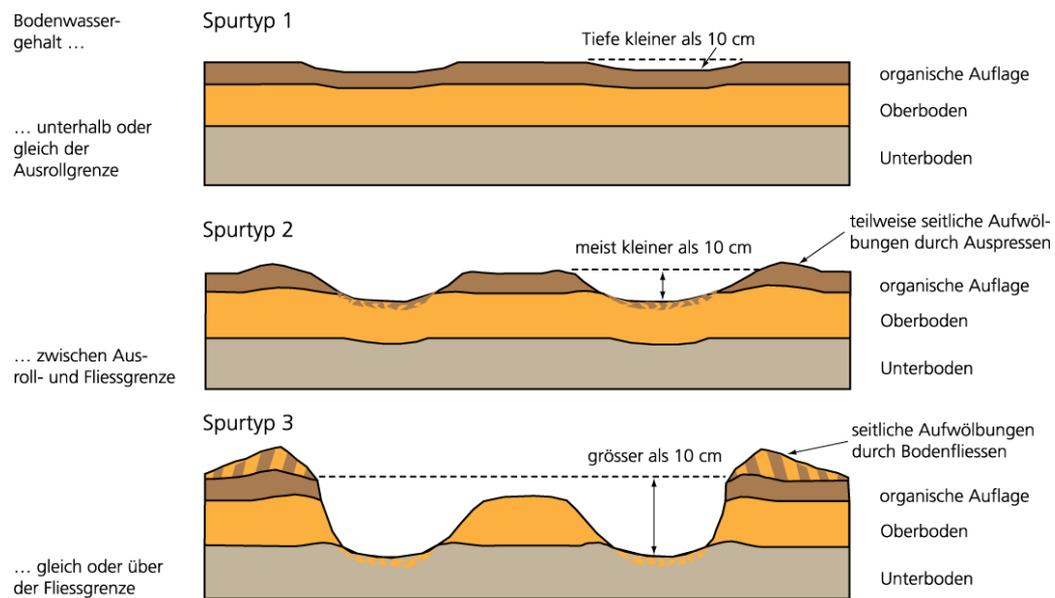


Abb. 2: Fahrspurtypisierung nach Lüscher et al. (2009)

Beim Fahrspurtyp 1 (Abb. 2) ist die organische Auflage nur wenig tief eingedrückt. Der Fahrspurtyp 2 weist stärkere Vertiefungen im Oberboden auf, die bis zu 10 cm tief reichen können. Teilweise entstehen durch weggedrücktes, organisches Material bereits seitliche Aufwölbungen an den Fahrspurrändern. Beim Fahrspurtyp 3 hingegen sind die Fahrspuren deutlich tiefer als bei dem Typ 2 und die seitlichen Aufwölbungen sind stark ausgeprägt. Das entscheidende Merkmal des Fahrspurtyps 3 ist, dass die Fahrspursole bis in den Unterboden reicht und in den seitlichen Aufwölbungen Humusaufgabe, Ober- und Unterboden durchmischt werden (Abb. 2). Während die Fahrspurtypen 1 und 2 eine leichte bis mittlere Beeinträchtigung des Bodens darstellen ist der Fahrspurtyp 3 als ökologischer Schaden einzustufen und somit seine Entstehung möglichst zu vermeiden.

Andererseits stellt sich die Frage, was ist zu tun wenn der Schaden bereits vorhanden ist, z.B. nach Sturmereignissen, nach denen die Holzernte häufig unkoordiniert und unter ungünstigen Bedingungen erfolgt und oft sogar flächige Schäden hinterlässt? Die Strukturregeneration eines verdichteten Bodens ist von mehreren Faktoren abhängig: dem Störungsgrad (Spurtyp), Bodenaufbau (Bodentyp und Humusform), Aktivität des Edaphons und den klimatischen Voraussetzungen. Die natürliche Strukturregeneration eines Bodens erfolgt durch Quellungs- und Schrumpfungsprozesse bei Austrocknung und Wiederbefeuchtung oder Eislinsenbildung sowie Bioturbation (Dexter, 1991). Da diese Vorgänge jedoch sehr langwierig und vor allem im Oberboden wirksam sind (Håkansson and

Reeder, 1994), kann die komplette Regeneration eines verdichteten Bodens mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen (Dickerson, 1976; von Wilpert and Schäffer, 2006). Da im Wald technische Maßnahmen zur Beschleunigung dieses Prozesses einerseits gesetzlich eingeschränkt, kostspielig und von zweifelhafter Wirksamkeit sind (Gaertig et al., 2000; Sinnott et al., 2008), werden weitere Möglichkeiten gesucht.

Seit dem Jahr 2000 erforscht die WSL die Folgen von Bodenschäden durch mechanische Belastung auf mehreren, durch den Sturm Lothar (1999) betroffenen Reservatsflächen im Schweizer Mittelland. Die Befahrung dieser Flächen bei den Räumungsarbeiten erfolgte Anfang 2000, ohne systematische Planung oder Berücksichtigung der Bodeneigenschaften und führte zu unterschiedlich stark ausgeprägten Fahrspuren und Bodenschäden. In Habsburg (AG), Messen (SO) und Brüttelen (BE) wurden 2003 Fahrspuren mit den stärksten Bodenschäden (Typ 2 und 3, Lüscher et al. (2009)) und eine unbefahrene Referenzfläche mit Schwarzerlen (*Alnus glutinosa*) bepflanzt (EOK und EREF). Zusätzlich wurden einige Fahrspuren vor der Bepflanzung mit Kompost aufgefüllt (EMK) und andere zur Kontrolle unbehandelt gelassen (FS) (Lüscher et al. (2008)). Nach 6 Jahren wurde 2009 die Untersuchung der Flächen am Standort Habsburg begonnen und 2010 in Messen fortgeführt. Um ein möglichst umfassendes Bild der ablaufenden Prozesse zu gewinnen, entschlossen wir uns für einen möglichst breit gefächerten Versuchsansatz der verschiedene Aspekte des Regenerationsvorgangs beinhaltet. Untersucht wurden dementsprechend folgende Aspekte:

- Biologie: Ist die Schwarzerle in der Lage den Extremstandort Fahrspur zu besiedeln? Kann die Schwarzerle den Wurzelraum wieder erschliessen? Gibt es in der Wurzelmorphologie Hinweise auf die Wachstumsbedingungen und somit auf die Bodeneigenschaften (Anpassung an Sauerstoffmangel)?
- Bodenstruktur (Rasteraufnahmen): Kann die Durchwurzelung mit der Veränderung der Bodenstruktur in Zusammenhang gebracht werden? Inwiefern nehmen Wurzeln Einfluss auf die Vernässungssituation? Können Wurzeln den verdichteten Boden „aufschliessen“ und die Gefügestruktur verbessern?
- Bodenphysik: Kann durch die Bestimmung von physikalischen Parametern, die auch als Kennwerte für den Bodenzustand genutzt werden, eine Verbesserung der Situation durch die Bepflanzung nachgewiesen werden?

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen am Standort Messen vorgestellt.

2. Material und Methoden

Die Versuchsanordnung besteht aus je drei Flächen mit Fahrspuren (Typ 3) welche in EMK und EOK unterteilt sind, sowie einer unbefahrenen und bepflanzt Referenzfläche (EREF). Pro Behandlung und Fläche wurden jeweils 10 Bäume gepflanzt (Abb. 3). Die Kontrolle (FS) wurde jeweils in den unbepflanzten Teilen der Fahrspuren untersucht. Aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes wurden pro Behandlung 5 Bäume bzw. Profile (FS) beprobt.

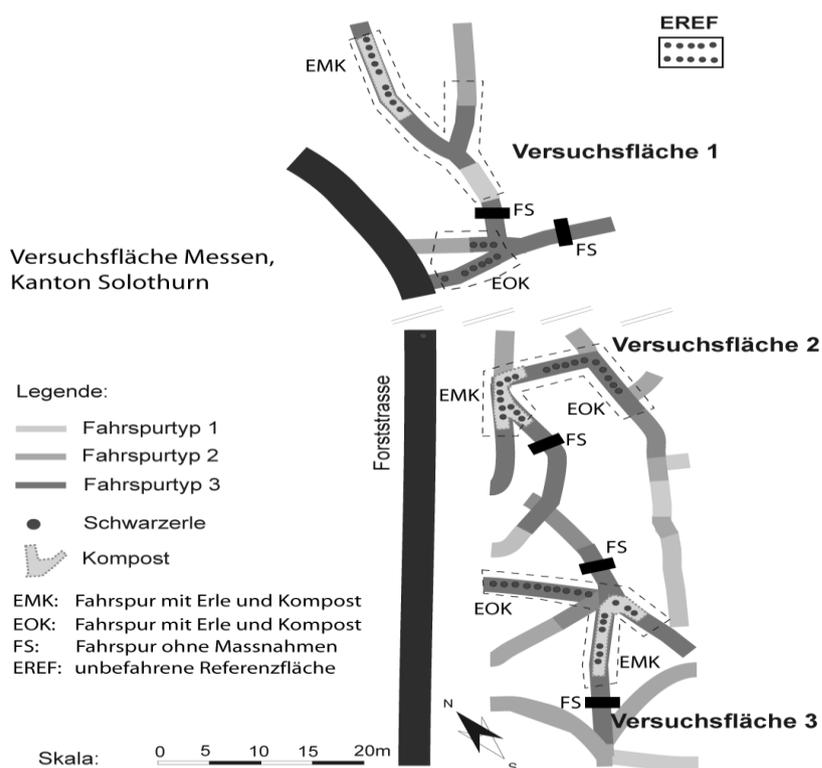


Abb.3: Plan der Versuchsfläche Messen



Abb. 4: Versuchsflächen mit Bepflanzung 2003 / 2007 (Fotos: Roger Köchli und Mirjam Halter)

Neben den ausgewählten Bäumen wurden Bodenprofile (80 cm tief, 150 cm breit) in 60, 40 und 20 cm Entfernung zur Stammbasis sowie direkt an der Stammbasis (0 cm) in mehreren Schritten quer über die Fahrspur verlaufend ausgehoben (Abb. 5:). In den einzeln ausgehoben Bodenschichten (Abb. 6) wurden die Erlenwurzeln eingesammelt und im Labor gewaschen, getrocknet und gewogen. Von jeder Profilwand wurden im 5x5 cm Raster Profilaufnahmen (Trench Wall Methode nach Böhm (1979) und Smit (2000)) erstellt, in denen die Anzahl der Grob- und Feinwurzeln, sowie Vernässungsmerkmale und die Gefügestruktur aufgenommen wurden.

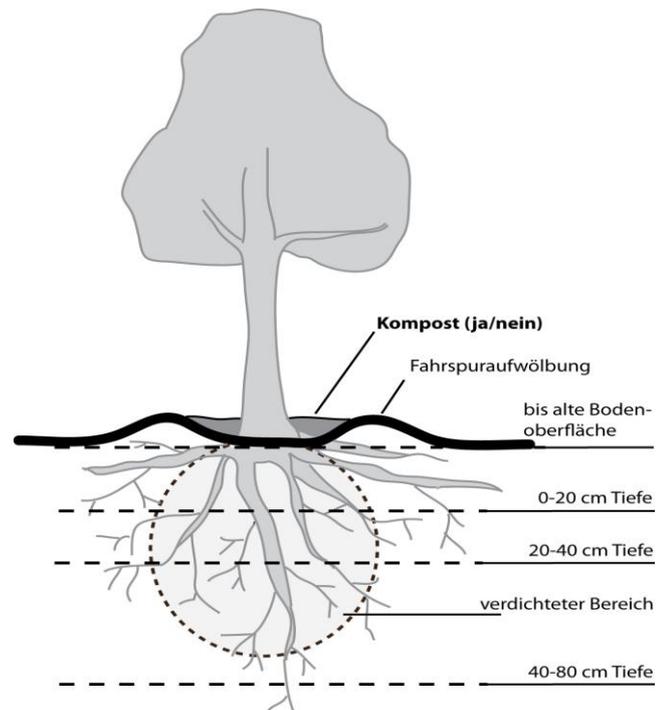


Abb. 5: Bodenprofil in der Fahrspur mit Schwarzerle (Frontansicht)

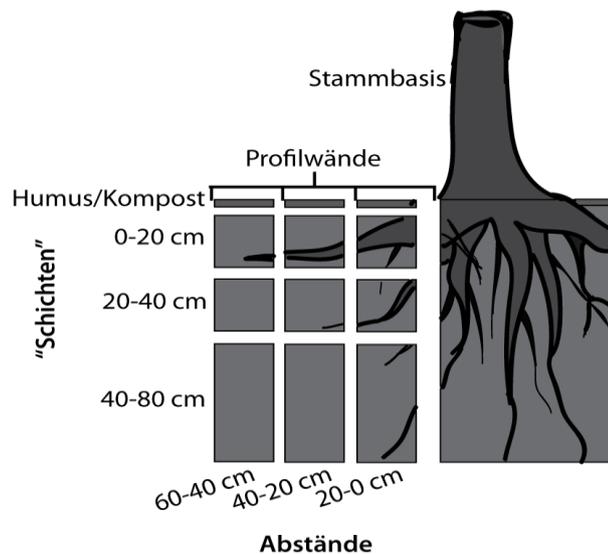


Abb. 6: Beprobungsschema für die Behandlungen mit Schwarzerle (Seitenansicht)

Für die Analysen des Porenraumes, der Lagerungsdichte, Luftleitfähigkeit und Vorverdichtung wurden zwischen 0 cm und 20 cm Abstand zur Stammbasis pro Baum und Tiefe je drei ungestörte Bodenproben, mit Burger-Zylindern (1 dm^3) entnommen. Im Labor wurden die Proben im Wasserbad aufgesättigt und anschließend mit einer hängenden Wassersäule auf Feldkapazität (-6 kPa) drainiert. Die erhaltene Gewichts­differenz wurde als das Grobporenvolumen interpretiert. Danach erfolgten zuerst die Messung der Luftleitfähigkeit und dann die Bestimmung der Vorverdichtung. Zur Messung der Luftleitfähigkeit wurde die von Berli (2001) beschriebene Unterdruckmethode verwendet. Die Vorverdichtung wurde nach dem geometrischen Verfahren von Casagrande (1936) aus Drucksetzungskurven abgeleitet, welche mittels Oedometern (Wille Geotechnik GmbH, Göttingen) aus uniaxialen Kompressionstests erhalten wurden. Im Anschluss an die Oedometer­tests wurden die Proben getrocknet, um die Lagerungsdichte zu bestimmen und

das Fein- bis Mittelporenvolumen zu berechnen. Nach der Trocknung wurden die Proben gesiebt und Skelett sowie Wurzeln aussortiert und separat eingewogen. Der Skelettgehalt wurde um die standörtliche Heterogenität zu minimieren in die Lagerungsdichte und Porenvolumina einberechnet (Schäffer et al., 2007).

3. Ergebnisse

Biologische Parameter:

Die Schwarzerlen auf den Fahrspuren mit und ohne Kompost waren in der Lage den verdichteten Boden bis in eine Tiefe über 0.8 m zu durchwurzeln (Abb. 7). Die Biomasse war in allen Behandlungen direkt an der Stammbasis und zwischen 0-0.2 m am größten. Die Schwarzerlen auf der Fahrspur mit Kompost (EMK) bildeten in allen Abständen und Tiefen die größte Biomasse aus, gefolgt von den Schwarzerlen ohne Kompost (EOK). Auf der unbefahrenen Referenzfläche (EREF) war das Baum- (nicht abgebildet) und Wurzelwachstum signifikant kleiner als in den Fahrspuren (EMK / EOK).

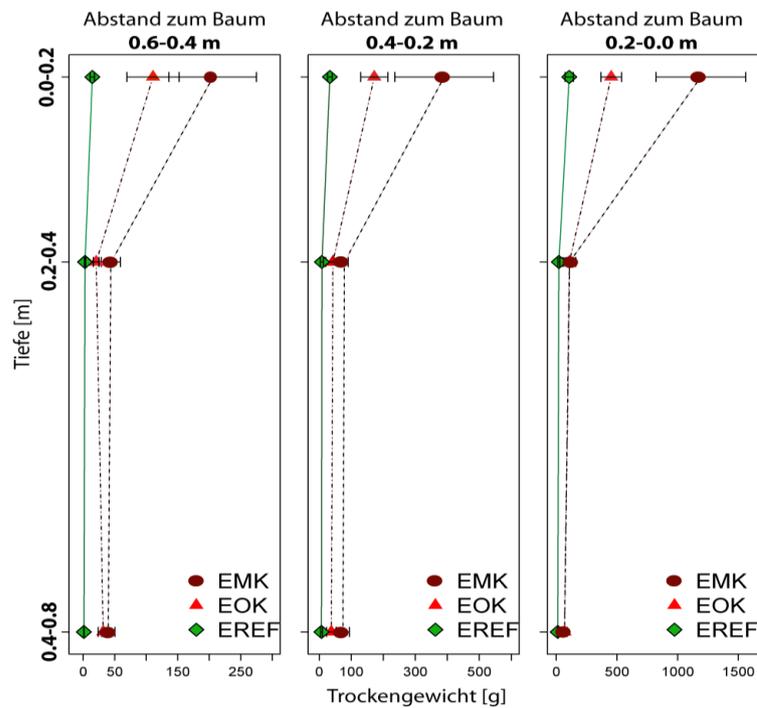


Abb. 7: Trockengewichte der Grobwurzeln der Schwarzerlen in den verschiedenen Behandlungen

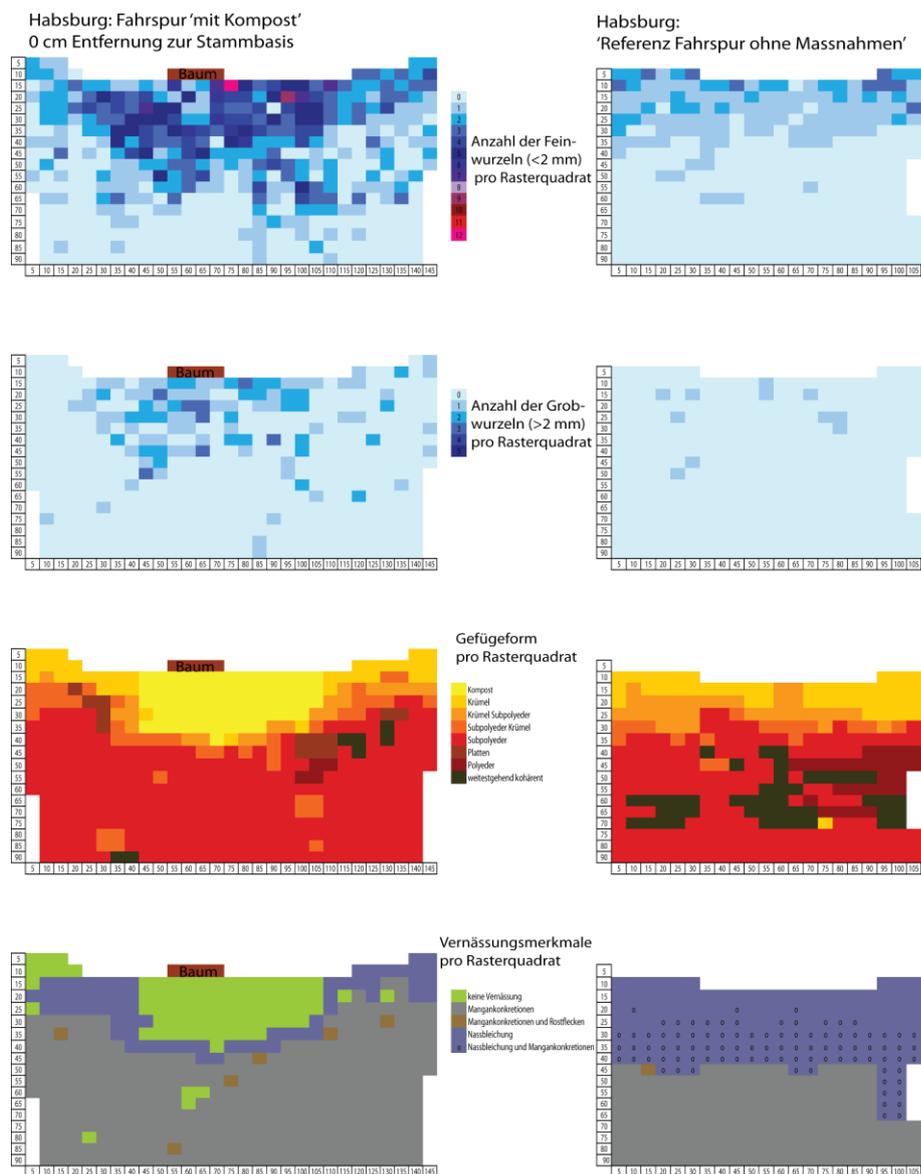


Abb. 8: Beispiel für die Rasteraufnahmen am Standort Habsburg

Bodenstruktur (Rasteraufnahmen):

Die Abbildung 8 (Abb. 8) zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen den Profilaufnahmen (0 cm von der Stammbasis) einer mit Schwarzerlen bepflanzten und mit Kompost aufgefüllten Fahrspur (EMK) und einer Fahrspur ohne Maßnahmen (FS). Auf die Darstellung der entsprechenden Profildaten für die bepflanzte Fahrspur ohne Kompost (EOK) wurde verzichtet, da sich ähnliche Muster zeigten, wie in der Fahrspur mit Kompost. Die Rasterdaten werden im Moment noch mit statistischen Methoden ausgewertet, daher wird an dieser Stelle lediglich eine Kurzzusammenfassung der Ergebnisse gegeben, welche die beobachteten Tendenzen im Feld widerspiegelt. Die Profilaufnahmen zeigen, dass den Erlen die Wiedererschließung des Wurzelraums durch Grob- und Feinwurzeln gelang, in den Fahrspuren bis in Tiefen von 90 cm und mehr. In der unbehandelten Fahrspur hingegen war die Durchwurzelung wesentlich spärlicher und reichte nur bis zu maximal 60 cm Tiefe, obwohl neben der Fahrspur eine Naturverjüngung mit Buchen und anderen Gehölzen stattgefunden hat. Die Analyse von Vernässungsmerkmalen sowie der Gefügeform bestätigte einen positiven Einfluss der Bepflanzung auf die Bodenstruktur. In der Fahrspur ohne Bepflanzung fanden sich stärkere Vernässungsmerkmale und grössere Anteile

verdichteten Gefüges (kohärente und plattige Struktur) als in den mit Erlen bepflanzten Fahrspuren.

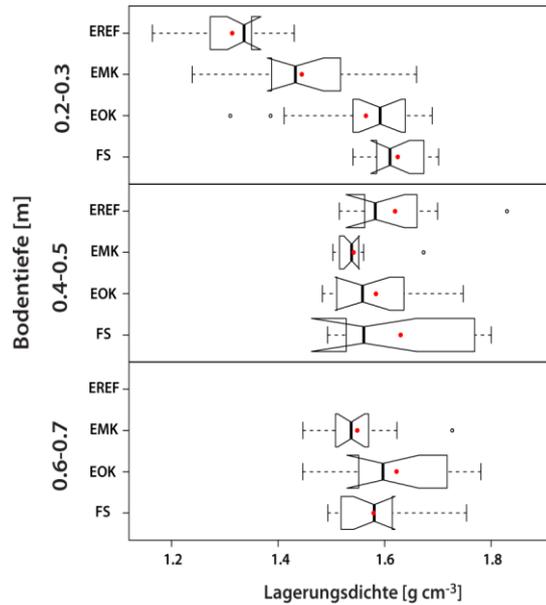


Abb. 9: Boxplots der Lagerungsdichte in den verschiedenen Behandlungen und Tiefen, der rote Punkt markiert den Mittelwert

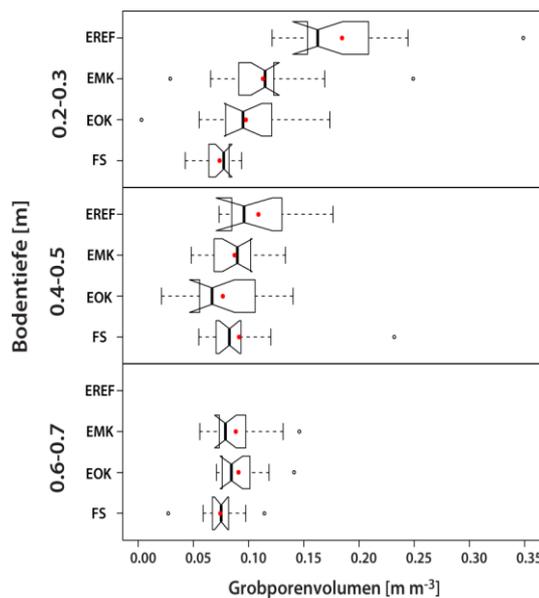


Abb. 10: Grobporenvolumen in den verschiedenen Behandlungen und Tiefen, der rote Punkt markiert den Mittelwert

Bodenphysikalische Parameter:

Die Lagerungsdichte (Abb. 9) zwischen 0.2 und 0.3 m konnte in den Fahrspuren mit Bepflanzung im Vergleich zu 2003 (1.7 g cm³) und der Fahrspur ohne Massnahmen deutlich verringert werden (Abb. 9). Vor allem in der Behandlung mit Kompost (EMK) war die Lagerungsdichte im Vergleich zu FS signifikant geringer. In den Tiefen von 0.4-0.5 m und 0.6-0.7 m fielen die Unterschiede zwischen den Behandlungen deutlich kleiner aus, zeigten jedoch dieselbe Tendenz. Auf der unbefahrenen Referenzfläche (EREF) wurden zwischen 0.4-0.5 m hohe Werte der Lagerungsdichte gemessen, was sich durch das Vorkommen von Sandstein ab 0.4 m begründet, aus diesem Grund konnten keine Bodenproben zwischen 0.6-0.7 m entnommen werden.

Dieses Muster spiegelte sich auch im Grobporenanteil (Abb. 10) wieder. Im Vergleich zu 2003 (0.021 m m^{-3}) war der Grobporenanteil in 20-30 cm Tiefe in der Fahrspur ohne Massnahmen fast verdreifacht, während sich der Anteil bei den Erlen ohne Kompost vervierfachte und bei den Erlen mit Kompost verfünffachte. Auch hier unterschied sich das in EMK gemessene Grobporenvolumen signifikant von demjenigen in FS. Zwischen 0.4 und 0.5 m und darunter fielen die Unterschiede zwischen den Behandlungen wieder geringer aus und es konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

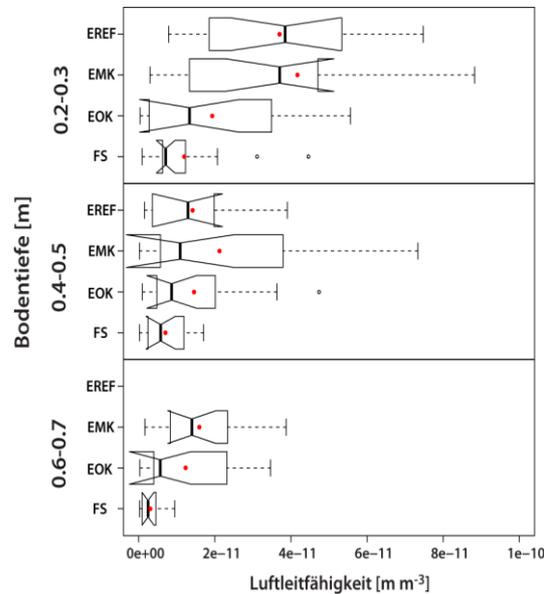


Abb. 11: Luftleitfähigkeit in den verschiedenen Behandlungen und Tiefen, der rote Punkt markiert den Mittelwert

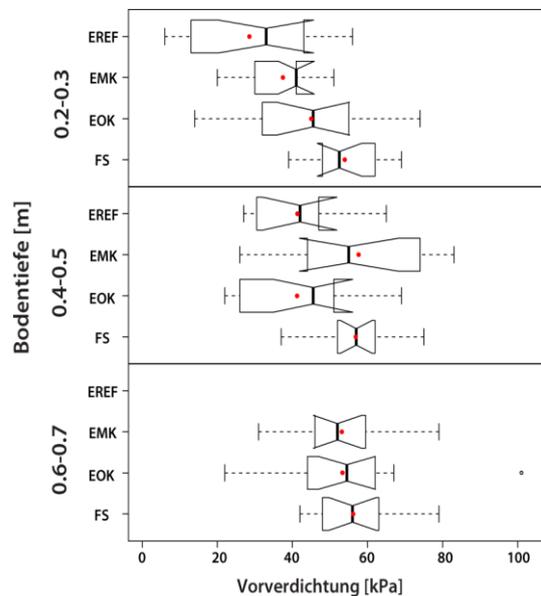


Abb. 12: Vorverdichtung in den verschiedenen Behandlungen und Tiefen, der rote Punkt markiert den Mittelwert

Als Maß für die Durchlüftung des Bodens dienten Messungen der Luftleitfähigkeit (Abb. 11). Deren Werte waren zwischen 0.2 und 0.3 m Tiefe in der unbefahrenen Referenzfläche deutlich höher als in den Fahrspuren. In den Fahrspuren mit Erlen und Kompost wurde bereits das Niveau der unbefahrenen Referenz erreicht, während in der Fahrspur ohne Kompost die Luftleitfähigkeiten geringer ausfielen. Die Fahrspur ohne Massnahmen zeigte die kleinsten Werte und unterschied sich signifikant von EMK. Zwischen 0.4 und 0.5 m Tiefe

war derselbe Trend zu erkennen. Die im Vergleich zu anderen Parametern besonders grosse Empfindlichkeit der Luft-leitfähigkeit auf Bodenverdichtung wurde in der Tiefe von 0.6-0.7 m deutlich. Sie war besonders bei EMK deutlich grösser als in den Fahrspuren ohne Massnahme, obwohl bei den anderen aufgenommenen Parametern in dieser Tiefe keine Unterschiede gefunden wurden.

- ▲ Die Vorverdichtung (Abb. 12) war in 0.2-0.3 m Tiefe in den bepflanzten Fahrspuren niedriger als in den Fahrspuren ohne Massnahmen Die Referenzfläche (EREF) wies, wie erwartet, die niedrigsten Werte auf. In 0.4-0.5 m Tiefe unterschied sich die Vorverdichtung in den bepflanzten Fahrspuren mit Kompost (EMK) nicht von den unbehandelten Fahrspuren (FS), während sie in den bepflanzten Fahrspuren ohne Kompost (EOK) ähnliche Werte aufwies wie die unbefahrenen Referenzflächen. In der Tiefe zwischen 0.6 und 0.7 m konnten erneut keine Unterschiede zwischen den Werten festgestellt werden.

4. Diskussion

Wie die Wurzelgewichte und Rasteraufnahmen zeigten waren die Schwarzerlen in der Lage den Wurzelraum unter den Fahrspuren komplett zu erschließen. Die erfolgreiche Wiedererschliessung des Wurzelraums und das gute Baumwachstum beruhen zum Großteil auf der Adaption der Schwarzerle an nasse, sauerstoffarme Standorte, wie z.B. Flussauen. Die Schwarzerle verfügt über mehrere effektive Mechanismen um sich auch kurzfristig an Staunässe und Sauerstoffmangel anzupassen. Ein Adaptionmerkmal ist die Ausbildung von erhöhten Interzellularvolumina in den Wurzeln, verknüpft mit einer verstärkten Lenticellenbildung. Durch dieses System kann bei Bedarf Sauerstoff in den Wurzelbereich transportiert (Dittert et al., 2006) werden. Zudem kann die Schwarzerle spontan Adventivwurzeln bilden (Gill, 1975) und betreibt Stammphotosynthese (Armstrong and Armstrong, 2005), was die Konkurrenzfähigkeit dieser Baumart an Extremstandorten erhöht. Darüber hinaus verleiht die Symbiose mit dem *Frankia* Bakterium und die Ausbildung von Luftstickstoff-fixierenden Wurzelknöllchen der Schwarzerle einen weiteren Standortvorteil (Claessens et al., 2010). Die Schwarzerle ist aufgrund ihrer Eigenschaften als Pionierbaumart also prädestiniert für die Bepflanzung verdichteter Fahrspuren.

Die bodenphysikalischen Messungen zeigten, dass die Bepflanzung der Fahrspuren mit Erlen die strukturelle Regeneration des verdichteten Bodens im Bereich von 0.2-0.3 m Bodentiefe deutlich förderte, wobei der Kompost in diesem Beispiel eine positive Wirkung durch mehr Wurzelbildung erzielte. Wie auch von anderen Autoren beobachtet wurde (Dexter, 1991; Helal, 1991), ist die Durchwurzelung von verdichtetem Boden Teil der biologischen Regenerationsprozesse, die zu einer Verbesserung der bodenphysikalischen Eigenschaften führen. Die Wurzeln durchbrechen die verdichteten Bereiche und schaffen Makroporen (Angers and Caron, 1998; Jakobsen and Dexter, 1988). Dadurch wird der Gas- und Wassertransport (Beven and Germann, 1982) gefördert, was wiederum zu einer Förderung der Bodenfauna und -flora führt (Dexter, 1991). Der höhere Grobporenanteil sowie die größeren Luftleitfähigkeitswerte in den Behandlungen mit Bäumen in unserer Untersuchung decken sich mit diesen Theorien. Das Absterben von alten Wurzeln und das Austreiben neuer Wurzelspitzen unterstützen diesen Vorgang, indem bestehende Transportwege freigegeben und neue gebildet werden. Eine offene Frage bleibt die Absterberate der Wurzeln, welche auch schon von Helal (1991) als ein regulierender Faktor der Regeneration identifiziert wurde. Aufgrund der Beobachtungen während unserer Feldarbeiten gehen wir jedoch von einer relativ hohen Absterbe- bzw. Neubildungsrate der Wurzeln bei der Erle aus. Nicht nur durch das Aufbrechen kohärenter Bodenstrukturen während des Wurzelwachstums, sondern auch durch das Ausscheiden von Wurzelexsudaten sind Pflanzen maßgeblich an der Aggregatbildung im Boden beteiligt

(Angers and Caron, 1998), was sich mit den Beobachtungen zur Gefügeform in den Rasteraufnahmen in Zusammenhang bringen lässt. Die bei den Rasteraufnahmen festgestellte Reduktion der Vernässungsmerkmale ist u.a. durch die Wasseraufnahme der Pflanzen und die verstärkte Bioturbation erklärbar.

Die natürliche Regeneration ist bekannter Maßen besonders effektiv im Bereich des Oberbodens, da sich hier Faktoren wie Bodenfrost und Durchwurzelung besonders stark auswirken (Håkansson and Reeder, 1994). Wobei Studien wie diejenige von Labelle and Jaeger (2011), welche kanadische Podsole bis zu 5 Jahren nach Befahrung mit schweren Forstmaschinen untersuchte und keinerlei Erholung der Lagerungsdichte im Oberboden feststellen konnte, die Effektivität oben genannter Prozesse in Frage stellen. In unserem Versuch hat die tiefreichende Durchwurzelung des verdichteten Bodens durch die Erlen deutliche regenerative Effekte auch im Grenzbereich zum Unterboden erzielt, wobei der Bereich bis zu 0.3 m Tiefe die größten Fortschritte zeigte. In 0.4 m Tiefe und darunter waren die regenerativen Effekte, korrelierend mit der geringeren Durchwurzelung, nur marginal vorhanden. Bisherige Studien gehen je nach standörtlichen Bedingungen und Grad der Verdichtung von einer Regenerationsdauer bis zu mehreren Dekaden aus (Dickerson, 1976; von Wilpert and Schäffer, 2006). In unserem Versuch zeigte sich bereits nach 7 Jahren eine Annäherung der Lagerungsdichte und anderer Parameter in den bepflanzten Fahrspuren an die unbefahrene Referenz. Die Angaben zur Dauer der Regenerationsphase sind aber nur schwer vergleichbar, da in den verschiedenen Studien unterschiedliche Böden untersucht wurden und unterschiedliche Parameter zur Beurteilung des Bodenzustandes herangezogen wurden. Unsere bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Regenerationsprozesse durch Bepflanzung mit *Alnus glutinosa* auf jeden Fall beschleunigt werden können.

An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass trotz der positiven Effekte durch Bepflanzung mit Schwarzerlen das Problem der Bodenverdichtung keineswegs gelöst ist, denn der Nutzung der Schwarzerle sind Grenzen gesetzt. Der hohe Licht- und Wasserbedarf der Schwarzerle limitiert das Wachstum an trockenen und schattigen Standorten.

Weitere praktische Überlegungen:

- Auf offenen Flächen ist die Schwarzerle eine geeignete Baumart für Regenerationsmaßnahmen. In geschlossenen Wäldern müssten aufgrund des hohen Lichtbedarfs der Erle andere Baumarten, wie z.B. der Faulbaum, zum Einsatz kommen.
- Wenn bei der systematischen Planung der Feinerschliessung vorhandene Rückegassen mit Fahrspurtyp 3 nicht mehr benötigt werden, lässt sich durch gezielte Erlenbepflanzung die Bodenfruchtbarkeit punktuell wieder herstellen.
- Die Bepflanzung mit Schwarzerlen könnte auch als eine Armierung des Bodens für eine erneute Befahrung dienen.
- Zusätzlich könnte die Schwarzerle durch ihren Stockausschlag nach einer erneuten Befahrung auch als Markierung von Rückegassen dienen.

5.Literaturverzeichnis

- Angers, D.A., Caron, J.,** 1998. Plant-Induced Changes in Soil Structure: Processes and Feedbacks. Biogeochemistry 42, 55-72.
- Armstrong, W., Armstrong, J.,** 2005. Stem photosynthesis not pressurized ventilation is responsible for light-enhanced oxygen supply to submerged roots of alder (*Alnus glutinosa*). Ann. Bot. 96, 591-612.
- Berli, M.,** 2001. Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery. e-collection, ETH Institutional Repository.
- Beven, K., Germann, P.,** 1982. Macropores and Water Flow in Soils. Water Resour. Res. 18, 1311-1325.
- Böhm, W.,** 1979. Methods of Studying Root Systems Springer, Berlin Heidelberg New York.

- Casagrande, A.**, 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: Proceedings of the International Conference on Soil Mech. and Found. Eng. (ICSMFE), Cambridge, MA, 22–26 June 1936, vol. 3. Harvard University, Cambridge, MA, USA, pp. 60–64.
- Claessens, H., Oosterbaan, A., Savill, P., Rondeux, J.**, 2010. A review of the characteristics of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and their implications for silvicultural practices. *Forestry* 83, 163-175.
- Dexter, A.R.**, 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil Tillage Res.* 20, 87-100.
- Dickerson, B.P.**, 1976. Soil compaction after tree-length skidding in Northern Mississippi. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 965-966.
- Dittert, K., Wötzel, J., Sattelmacher, B.**, 2006. Responses of *Alnus glutinosa* to anaerobic conditions - Mechanisms and rate of oxygen flux into the roots. *Plant Biology* 8, 212-223.
- Gaertig, T., Hildebrand, E.E., Schäffer, J., Von Wilpert, K.**, 2000. Wirkung mechanischer Bodenlockerung auf Bodenbelüftung und Durchwurzelung. *AFZ/Der Wald* 21, 1124-1126.
- Gill, C.J.**, 1975. Ecological significance of adventitious rooting as a response to flooding in woody species, with special reference to *Alnus glutinosa* (L) Gaertn. *Flora* 164, 85-97.
- Håkansson, I., Reeder, R.C.**, 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load--extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res.* 29, 277-304.
- Helal, M.**, 1991. Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung Bodenkunde* 154, 403-407.
- Hildebrand, E.E.**, 1983. The influence of soil compaction on soil functions on forest sites. *Forstwiss. Cent.bl.* 102, 111-125.
- Jakobsen, B.E., Dexter, A.R.**, 1988. Influence of biopores on root growth, water uptake and grain yield of wheat (*Triticum aestivum*) based on predictions from a computer model. *Biol Fert Soils* 6, 315-321.
- Labelle, E.R., Jaeger, D.**, 2011. Soil Compaction Caused by Cut-to-Length Forest Operations and Possible Short-Term Natural Rehabilitation of Soil Density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 2314-2329.
- Lüscher, P., Frutig, F., Sciacca, S., Spjevak, S., Thees, O.**, 2009. Physikalischer Bodenschutz im Wald : Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen Birmensdorf : Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Lüscher, P., Sciacca, S., Halter, M.**, 2008. Regeneration von Wurzelraumfunktionen nach mechanischer Belastung. In *Fahrspuren gepflanzte Erlen fördern die Regeneration in verdichteten Böden.* LWF aktuell 15, 11-12.
- Schäffer, B., Attinger, W., Schulin, R.**, 2007. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery-Soil physical and mechanical aspects. *Soil Tillage Res.* 93, 28-43.
- Sinnett, D., Poole, J., Hutchings, T.R.**, 2008. A comparison of cultivation techniques for successful tree establishment on compacted soil. *Forestry* 81, 663-679.
- Smit, A.L.**, 2000. *Root methods: a handbook.* Springer, Berlin.
- Thees, O., Lemm, R.**, 2009. *Management zukunftsfähige Waldnutzung : Grundlagen, Methoden und Instrumente.* Zürich : vdf Hochschulverlag, Zürich.
- von Wilpert, K., Schäffer, J.**, 2006. Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *Eur. J. For. Res.* 125, 129-138.
- Whalley, W.R., Dumitru, E., Dexter, A.R.**, 1995. Biological effects of soil compaction. *Soil Tillage Res.* 35, 53-68.

Zur Person:

Christine Meyer

Doktorandin an der eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Forschungseinheit Waldböden und Biogeochemie

Peter Lüscher

Senior Consultant an der eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Forschungseinheit Waldböden und Biogeochemie

Rainer Schulin

Professor am Institut für Terrestrische Ökosysteme an der ETH Zürich, Gruppe Bodenschutz

Umgang mit Bodenverdichtungen bei der Wiederherstellung von Lössböden im rheinischen Braunkohlenrevier

Gerhard Dumbeck

1. Einleitung

Im rheinischen Braunkohlenrevier werden nach dem Abbau der Braunkohle pro Jahr mehrere hundert Hektar Fläche land- und forstwirtschaftlich rekultiviert. Der bisherige Rekultivierungsumfang beläuft sich in der Forstwirtschaft auf ca. 8.000 ha sowie ca. 11.800 ha in der Landwirtschaft. Während es sich bei den Böden forstwirtschaftlich genutzter Gebiete überwiegend um Pseudogleye und Parabraunerde-Pseudogleye handelt, dominieren in den landwirtschaftlich genutzten Gebieten die Parabraunerden aus Löss.

Der in den letzten zweieinhalb Jahrzehnten vollzogene Wandel in der Rekultivierung der Böden umfasst sowohl verfahrenstechnische als auch bodenkundliche Aspekte (Dumbeck, 2009). Bei der Herstellung der Böden richtet sich besonderes Augenmerk auf den Planiervorgang und die -geräte, da Dichtlagerungen im Boden wichtige Funktionen negativ beeinträchtigen. Während im Bereich der Forstwirtschaft gänzlich auf das exakte Einebnen der Bodenoberfläche verzichtet wird, ist es auf landwirtschaftlichen Nutzflächen unabdingbar, diesen Rekultivierungsvorgang durchzuführen.

Neben den einschlägigen Gesetzen und Verordnungen (BBergG, BBodSchG, BBodSchV), deren materielle Anforderungen bei der Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht zu berücksichtigen sind, existieren seit mehreren Jahrzehnten Rekultivierungsrichtlinien für die jeweils herzustellenden land- und forstwirtschaftlichen Flächen im rheinischen Braunkohlenrevier. In einer erst kürzlich überarbeiteten Fassung unter Federführung der Bezirksregierung Arnsberg, an der der GD-NRW, die LWK-NRW sowie RWE Power mitgearbeitet haben, wurden aktuelle Bodenschutzaspekte ebenso wie verfahrenstechnische Besonderheiten aufgenommen (Bezirksregierung Arnsberg 2012).

Hinsichtlich der Gewährleistungsvereinbarung (1990) und des Qualitätsmanagements gilt es zu prüfen, inwieweit Rekultivierungsmängel auf den Ackerflächen vorliegen und wie diese nachhaltig zu beseitigen sind. Dabei richtet sich das Interesse insbesondere auf etwaige Bodenverdichtungen, die das Pflanzenwachstum negativ beeinträchtigen. Verfahrensbedingt, und zwar in Abhängigkeit der eingesetzten Planiergeräte, treten diese Verdichtungen nicht nur im Oberboden sondern auch im Unterboden auf. Während sich die Verdichtungen in der Tiefe bis ca. 35 cm relativ unproblematisch durch eine entsprechende Bodenbearbeitung beseitigen lassen, erfordert die Unterbodenmelioration Spezialgeräte.

Neben der großflächigen Rekultivierung ausgekohlter Tagebaue finden in beträchtlichem Umfang Bodeneingriffe durch das Verlegen von Rohrleitungen zur Ableitung des Sumpfungswassers, aber auch zur Wassereinleitung in ökologisch bedeutsame Gebiete, statt. Die bodenkundliche Baubegleitung soll dazu beitragen, dass es nicht zu nachhaltigen Bodenschäden im Zuge der Baumaßnahmen kommt. Auch in diesem Fall wird der Verdichtungsproblematik eine besondere Bedeutung beigemessen.

2. Verfahrenstechnik der Rekultivierung und Vermeidungsstrategie von Schadverdichtungen

Massenbewegungen wie sie in Großtagebauen üblich sind, lassen sich mit der Schaufelradbagger-/ Absetzertechnologie bodenschonend bewerkstelligen. Im Gegensatz zum Massentransport mittels LKW/Dumper wird das kulturfähige Bodenmaterial auf der Rohkippe abgesetzt, ohne dass diese befahren werden muss. Klein- und Großgeräte stehen zur Auswahl mit einer Tagesleistung von ca. 12.000 bis 100.000 m³ pro Tag. Da die Ausleger der Absetzer in der Höhe verstellbar sind und zudem eine Schwenkbewegung ermöglichen,

ist es verfahrenstechnisch keine Herausforderung, das Bodenmaterial mit möglichst geringer Fallhöhe und zudem gleichmäßig verteilt abzusetzen. Nach einer ca. 3-monatigen Liegezeit sind die Anfangssetzungen im Bereich der Rohkippe und der kulturfähigen Schicht (2 m im gesetzten Zustand) soweit abgeklungen, dass nach Beendigung des Planierens das Oberflächenrelief weitgehend erhalten bleibt. Nur in seltenen Fällen muss zu einem späteren Zeitpunkt ein erneuter Planiervorgang zum Ausgleich der ungleichförmigen Setzbewegungen erfolgen.

Wie bereits erwähnt, besitzt das Planiergerät einen maßgeblichen Einfluss auf die spätere Dichtlagerung der Böden und somit auf die Rekultivierungsqualität (Lebert und Springob, 1994 a). Interne Untersuchungen haben gezeigt, dass Planiertrauben mit einem spezifischen Bodendruck von ca. 25 kPa und einer Gesamtmasse von ca. 20 t ein vergleichsweise schadloses Planieren zulassen (vgl. Übersicht 1).

Übersicht 1: Kenndaten unterschiedlicher Planiertraubentypen

Einsatzort / Raupentyp	Hersteller / Typ	Leistung [kW/PS]	Masse [t]	Plattenbreite [mm]	Aufstandsfläche [m ²]	Spez. Bodendruck [kPa]
Standardraupe	Komatsu DX65PX - 12	142/193	20,9	950	6,24	33,5
Garzweiler	Komatsu DX65PX - 12	142/193	19,5	1250	8,21	23,8
Inden	Caterpillar D5H LGP (mit Aufreißer)	102/139	15,3 (16,7)	860	5,52	27,7 (30,0)
	Caterpillar D6N LGP (mit Aufreißer)	104/142	18,8 (20,2)	860	5,31	35,4 (38,0)
Fortuna	Klasmann S	118/150	16,3	1400	9,5	17,1
Frechen	Komatsu D58P	110/150	18,0	1150	9,2	19,5

Das bedeutet, dass auf diesen Flächen – abgesehen von der Tiefe 0-30 cm – keine Unterbodenlockerung erforderlich ist, um Schadverdichtungen zu beseitigen. Um den spezifischen Bodendruck konventioneller Rauben mit Moorlaufwerken auf 25 kPa abzusinken, ist es erforderlich, Umbaumaßnahmen an den Rauben vorzunehmen. Neben der Verbreiterung der Platten (von 860 mm auf 1250 mm) zur Vergrößerung der Aufstandsflächen lässt sich auch der Werkstoff Stahl gegen Kunststoff ersetzen. Die dadurch erreichte Reduktion der Gesamtmasse kann bis zu 2 t betragen. Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass mit der Verbreiterung der Aufstandsflächen auch das Planierschild verbreitert werden muss, was zwangsläufig zu einer Zunahme der Gesamtmasse führt. Spezialraubenhersteller haben teilweise Rauben im Sortiment, die die oben genannten Grenzwerte unterschreiten. Grundsätzlich gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass die Planiertrauben auch über eine gewisse Traktion verfügen müssen, um den Massenausgleich vornehmen zu können. Zudem bleibt anzumerken, dass der Spannungseintrag in den Boden während des Planiervorgangs den statischen Bodendruck bei weitem übersteigt.

Neben den Kennwerten der Planiertraube besitzt der Wassergehalt des zu planierenden Materials einen entscheidenden Einfluss auf die Dichtlagerung des Bodens. Er sollte während des Planiervorganges im Bereich oder unterhalb der Ausrollgrenze liegen. Nicht

immer lässt sich in der Rekultivierungspraxis diese Forderung erfüllen, da oftmals die durch den Absetzer hergestellten Rippen eine Höhe von ca. 1,5 m aufweisen. Somit entspricht der Wassergehalt im Bereich der Planierebene selbst während der Sommermonate in etwa der Feldkapazität. Eine wirksame Wassergehaltsminderung des verkippten Materials lässt sich durch Begrünungsmaßnahmen erreichen (vgl. Abb. 1).



Abb. 1: Vorbegrünung verkippter Massen zur Verminderung des Wassgehalts

Kleinabsetzer hinterlassen Kippstrukturen, die max. Höhenunterschiede von ca. 30 cm aufweisen. Der geringere Materialversatz, die deutlich niedrigeren Wassergehalte im Bereich der Planierebene sowie der Einsatz von Spezialraupen hinterlassen im Ober- und Unterboden ein Gefüge, das durch eine sehr geringe Packungsdichte gekennzeichnet ist. In umfangreichen Untersuchungen an unterschiedlich alten Ackerstandorten, die mittels verschiedener Verfahrenstechnik hergestellt wurden, konnten bei vergleichbarem Bodenmaterial Dichteunterschiede zwischen $1,35 \text{ g/cm}^3$ und $1,82 \text{ g/cm}^3$ ermittelt werden. Dabei traten erwartungsgemäß die geringsten Bodendichten bei den mit dem Kleinabsetzer hergestellten Flächen auf (Gerschläuer, 2008). Die an diesen Proben ermittelten Vorbelastungen variieren zwischen 15 kPa und 295 kPa (Rücknagel et al., 2009).

Im Nachgang zur bergmännischen Herstellung der Flächen folgt die landwirtschaftliche Rekultivierung durch betriebseigene Höfe. Alle Folgemaßnahmen müssen der besonderen Verdichtungsgefährdung der Böden Rechnung tragen. Seit Jahrzehnten hat sich der 3-jährige Luzerneanbau bewährt, wobei der Luzerneaufwuchs als Mulchmaterial auf der Bodenoberfläche verbleiben sollte. Während des anschließenden 4-jährigen Marktfruchtanbaus dominiert in der Regel Getreide. Bodenbearbeitungsmaßnahmen werden bis zu einer max. Tiefe von 30 cm durchgeführt, wobei anzumerken bleibt, dass sie nicht immer wendend mit dem Pflug erfolgen müssen. Sofern der Pflug zum Einsatz gelangt, wird entweder im On-Land-Verfahren oder mit dem so genannten Räumschar gepflügt. Dabei ist sichergestellt, dass das Schlepperradpaar nicht in der tiefen Pflugfurche läuft. Schlepper sind mit Breibereifung ausgestattet, die Mähdrescher besitzen Bandlaufwerke. Somit wird der Forderung nach Bodenschonung während der 7-jährigen Zwischenbewirtschaftung weitgehend Rechnung getragen.

3. Erkennen von Bodenverdichtungen

3.1. Fernerkundung

Seit mehreren Jahrzehnten wird im rheinischen Braunkohlenrevier die Qualitätskontrolle der rekultivierten Ackerflächen mittels der Fernerkundung durchgeführt. Verpflichtungen aus der „Gewährleistungsvereinbarung für Neulandböden“ machen dies zusätzlich erforderlich. Dazu wird im zeitigen Frühjahr ein Befliegungstermin gewählt, der Abtrocknungsunterschiede zwischen ordnungsgemäßen und schadhafte Bereiche dokumentiert. Während durch Bodenverdichtungen bedingte Vernässungsstellen längere Zeit dunkel erscheinen zeichnen sich ordnungsgemäß rekultivierte Fläche infolge der zügigen Abtrocknung durch eine helle Bodenfarbe aus (Tenholtern et al., 1996), (vgl. Abb. 2).



Abb. 2: Abtrocknungsunterschiede und Verkippungsstrukturen 23.03.2011

Abb.3: Abreife- und Entwicklungsunterschiede bei den Kulturpflanzen 28.06.2011

Ein weiterer Befliegungstermin findet zum Zeitpunkt der Abreife der Winterweizenbestände statt. Sofern der Unterboden nicht oder nur eingeschränkt durchwurzelt werden kann, wird sich dies in einer deutlich zügigeren Abreife der Bestände bemerkbar machen. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass die sonstigen Randbedingungen (Alter der Fläche, Sortenwahl, Düngung, Pflanzenschutz, Bodenbearbeitung) vergleichbar sind (vgl. Abb. 3).

Eine zielgerichtete Qualitätsüberwachung lässt sich auch an anderen Kulturen wie beispielsweise der Zuckerrübe durchführen. Bis zum Zeitpunkt vor Eintritt der physiologischen Reife lassen sich oftmals deutliche Aufwuchsunterschiede durch unterschiedliche Blattverfärbungen abbilden. Neben den genannten Randbedingungen sind es insbesondere alle Einwirkungen wie Nematodenbesatz, Rübenkrankheiten, Blattkrankheiten, Nährstoffunterversorgung etc., die auf das Wachstum der Rüben einen Einfluss ausüben und die sich in den Fernerkundungsdaten widerspiegeln.

Bei den zur Verfügung gestellten Luftbildaufnahmen handelt es sich um georeferenzierte Daten, die beispielsweise für Prozesse der Meliorationsplanung eingesetzt werden können.

3.2. Terrestrische Methoden

Zur Feststellung von Bodenverdichtungen kann methodisch unterschiedlich vorgegangen werden. Punktuelle Messungen und Untersuchungsergebnisse müssen dabei aber stets auch auf eine größere Fläche übertragbar sein. Beispielsweise lassen sich Eindringwiderstandmessungen oder auch exakte physikalische Untersuchungen zur Lokalisierung von Bodenverdichtungen, zum Dichtlagerungsgrad und zum Tiefgang der Bodenverdichtungen durchführen. Zugwiderstandmessungen lassen bei relativ einheitlichem Bodenmaterial und Wassergehalt ebenfalls Rückschlüsse auf das Vorliegen von Verdichtungen zu.

Neben weiteren Untersuchungsmethoden hat sich jedoch die feldbodenkundliche Methode der Ansprache der Packungsdichte der Böden nach DIN 19682-10 (2007) bewährt. Die zusammenfassende Bewertung der Gefügeeigenschaften berücksichtigt den Zusammenhalt der Aggregate, die Lagerungsart der Aggregate, den Volumenanteil der Makroporen sowie die Wurzelverteilung. Die Gewichtung der Gefügemerkmale erfolgt unterschiedlich. Eine sehr hohe Bedeutung wird dabei der Wurzelverteilung im Profil beigemessen (Tenholtern et al., 1993; Harrach 2002). Mittels dieser Untersuchungsmethode lässt sich innerhalb kurzer Zeitspannen eine Vielzahl von Bodenprofilen hinsichtlich des Gefügezustands und damit auch des Dichtlagerungsgrads und des Tiefgangs der Bodenverdichtungen sicher ansprechen (vgl. Abb. 4 und Abb.5).



Abb.4: Extreme Dichtlagerung – Wurzeln im Kluftsystem (Pd 5)

Abb. 5: Optimales Bodengefüge (Pd 2)

Durch das Einmessen der untersuchten Bodenprofile sind die Untersuchungsergebnisse auf die Ebene der georeferenzierten Luftbilddaten übertragbar. Somit können punktuell erhobene Daten auf die Fläche projiziert werden.

3.3. Ertragskartierung

Mittels der GPS-gestützten Ertrags Erfassung lassen sich unter den Standortverhältnissen im rheinischen Braunkohlenrevier Rückschlüsse auf die Dichtlagerung der Böden ziehen

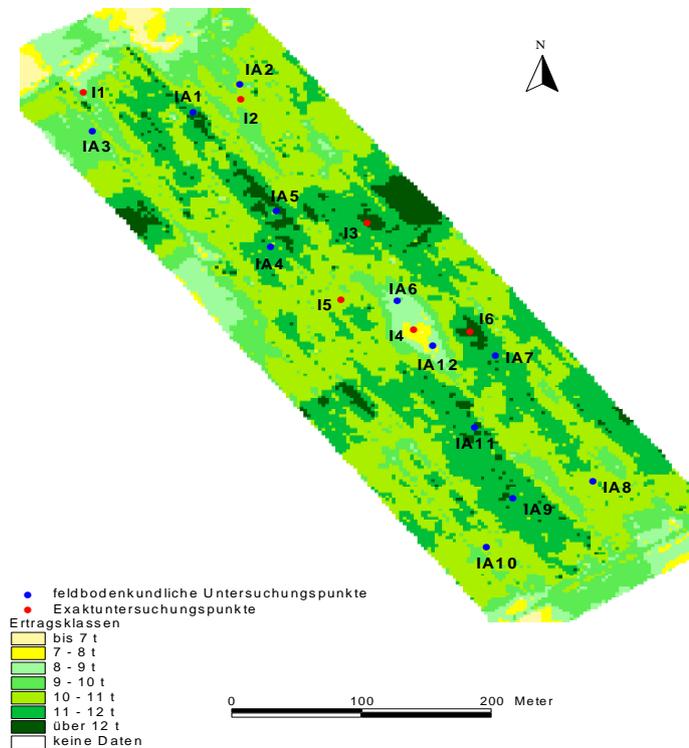


Abb.6: Ertragskarte des Standortes im Tagebau Inden mit den Untersuchungspunkten (Liebenthal 2004)

In zwei unterschiedlichen Rekultivierungsgebieten wurden an je 6 Standorten signifikante Beziehungen zwischen dem Getreideertrag und der Bodendichte in drei unterschiedlichen Bodentiefen ermittelt (Liebenthal 2004), (vgl. Abb. 7). Insofern lässt sich die Ertragskartierung auch zur Abgrenzung von meliorationsbedürftigen zu ordnungsgemäß rekultivierten Ackerflächen einsetzen.

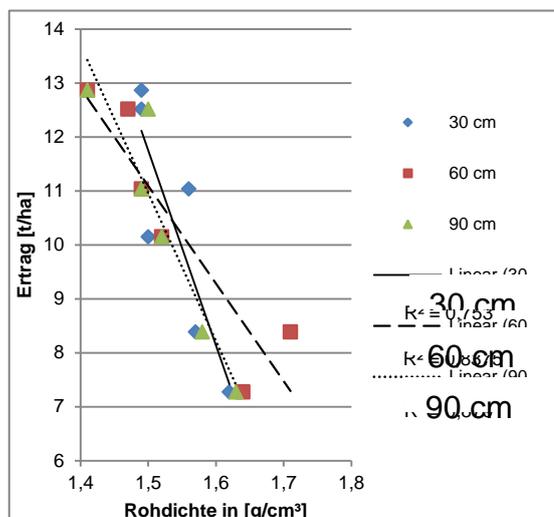


Abb. 7: Weizenenertrag als Funktion der Rohdichte der Böden (Tgb. Inden), verändert nach Liebenthal 2004

4. Beseitigung von Bodenverdichtungen

Mittlere Bodenverdichtungen lassen sich mittels biologischer Verfahren beseitigen. Während des landwirtschaftlichen Rekultivierungsprozesses wird in den ersten Jahren Luzerne angebaut. Dem Ansaatjahr folgen zwei weitere Nutzungsjahre, in denen der Aufwuchs überwiegend gemulcht wird. Die Pfahlwurzel der Luzerne durchdringt Dichtlagerungen im Boden bis zur Packungsdichte Pd 3-4 problemlos. Wenngleich in den Anfangsjahren der Rekultivierung meist keine Regenwürmer im Boden nachweisbar sind, so stellen sich doch nach wenigen Jahren wieder mittlere Abundanzen ein (Westernacher-Dotzler und Dumbeck, 1992). Im Rahmen felddodenkundlicher Untersuchungen wurde festgestellt, dass *Lumbricus terrestris* Bereiche bis zur mittleren Packungsdichte (Pd 3 und Pd 3-4) sehr gut erschließt.

In Abhängigkeit des Bodenwassergehaltes, der Ausstattung der Planierraupen (spez. Bodendruck, Gesamtmasse) sowie der Verteilgenauigkeit des Materials durch den Absetzer können Bodenverdichtungen entstehen, die sowohl vom Dichtlagerungsgrad als auch vom Tiefgang wichtige Funktionen des Bodens negativ beeinträchtigen. In den Fällen, in denen die Packungsdichte der Böden bei Pd 4 oder Pd 5 liegt, ist der Einsatz mechanischer Lockerungsverfahren zur Beseitigung der Verdichtungen unabdingbar. Sofern Planierraupen mit zu hoher Gesamtmasse und /oder zu hohem spez. Bodendruck zum Einsatz gelangen, ist meist auch eine flächendeckende Tieflockerung durchzuführen. Im Kleinabsetzerbetrieb hergestellte Flächen, die gleichmäßig verkippt und zudem noch bodenschonend planiert wurden, lagert der Unterboden mit Packungsdichten um Pd 2. Auf den mit diesem Verfahren hergestellten Flächen finden keinerlei Meliorationsmaßnahmen statt. Als kritisch sind solche Flächen anzusehen, bei denen das flächenmäßige Verteilungsmuster der Verdichtungen so ist, dass die komplette Ackerfläche melioriert werden muss, obgleich der tatsächliche Lockerungsbedarf nur auf ca. der Hälfte der Fläche vorliegt.

Die Tieflockerungsmaßnahmen werden nur bei hinreichend niedrigem Wassergehalt in der Lockerungszone durchgeführt. Er sollte im Bereich oder unterhalb der Ausrollgrenze liegen. Der Bodenwassergehalt lässt sich im Unterboden im Durchschnitt der Jahre durch den Luzerne- und auch Winterweizenanbau deutlich absenken. Die Aufbruchwirkung der Lockerungswerkzeuge wird durch regelmäßig stattfindende Aufgrabungen kontrolliert.

Neben raupengezogenen Lockerungsgeräten gibt es auch schleppergezogene. Zur Beseitigung sehr tief reichender Bodenverdichtungen hat sich der TLG-12 B bewährt. Dieses durch eine Raupe gezogene Gerät arbeitet nach dem Stechhubprinzip; das Lockerungsschar macht sowohl eine horizontale als auch vertikale Bewegung. Lockerungstiefen bis ca. 90 cm sind im stehenden Boden erreichbar.

Die enorme Leistungssteigerung der Schlepper ermöglicht es mittlerweile, dass auch schleppergezogene Lockerungsgeräte (Tiefgrubber mit 5 Werkzeugen) bis eine Bearbeitungstiefe von ca. 70 cm vordringen können. Das ebenfalls schleppergezogene MM 100 arbeitet mit vier Scharen nach dem Abbruchprinzip.



Abb. 8: Raupengezogener TLG -12 B



Abb. 9: Links-Abbruchlockerung mit dem MM 100; rechts-Tiefgrubber mit Schlepper

5. Nachhaltigkeit von Tieflockerungsmaßnahmen

Mitte der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts mussten umfangreiche Meliorationsmaßnahmen auf schadhaft rekultivierten Ackerflächen vorgenommen werden. Bei sehr tiefreichenden Bodenverdichtungen, die nicht unterfahren werden konnten, mussten Drainagen zur Ableitung des überschüssigen Wassers verlegt werden. Die anschließende Tieflockerung wurde mit dem TLG-12 (später TLG-12 B) durchgeführt. Die dabei erzielbaren Lockerungstiefen erreichten 80 cm bzw. 90 cm. Sofern der Verdichtungskörper mit den eingesetzten Lockerungsgeräten unterfahren werden konnte, war das zusätzliche Verlegen von Bedarfsdrainagen nicht erforderlich (Harrach, 1986).

Der großflächige Einsatz dieses kombinierten Meliorationsverfahrens umfasste mehrere tausend Hektar. Aufgrund des sehr hohen Schluffgehalts der Böden bestand eine anfängliche Skepsis bezüglich der Wirksamkeit und der Nachhaltigkeit der Maßnahmen. Bei mittleren Tongehalten von 15-17 M.-% handelt es sich bei dem verkippten Material überwiegend um mittel tonigen Schluff (Ut3); der Kalziumkarbonatgehalt variiert zwischen 4,5 M.-% und 11,5 M.-%, teils liegt er auch deutlich darüber (Dumbeck, 2000).

Nach dem Regelwerk des DVWK (1986) gelten diese Böden als nicht nachhaltig zu meliorieren. Schneider und Schröder (1999) haben in Untersuchungen zur Nachhaltigkeit von Tieflockerungsmaßnahmen, die vor 3 Jahren bzw. 10 Jahren durchgeführt wurden, eine

Abnahme der Dichte des Bodens sowie eine Zunahme der Grobporengehalte nachgewiesen. Rückverdichtungen wurden teilweise im Übergangsbereich zum Unterboden festgestellt. Im Jahr 2007 fanden bodenphysikalische Untersuchungen an 16 Profilen im Hinblick auf die Nachhaltigkeit der Tieflockerungsmaßnahmen statt (Reidt, 2008). Bei dem Gerät handelte es sich um den TLG 12 B. Die Tieflockerung wurde in den Jahren 1989 und 1991 durchgeführt, und zwar auf Flächen, deren Herstellung in den Jahre 1977, 1979, 1982 und 1983 lag. Bezogen auf den Untersuchungszeitpunkt lag die Tieflockerung somit 16 bzw. 18 Jahre zurück. Die Lockerungswirkung wurde damals durch wiederholte Aufgrabungen feldbodenkundlich überprüft. Auf den 16 Standorten wirtschaften vier verschiedene Landwirte, die über eine unterschiedliche Geräte- und Maschinenausstattung verfügen und unterschiedliche Bodenbearbeitungs- und Erntestrategien verfolgen. Die Untersuchungstiefen erstreckten sich auf den unmittelbaren Pflugsohlenbereich, also den beginnenden Unterboden in 32 cm bzw. 36 cm Tiefe, 50 cm sowie differenziert nach Lockerungsgang und -damm in der Tiefe von 68 cm bzw. 73 cm. Die Unterscheidung zwischen Lockerungsgang und -damm wurde gewählt, da einerseits die Lockerungswirkung auch in dieser Tiefe untersucht werden sollte, andererseits sollte sie aber auch in Beziehung zu dem ungelockerten Damm gesetzt werden. Der gerätespezifische Bodeneingriff erfolgt mit einem Scharabstand von 80 cm, so dass keine flächendeckende Lockerung erfolgt. Somit verbleiben im tieferen Unterboden ungelockerte Bereiche (Dämme), die noch die ehemals vorhandene Dichtlagerung widerspiegeln.

Tab. 1: Luftkapazität der tiefgelockerten Standorte (Reidt, 2008)

Tiefe [cm]	P2 LK [Vol.-%]	P4 LK [Vol.-%]	P5 LK [Vol.-%]	P6 LK [Vol.-%]
32/36	4,6	6,9	8,7	5,4
50	6,8	10,4	10,3	10,4
68/73 [Gang]	12,2	12,0	12,3	14,1
68/73 [Damm]	2,5	2,9	7,0	4,3
Tiefe [cm]	P9 LK [Vol.-%]	P10 LK [Vol.-%]	P13 LK [Vol.-%]	P16 LK [Vol.-%]
32/36	3,4	7,3	6,2	7,4
50	10,8	7,1	11,4	10,2
68/73 [Gang]	10,2	6,1	10,8	17,7
68/73 [Damm]	11,2	5,2	3,1	9,5

Tabelle 1 zeigt die Werte der Luftkapazität in den drei untersuchten Tiefen. Erwartungsgemäß zeigt sich im Übergangsbereich Oberboden / Unterboden eine gewisse Rückverdichtung. Auffallend sind jedoch die deutlich höheren Grobporengehalte in den beiden folgenden Tiefen. Vergleicht man die Gang- und Dammwerte miteinander, so fällt auf, dass in den meisten Fällen eine deutliche Auflockerung des ehemals stark verdichteten Bodens erfolgt ist und dass die Gangwerte auf einem vergleichsweise hohen Niveau liegen. Bei den Standorten P9 und P10 wurde die untere Tiefe fehlerhaft beprobt, d.h. es fand bei der Probenahme keine Differenzierung zwischen Gang und Damm statt.

Tab. 2: Mittlere Trockenrohddichte im Gang- und Dammbereich, Tiefe 68/73 cm (Wiedenfelder – und Kasterer Höhe, s=Standardabweichung) (Reidt,2008)

Wiedenfelder Höhe	
Ø dB [g/cm³], Gang [n = 8 Profile]	Ø dB [g/cm³], Damm [n = 8 Profile]
1,45 [s = 0,10]	1,64 [s = 0,08]
Kasterer Höhe	
Ø dB [g/cm³], Gang [n = 8 Profile]	Ø dB [g/cm³], Damm [n = 8 Profile]
1,48 [s = 0,09]	1,62 [s = 0,08]

Werden alle 16 Standorte hinsichtlich der Bodendichte in der Tiefe 68/73 cm miteinander verglichen, so zeigt sich, dass durch die Bodenlockerung im Mittel eine Dichteabnahme um

ca. 0,2 g/cm³ erfolgte. Anmerkung: Bleiben die fehlerhaften Werte der beiden Standorte P9 und P10 unberücksichtigt, ergibt sich eine mittlere Bodendichte von 1,44 g/cm³ bei den Standorten auf der Kasterer Höhe.

6. Besonderheiten beim Verlegen von Rohrleitungen

Entwässerungsmaßnahmen im Umfeld der Tagebaue machen es erforderlich, dass das geförderte Sumpfungswasser über Rohrleitungen unterschiedlicher Dimensionen abgeleitet werden muss. Dazu werden in der Regel Tagebauvorfeldflächen in Anspruch genommen, die dem späteren Abbau unterliegen. Andererseits bestehen mit dem Betrieb des Tagebaus Garzweiler behördliche Auflagen, jährlich zwischen 50 und 70 Mill. m³ aufbereitetes Sumpfungswasser in ein nordwestlich des Abbaugebiets gelegenes Naturschutzgebiet einzuleiten. Insgesamt sind mehrere hundert Kilometer Rohrleitungen verlegt worden.

Durch eine seit zwei Jahrzehnten bestehende bodenkundliche Baubegleitung konnten nachhaltige Schädigungen durch unsachgemäße Bodenbeanspruchungen verhindert werden. Abgesehen von der Dimensionierung der Rohrleitung und der sich dadurch ergebenden Trassenbreite lassen sich die Baumaßnahmen unter dem Bodenschutzaspekt auch auf längere Gasleitungen der großen Energieversorger übertragen. Bei diesen Leitungsverlegungen wird jedoch oftmals davon ausgegangen, dass gewisse Bodenschädigungen während der Bauphase und des Rückbaus nicht auszuschließen sind. Während des Rückbaus oder aber im Anschluss an den abschließenden Rückbau der Trasse werden somit gewisse Meliorationsarbeiten erforderlich.

Um dennoch unter Berücksichtigung von Bodenschutzaspekten Mindestanforderungen zu definieren, gilt es neben den Standortverhältnissen, die Komplexität der Arbeitsabläufe und der Maschinen- und Geräteeinsätze zu berücksichtigen.

Nach vorliegenden Erfahrungen ist es unabdingbar, dass eine bodenkundliche Bestandsaufnahme zur Feststellung der Bodentypen und der –arten vor Inanspruchnahme durchgeführt wird. Diese Untersuchungen haben sich bis auf die Tiefe der Grabensohle zu erstrecken, da unterschiedliche Horizonte/Schichten ggf. getrennt ausgebaut und auch in separaten Mieten gelagert werden müssen, damit es auch beim späteren Rückbau nicht zu Materialvermischungen kommt.

Eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit der Böden lässt sich durch eine biologische Entwässerung erreichen. Bei kleineren Trassenabschnitten können rechtzeitig vorgenommene Einsaaten wesentlich dazu beitragen, dass der humose Oberboden, aber auch das Unterbodenmaterial im Rohrgrabenbereich, schonender umgelagert werden können. Ggf. können die Trassen auch in bestehenden Getreidebeständen angelegt werden. Bei den Leitungstrassen wird zwischen verschiedenen und damit auch unterschiedlich mechanisch beanspruchten Bereichen differenziert. Während der Mietenbereich nur durch die Überlagerung des entsprechenden Bodenmaterials beansprucht wird, kommt es im Bereich der Fahrtrasse zu erheblicher Bodenbeanspruchung. Im Rohrgraben erfolgt zwangsläufig durch die Materialentnahme eine bis zur Grabensohle reichende Gefügeveränderung. Um den Fahrtrassenbereich vor unnötigen Spannungseinträgen in den tieferen Unterboden zu schützen, sollte beispielsweise das Verlegen und Absenken der Rohrstränge nur bei hinreichend trockenen Bodenverhältnissen erfolgen, da hierbei Raupen mit Seitenauslegern zum Einsatz gelangen, die über eine sehr hohe Gesamtmasse verfügen und die bei den Verlegearbeiten auf dem grabenseitigen Laufwerk extrem belastet werden (vgl. Abb.10).



Abb. 10: Rohrstrang und Rohrverleger

Zur Serienausstattung großer Hydraulikbagger zählen heute schon Laufwerke, die über Plattenbreiten > 750 mm verfügen. Über diese Ausstattung sollten Geräte der Leistungsklasse > 20 t verfügen. Der maximale Bodendruck der Raupenlaufwerke sollte 80 kPa nicht übersteigen. Radfahrzeuge $> 7,5$ t sollten mit einer Radialbereifung ausgestattet sein. Bei den Rohrtransportern dient eine Reifendruckregelanlage zur optimalen Anpassung des Reifeninnendrucks an die jeweiligen Fahrbahnverhältnisse. Bei ungünstigen Bodenverhältnissen werden Fahrspurtiefen bis 15 cm zugelassen. Breiige Konsistenz des Bodenmaterials sowie freies Wasser in den Fahrspuren führen zur Bauunterbrechung. In besonders druckempfindlichen Bereichen lässt sich ein weitgehend kontinuierlicher Bauablauf durch das Anlegen von Baustraßen sicherstellen.

Bodenverdichtungen lassen sich im Trassenbereich an charakteristischen Stellen mittels Aufgrabungen und der Ansprache der Packungsdichte der Böden sehr schnell ermitteln. Der dabei festgestellte Verdichtungsgrad und der Tiefgang der Verdichtungen entscheiden darüber, welches Lockerungsverfahren zum Einsatz gelangt. Eine etwaige Nachsorge richtet sich nach der Schwere des Eingriffs und kann ggf. auch pflanzenbauliche Maßnahmen umfassen (DIN 19731).

7. Zusammenfassung

In den letzten zweieinhalb Jahrzehnten vollzog sich ein grundlegender Wandel in der Rekultivierung landwirtschaftlicher Flächen. Verfahrenstechnische Änderungen in der Verkippung des Bodenmaterials und insbesondere der Einsatz einer bodenschonenden Planiertechnik haben dazu geführt, dass qualitativ hochwertige Ackerflächen entstehen, die keiner weiteren Melioration mehr bedürfen. Der Einsatz unterschiedlicher Planiertraupen führt jedoch auf Teilflächen dazu, dass Grenzwerte der Bodendichtlagerung überschritten werden. Durch Fernerkundungsdaten sowie Pflanzenbonituren unterstützt, werden auf diesen Flächen Aufgrabungen zur Ermittlung der Packungsdichte der Böden durchgeführt. Das Ergebnis der Gefügeuntersuchungen sowie der aktuelle Bodenwassergehalt bestimmen den Einsatz des Lockerungsverfahrens. Abgesehen von moderaten Rückverdichtungen im Übergangsbereich zwischen Ober- und Unterboden konnte die Nachhaltigkeit der Lockerungsmaßnahmen im Boden auch noch 16 bzw. 18 Jahre nach Durchführung der Maßnahmen durch die Abnahme der Bodendichte und eine deutliche Zunahme der Grobporenvolumina nachgewiesen werden.

Die bodenkundliche Baubegleitung trägt bei Rohrleitungsbaumaßnahmen maßgeblich dazu bei, dass Bodenschutzbelange stärkere Berücksichtigung finden. Einheitliche Vorgaben zu den Geräte- und Maschinenausstattungen sollten im Rahmen von Ausschreibungen dazu beitragen, dass auch auf den Leitungstrassen der gesetzlich geforderte Bodenschutz Beachtung findet.

8. Literatur

BBergG (2010): Bundesberggesetz.

BBodSchG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz.

BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung.

Bezirksregierung Arnsberg (2012): Richtlinie der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW, für die landwirtschaftliche Wiedernutzbarmachung von Braunkohlentagebauen.

DIN 19682-10 (2007): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau – Felduntersuchungen – Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 19731 (1998): Verwertung von Bodenmaterial. Beuth Verlag, Berlin.

Dumbeck, G. (2000): Landwirtschaftliche Rekultivierung im rheinischen Braunkohlenrevier unter besonderer Berücksichtigung bodenkundlicher Aspekte. – In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd. 20, Bergbau-Folgeschäden und Ökosysteme. Verlag Dr. Friedrich Pfeil. München.

Dumbeck, G. (2009): Rekultivierung landwirtschaftlicher Flächen im rheinischen Braunkohlenrevier im Wandel der Zeit. Exkursion G1, Tagung der DBG 2009 in Bonn. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 112, 66-77.

DVWK (1986): Regeln 117 – Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte. Teil 3 – Anwendung der Kennwerte für die Melioration. Paul Parey Verlag Hamburg und Berlin.

Gerschlaier, F. (2008): Bodengefüge unterschiedlich rekultivierter Ackerstandorte im rheinischen Braunkohlenrevier – die Problematik der Bodenverdichtung. Diplomarbeit Marburg.

Gewährleistungsvereinbarung Neulandböden (1990): Vereinbarung über die Gewährleistung für landwirtschaftliche Neulandböden vom 7. Februar 1990. Bonn, Köln.

Harrach, T. (1986): Untersuchungen zur Sanierung von Vernässungsschäden auf rekultivierten Böden der Kippe Fortuna-Fischbach (unveröffentlichtes Gutachten).

Harrach, T. (2002): Bestimmung der Packungsdichte von Böden zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen (unter Mitarbeit von S. Sauer). Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Mainz.

Lebert, M., G. Springob (1994 a): Zur Rekultivierung von Lößböden (I): Wirkung verschiedener Planierverfahren auf die Bodenstruktur. Z. Kulturtechnik u. Landentw. 35, 112-121.

Liebenthal, K. (2004): GPS-gestützte Ernteerfassung als Instrument der Ausweisung meliorationsbedürftiger rekultivierter Ackerflächen im rheinischen Braunkohlenrevier. Diplomarbeit, FH Osnabrück.

Reidt, D. (2008): Die Nachhaltigkeit von Tieflockerungsmaßnahmen auf rekultivierten Ackerflächen im rheinischen Braunkohlenrevier. Diplomarbeit, Universität Tübingen.

Rücknagel, J., T. Harrach, G. Dumbeck, F. Gerschlaier und O. Christen (2009): Morphological Characterization of Soil Structure and the Relation to Precompression Stress for Recultivated Loess Soils. ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings, Izmir, Turkey.

Schröder, D., R. Schneider (1999): Gefügeverbesserung in Neulandböden aus Löß durch eine komplexe Melioration. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 91, 1335-1338.

Tenholtern, R., G. Dumbeck und T. Harrach (1993): Die Packungsdichte als Ausdruck makroskopischer Gefügeeigenschaften von Auftragsböden aus Löß. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 71 (1), 261-264.

Tenholtern, R., G. Dumbeck und T. Harrach (1996): Standortbeurteilung auf rekultivierten Flächen im rheinischen Braunkohlenrevier. Von den Ressourcen zum Recycling. Hrsg. Alfred-Wegener-Stiftung. Verlag Ernst & Sohn.

Westernacher –Dotzler, E., G. Dumbeck (1992): Vorkommen von Regenwürmern in landwirtschaftlich rekultivierten Flächen in der Niederrheinischen Bucht. -J. Agronomy and Crop Sciences 169, 298-309.

Zur Person:

Dr. Gerhard Dumbeck

Bodenschutzbeauftragter bei RWE Power AG, für bodenrelevante Eingriffe innerhalb und außerhalb der Abbaugebiete zuständig. Seit ca. 3 Jahrzehnten mit Rekultivierungsfragen beschäftigt. In Gießen Landwirtschaft studiert, in der Bodenkunde bei Prof. Harrach promoviert.

Bodenverdichtung in der Landwirtschaft

Joachim Brunotte



Diskussionsforum Bodenwissenschaften

Bodenverdichtung in der Landwirtschaft

PD Dr. habil. Joachim Brunotte
Institut für Agrartechnologie im
vTI (ehemals FAL), Braunschweig

Institut für Agrartechnologie
und Biosystemtechnik

Osnabrück, 26. Oktober 2012

Brunotte
Bru12037/1

Bodenverdichtung in der Landwirtschaft



- 1 Einleitung
- 2 Leitsätze/Systematik/Schadensschwelle zu Boden-
gefügeschäden
- 3 BDF + Stuserhebungen + Belastungsversuche
⇒ Brisanz/Verbreitung von Bodenschadverdichtungen
- 4 Vermeidungsstrategien – technische, bodenphysikalische
und pflanzenbauliche Parameter zur Bewertung
- 5 Entscheidungsmatrix „Anpassung von Maschinen an die
Verdichtungsempfindlichkeit von Böden“
- 6 Erfolgskontrolle bei aktueller Befahrung
- 7 Schlußfolgerungen

Institut für Agrartechnologie
und Biosystemtechnik

Gliederung

Brunotte
Bru12037/2

Gute fachliche Praxis nach BBodSchG



Das BBodSchG spricht die landwirtschaftliche Bodennutzung im § 17 mit der **guten fachlichen Praxis** an. Ihr Ziel ist „die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens als natürliche Ressource“. Dazu gehört insbesondere,

- . . . Bodenbearbeitung standortangepasst . . .
- . . . Bodenstruktur erhalten/verbessern . . .
- . . . Bodenverdichtungen vermeiden . . .
- . . . Bodenabtrag vermeiden . . .
- . . . naturbetonte Strukturelemente erhalten . . .
- . . . biologische Aktivität des Bodens fördern . . .
- . . . standorttypischen Humusgehalt erhalten . . .

1) Bundesgesetzblatt Jahrg. 1998
Teil I Nr. 16 v. 24. März 1998

Institut für Agrartechnologie
und Biosystemtechnik

**Gesetzlicher Rahmen für
nachhaltige Landwirtschaft**

Brunotte, Sommer
Bru12037/3

Gute fachliche Praxis nach BBodSchG - Leitsätze



- „**Bodenverdichtungen** sollen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendruck, so weit wie möglich vermieden werden“.

1) Bundesgesetzblatt Jahrg. 1998
Teil I Nr. 16 v. 24. März 1998

- **Leitsätze für gute fachliche Praxis müssen**
 - wissenschaftlich als abgesichert gelten,
 - aufgrund praktischer Erfahrungen geeignet, durchführbar und als notwendig anerkannt sein,
 - wirtschaftlich tragbar sein,
 - dem sachkundigen Anwender zugänglich sein.

Institut für Agrartechnologie
und Biosystemtechnik

**Gesetzlicher Rahmen für nachhaltige
Landwirtschaft**

Brunotte
Bru12037/4

Vollzugstaugliche Parameter zur Erkennung eines Bodengefügeschadens im Unterboden bindiger Böden und Schadensschwellen



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

nach Lebert, Brunotte, Sommer, 2004

Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Parameter zur Erkennung von Bodengefügeschäden

Brunotte
Bru12037/6

Gratwanderung bei der Landwirtschaft

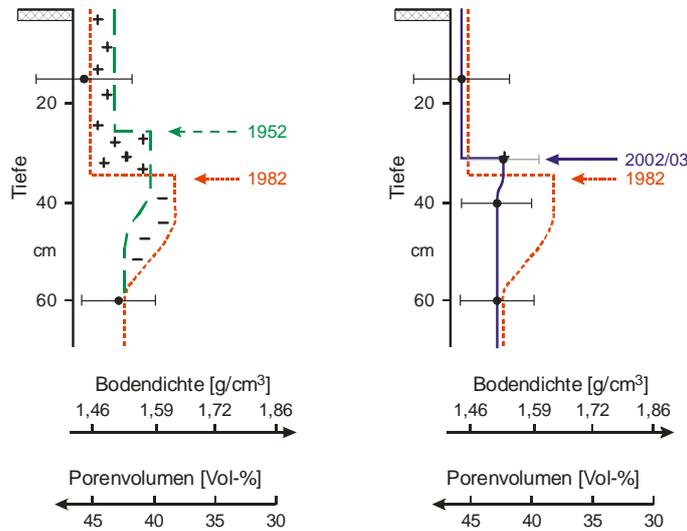


Technische Entwicklung 1950 - 2007	BBodSchG § 17 BRRL EU	Prinzip „Nachhaltigkeit“
<ul style="list-style-type: none"> - Flächenleistung ↑ x10 - Radlast ↑ 12 t - Überrollungen ↓ ZR 6-10 → 1-2 - Leistungsgewicht ↓ 0,7 kN/kW → 0,3 - Radial- statt Diagonalreifen - Reifeninnendruck ↓ 	<ul style="list-style-type: none"> - Schädigung von Bodenfunktionen <ul style="list-style-type: none"> • Produktions-, • Regelungs- und • Lebensraumfunktion vermeiden. - Flächen ausweisen, die durch: <ul style="list-style-type: none"> • Erosion, • Bodenverdichtung • Verlust an organischer Masse, • Versalzung/Erd-rutschen bedroht sind. 	<ul style="list-style-type: none"> - ökologisch → bodenschonend <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> teure Spezialmaschine </div> <ul style="list-style-type: none"> - ökonomisch → rentabler Einsatz - sozialverträglich → Einkommen

Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Brunotte, Sommer
Bru12037/5

Bodendichte bzw. Porenvolumen als Funktion der Bodentiefe

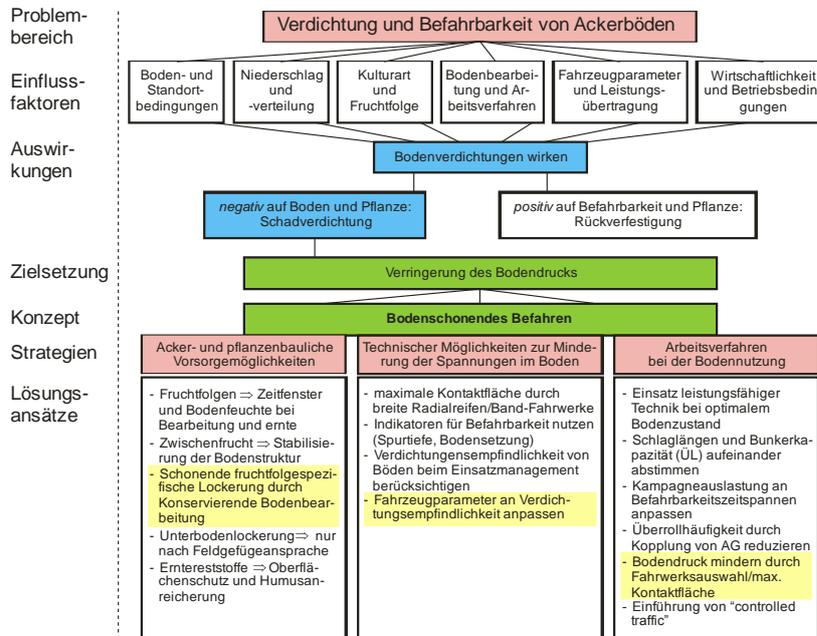


Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

tendenzielle Vergleiche 1952-1982-2002
(150 Standorte in Niedersachsen) nach **Ruhm**

Brunotte, Lorenz, Sommer
Bru12037/7

Bodenverdichtung – Einflussfaktoren und Strategien zur Vermeidung



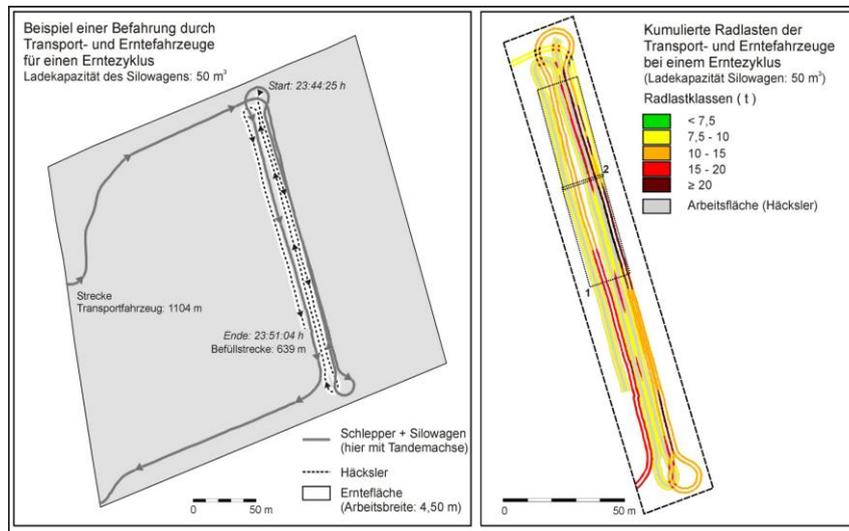
Technische Parameter

Technische Daten von Ernte- und Transportmaschinen						
Gerät	Reifenposition	Bezeichnung	Radlast [t] (Bunker voll)	Reifeninnendruck [bar]		
				zykl., 10 km/h	50 km/h	Schräghang
Rübenroder (6-reih. SF) mit Bandlaufwerk	vorn hinten	89 x 200 cm 900/65 R32	14 10	1,7		
Rübenroder (6-reih. SF) 2-achsig	vorn hinten	800/65 R32 1050/50 R32	10,5 12,0	2,3 2,5		2,5 2,7
Traktor 130 kW	vorn hinten	540/65 R34 650/65 R42	2,45 2,95	>1,0 <1,0	1,3 1,0	
Muldenkipper	1 Achse	710/50 R30.5	8,25	2		2,2
Maishäcksler 4,5 m Schnittbreite	vorn hinten	800/65 R32 700/50-26.5	6,05 1,9	1,1 <1,0	2,1 <1,0	
Traktor 175 kW	vorn hinten	600/65 R34 650/85 R38	2,25 4,3	<1,0 1,0	1,0	
Häckselwagen 50 m³	Tandem	700/50 R26.5	5,5	1	2,3	

Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Brunotte
Bru12037/9

Räumliche Verteilung der Radlasten beim Ernte- und Transportverkehr, dargestellt für einen Erntezyklus

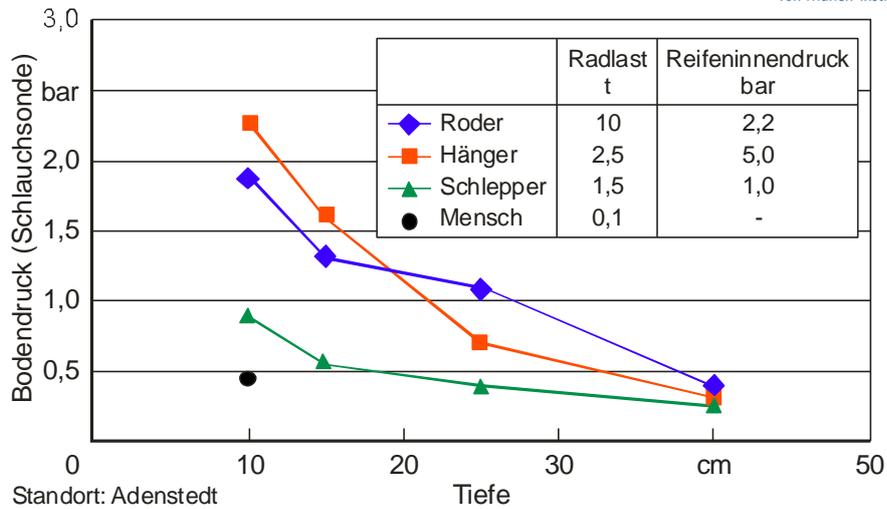


Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Biomasselogistik

Duttmann, Bach, Brunotte
Bru12037/10

Bodendruckmessung (Schlauchsonden) unter verschiedenen Fahrzeugen

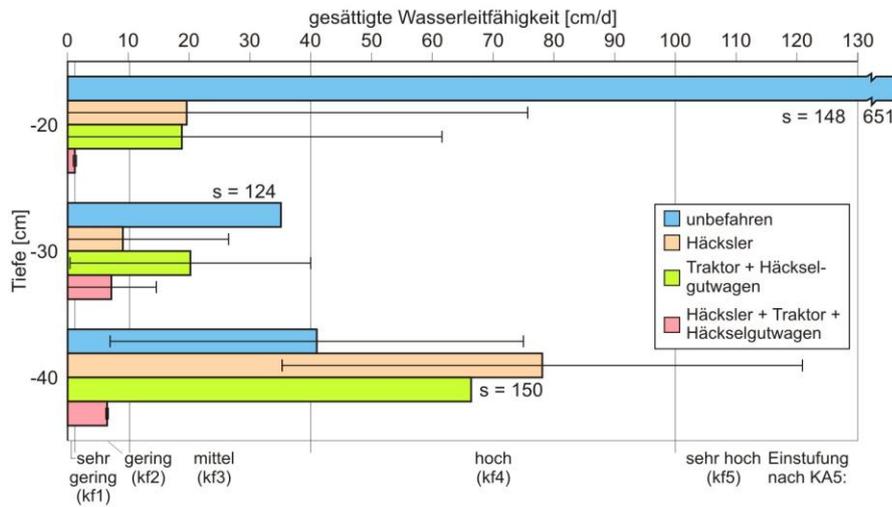


Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Interaktion Maschine/Boden

Weißbach, Brunotte
Bru12037/11

gesättigte Wasserleitfähigkeit [cm/d]

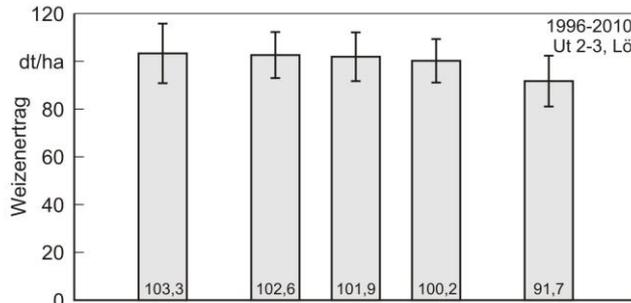


Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Lamspringe 08.10.2007

Lorenz, Brunotte
Bru12037/12

Winterweizenertrag nach Zuckerrüben, variiert nach Mechanischer Belastung und Bodenbearbeitung (Ut 2-3, Löss, 1996-2010)



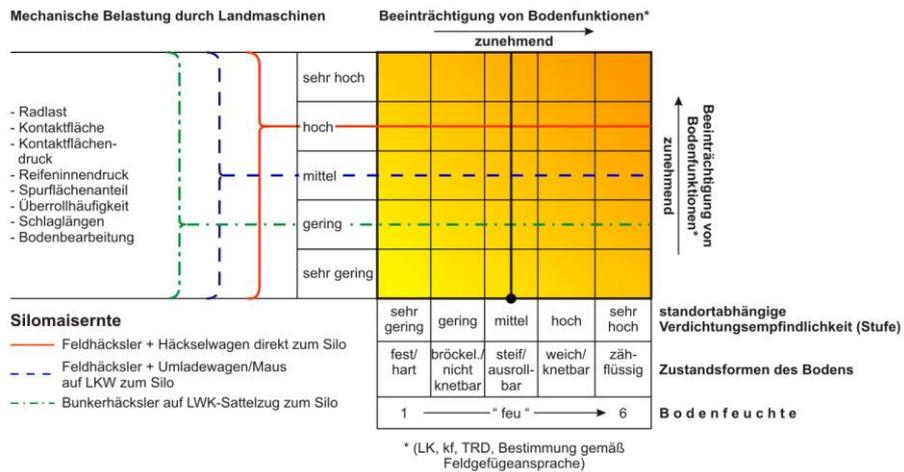
Ackerfläche	Kernproduktionsfläche				Vorgewende
Bodenbearb. zur ZR	MSoL	Pflug	MSoL	MSoL	MSoL
Belastungsvariante	unbefahren	befahren			
Bodenbearb. zum WW	MSoL	Pflug	MSoL	MSoL	Pflug

Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Interaktion Maschine/Pflanze

Brunotte Bru12037/13

Planungsinstrument für standortangepasste Befahrung



Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Expertengestützte Entscheidungsmatrix: Bsp. Silomais

Brunotte Bru12037/14

Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker (3. Auflage)

Analysis des Gefüge-Zustands und Planung der geeigneten Vorgehensweise

6 PARAMETER	erwünscht	EIGENSCHAFTEN	unerwünscht
1 Struktur der Oberfläche vorwiegend an Profilwand zusätzlich am Aushub durchführbar	++	<ul style="list-style-type: none"> intakte stabile Aggregate organische Reststoffe Länge, Durchmesser, Verteilung optimal für Rote/Regenwürmer Bedeckungsgrad (flacher zur Bestimmung) Reststoffe in RW-Gänge hineinragen RW-Lösung vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> Horizontierung Erosion (Wasser/Wind) Verkrustung grobklüftig bei Saat Verkrustung
2 Durchwurzelung des Bodens	++	<ul style="list-style-type: none"> durchgängig über alle Horizonte Wurzelnverteilung gleichmäßig intensive, kulturspezifische Durchwurzelung 	<ul style="list-style-type: none"> gebückte Wurzeln/Steingänge bei hohem mechanischen Widerstand (Wurzeltau auf Eisenblech oder auf Strohpölsen) Wurzeln auf weichen Schichten oder auf Aggregat-Oberflächen (siehe auch BME 4)
3 Makroporen/Bioporen	++	<ul style="list-style-type: none"> RW-Lösung an der Oberfläche/fin Profil viele Regenwurmgänge in der Profilwand und im Profilsboden vorhanden -> Verzahnung von Ober- und Unterboden neu angelegte RW-Gänge im Bearbeitungshorizont vorhanden alte RW-Gänge im Unterboden mit RW-Lösung und humosem Material verfüllt 	<ul style="list-style-type: none"> auf der Bodenoberfläche keine offenen Bioporen in Krume wenig vertikale RW-Gänge Makroporen enden vor oben an der Krumbank, keine Verbindung zum Unterboden auch im Unterboden nur wenige Bioporen
4 Gefüge und Verfestigung	++	<ul style="list-style-type: none"> Gefüge porös, locker, fein aggregiert bei Druck zwischen Fingern zerfällt zerfällt bei Abwurfprobe und zerklüftet Messbereich in die Profilwand ohne Widerstand möglich Die Unterkrume soll kompakter (= bessere Tragfähigkeit), aber bodengerechtlich perfekt sein 	<ul style="list-style-type: none"> Gefüge fest zusammenhängend, dicht gefügt, stark verfestigt, scharfkantig große, scharfkantige Aggregate nach Abwurfprobe Wurzeln an Aggregatoberflächen Messer schneit (unvermeidlich) (Feuchte beachten)
5 Organische Reststoffe	++	<ul style="list-style-type: none"> nach Saat gleichmäßig an der Oberfläche verteilt gleichmäßig in die Krume eingearbeitet Vorfürtsreste in der Krume gut verrottet gleichmäßige Wurzelentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> nach Saat ungleichmäßige Streuung Reststoffe konzentriert an der Oberfläche oder in Horizonten (Strohmatte) unverrotete Reststoffe von früheren Jahren Wurzeltau auf Strohpölsen
6 Farbe und Geruch	++	<ul style="list-style-type: none"> Farbe kann Hinweis für Horizontbeschreibung, Luft- und Wasserhaushalt sowie Humingehalt sein gleichmäßige Farbe innerhalb der Horizonte Boden nicht angenehm eifig => im Oberboden ist der Geruch ausgeprägter als im Unterboden 	<ul style="list-style-type: none"> Mau- und grau gefärbte Bereiche in den Horizonten als Zeichen für Redoxhorizonten (Bereich starke Verdichtung, Sauerstoffmangel für vergärbare Reststoffe) Restflocken entstehen nach verteiltem Luftmangel übler, fauliger Geruch

Bewertung der Analyse

Zusammenfassende Beurteilung aus den 6 Parametern:

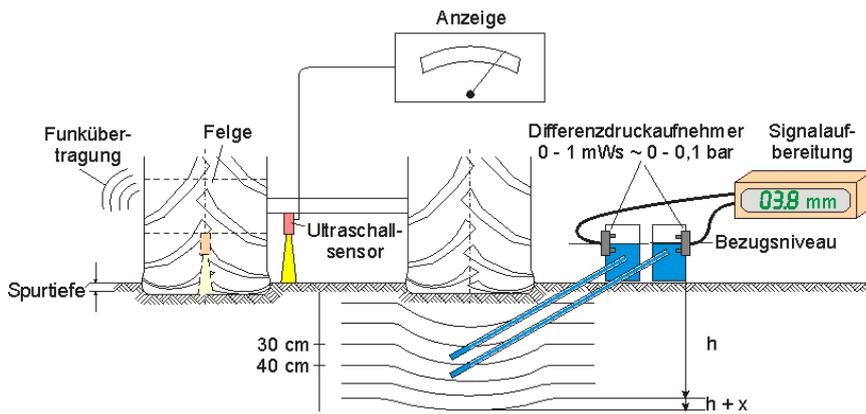
- + Gefüge in Ordnung, Vorseige erfüllt (max. 12 mal +)
- 0 Gefüge noch zufriedenstellend, Vorseige intensivieren
- Gefüge kritisch, Sanierung ggf. erforderlich (max. 12 mal -)

vTI
Johann Heinrich von Thünen Institut

Johann Heinrich von Thünen Institut (vTI) | Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik | Bodenkultur 50 | 36116 Braunschweig
 Kontakt: PD Dr. Ina K. Jochims Brunotte | Tel. +49(0)531 396-444 (4102) | Fax +49(0)531 396-4199 | jochims@vni.vti.bund.de

Gründungslehre für innovative Bodenbearbeitung v1.0 (2006) | Hauptstraße 6 | 10565 Neuenhagen
 Tel. +49(0)3042 422-130 | Fax +49(0)3042 422-131 | Beratung: über info@gh-bio.de

Messung von Spurtiefe, Reifeneinfederung und Bodensenkung

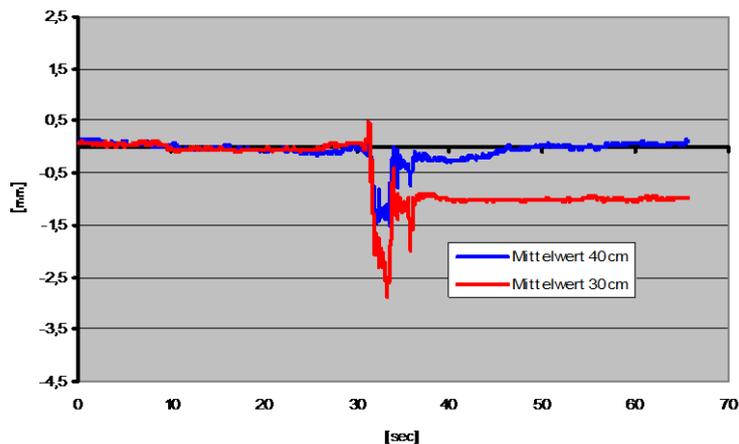


Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Befahrbarkeitssensor als agrartechnische Innovation

Nolting, Brunotte
Bru12037/16

Setzung in 30 und 40 cm Tiefe bei Überrollung durch Mais-Häcksler

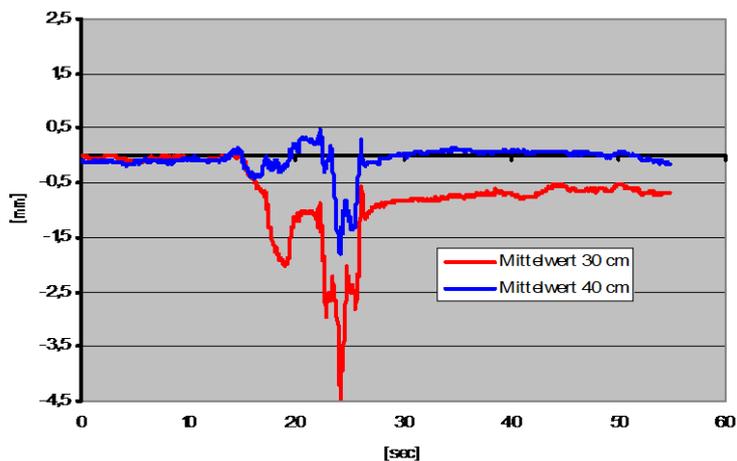


Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Lamspringe 08.10.2007

Nolting, Brunotte
Bru12037/17

Setzung in 30 und 40 cm Tiefe bei Überrollung durch voll beladenen Mais-Silowagen

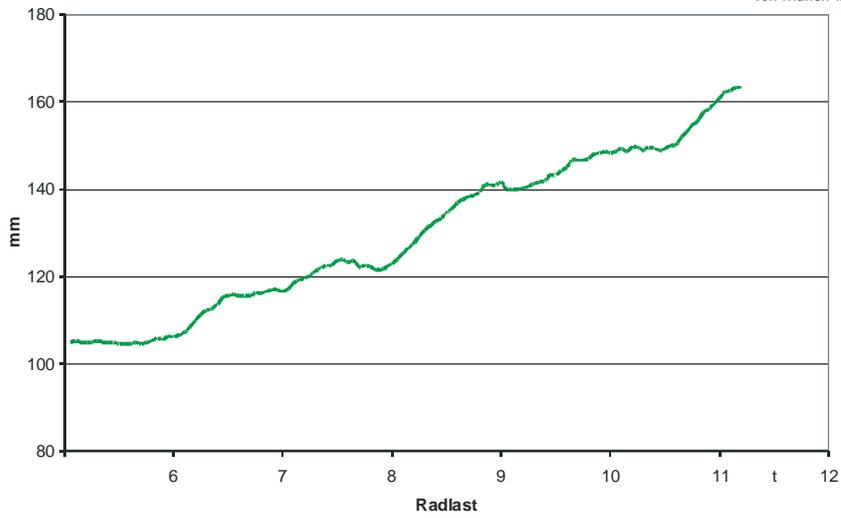


Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Lamspringe 08.10.2007

Nolting, Brunotte
Bru12037/18

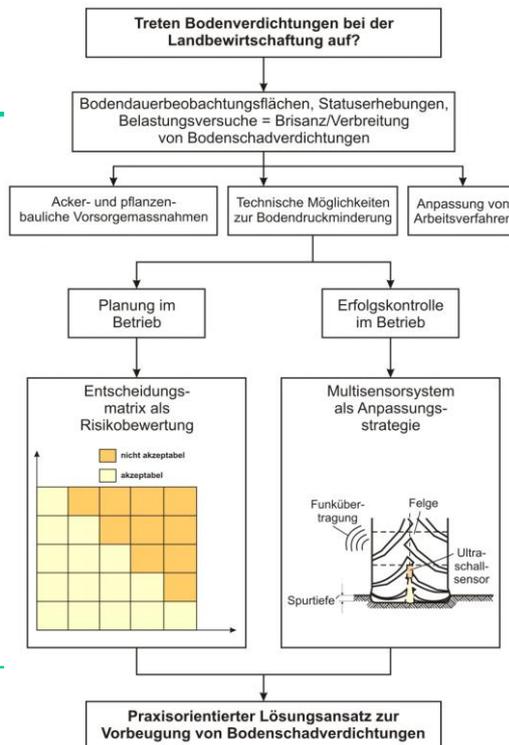
Reifeneinfederung des Hinterreifens (1050/50 R32) eines 6-reih. Köpfbredekumers während der Bunkerfüllung



Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Steuerungsgröße für maximale Kontaktfläche

Nolting, Brunotte Bru12037/19



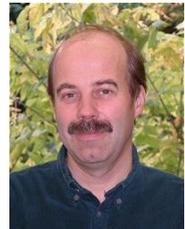
Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik

Brunotte Bru12037/20

Zur Person:

PD Dr. habil. Joachim Brunotte

Mai 1917	Hochschulreife Michelsenschule Hildesheim
Juni 1979	Gehilfenprüfung zum Landwirt
1980-1985	Studium der Agrarwissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität Kiel mit Abschluß Dipl.-Ing. agr.
1985-1990	Promotion am Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Universität Kiel mit dem Thema „Landtechnische Maßnahmen zum bodenschonenden und bodenschützenden Zuckerrübenanbau“
1991-1993	Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der KWS Kleinwanzlebener Saatzucht AG, Einbeck, mit dem Arbeitsgebiet ‚Agroservice im Zuckerrübenanbau‘
seit 1993	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betriebstechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), seit 01.01.2008 im Institut für Agrartechnologie im von Thünen Institut (vTI) mit dem Arbeitsgebiet: Technik und Verfahren in der Pflanzenproduktion und den Themen: Boden schonende-, Energie- und Kosten sparende Mechanisierungsverfahren, Bodenschutz, Bodenbearbeitung, Biomasselogistik, Flächenstilllegung Jan. 2001 Habilitation an der Humboldt - Universität zu Berlin im Fachgebiet Agrartechnik zum Thema, „Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide“
seit 4/2007	Privatdozent an der Humboldt-Universität zu Berlin im Fachgebiet Agrartechnik



Bewertung und Vermeidung von Bodenschadverdichtungen im Wald

Herbert Borchert

1 Bewertung von Strukturveränderungen im Boden durch Befahrung

1.1 Typen von Bodenverformung durch Forstmaschinen

Der Maschineneinsatz im Forst unterscheidet sich in mancher Hinsicht deutlich von dem in der Landwirtschaft. Das Gelände ist häufig steiler. Das Fahren kann durch Bäume, Wurzelstöcke, Steine und Felsen behindert werden. Strukturveränderungen in den Böden können nicht durch Pflügen wieder rückgängig gemacht werden. Sie bleiben meist dauerhaft bestehen, eine natürliche Regeneration findet kaum statt (Kremer, 2008). Bei den Verformungen des Waldbodens durch die Befahrung mit Maschinen werden heute drei Spurtypen unterschieden (Kremer et al. 2007, Lüscher et al. 2009).

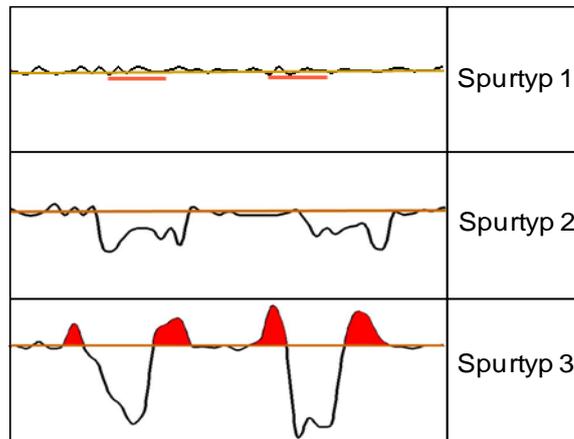


Abb.1: Schematische Darstellung der Fahrspurtypen (Kremer et al. 2007).

Bei sehr trockenem Boden kommt es lediglich zu einer elastischen Verformung, bei der allenfalls Stollenabdrücke als sichtbare Spuren verbleiben (Spurtyp 1). Bei feuchtem Boden wird dieser plastisch verformt und dabei verdichtet. Zurück bleibt eine deutliche Eintiefung in dem befahrenen Bereich, die als Sackungsverdichtung bezeichnet wird (Spurtyp 2). Das Porenvolumen ist verringert, die Belüftung und Drainage gestört. Bei sehr hohen Wassergehalten sinkt die Maschine tiefer in den Boden ein, sodass Spurgleise entstehen. Dies beruht weniger auf einer Verdichtung, als vielmehr auf einer visko-plastischen Verformung. Dieser Spurtyp 3 (Abb.1) entsteht, wenn der Boden fließt. Dabei wird das Bodenmaterial unter der Last der Maschine seitlich aus der Spur gedrückt. Ausgeprägte randliche Aufwölbungen entlang der Gleise sind die Merkmale dieses Spurtyps. Das Einsinken der Maschine endet häufig erst dann, wenn die Maschine mit der Bodenwanne aufsetzt. Das Fließen des Bodens unter der Maschinenlast führt dazu, dass die Poren im Boden parallel zur Bodenoberfläche ausgerichtet werden. Dabei verliert der Boden seine Durchlässigkeit und wird quasi versiegelt. Als Folge kann das Wasser in den Gleisen nicht versickern und bleibt dort lange stehen.

Ein weiterer Auslöser von Spurgleisen kann übermäßiger Schlupf sein. Wenn die Reifen durchdrehen, schert der Boden ab und wird aus der Fahrspur herausgeschleudert (Weise, 2008). Dies kann selbst bei trockenem Boden geschehen. Die Gefahr ist am Hang oder wenn das Rad über Hindernisse wie Wurzelstöcke oder Felsen steigen muss besonders groß. An Hängen sind solche Spurgleise oftmals Ansatzpunkte für nachfolgende Bodenerosion durch abfließenden Niederschlag.

1.2 Ausmaß von Bodenverformungen im Wald ist nicht bekannt

Eine großflächige Bestandsaufnahme der Bodenverformungen in den Wäldern durch Forstmaschinen gibt es in Deutschland bislang nicht. Bei der gegenwärtig laufenden dritten Bundeswaldinventur werden die Fahrspuren in den Waldlebensraumtypen der FFH-Gebiete erfasst. In einzelnen Fallstudien wurden die Fahrspuren innerhalb kleiner Waldgebiete kartiert und klassifiziert (Lüscher et al. 2008, Bacher-Winterthaler und Becker 2009, Gaertig und Green 2009, Albu 2010).

1.3 Wirkungen von Bodenstrukturveränderungen auf das Baumwachstum

Bodenverdichtungen mit der Folge eingeschränkter Luftleitfähigkeiten können ein verringertes Wurzelwachstum von Bäumen bewirken (Korotaev, 1992 und Murach et al. 1993). Das Höhenwachstum von Bäumen kann sich dadurch ebenfalls reduzieren (Froehlich und McNaab 1983). Uhl (2008) stellte auch auf der Ebene ganzer Waldbestände Zusammenhänge zwischen bodenstrukturellen Parametern, die durch Kraffteinwirkung von Forstmaschinen verändert werden können, und dem Wachstum fest. Allerdings ist es schwierig, Zuwachseinbußen den Bodenverformungen durch Forstmaschinen zuzurechnen. Die den Fahrspuren nahe stehenden Bäume genießen meist mehr Licht, was Beeinträchtigungen im Wasserhaushalt und der Belüftung wohl teilweise kompensieren kann. Bodenverdichtungen können allerdings dazu führen, dass der Boden zwischen den Fahrspuren zumindest über einige Jahre kaum noch als Wurzelraum genutzt werden kann. In einem gemeinsam mit dem Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt und dem Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft der Technischen Universität München durchgeführten Befahrungsexperiment wurde der Wasserentzug aus dem Boden durch die Vegetation nach einer Holzerntemaßnahme drei Jahre lang beobachtet (Huber et al. 2011). Ein etwa 70-jähriger Fichtenbestand wurde mit einem Harvester durchforstet und die Stammstücke wurden mit einem Tragschlepper auf Rückegassen an die Forststraße transportiert. In dem Versuch sollte überprüft werden, ob es durch die Konzentration von Reisig auf den Rückegassen zu Nährstoffungleichgewichten kommen kann. Bei der maschinellen Holzernte werden die Bäume an der Rückegasse entastet und das Reisig dort konzentriert abgelegt, sofern es nicht für die Hackschnitzelherstellung entnommen wird. Im Reisig sind die Nährstoffgehalte höher als in den meisten anderen Baumkompartimenten. In jeweils fünffacher Wiederholung wurden Rückegassenabschnitte mit Reisig bedeckt bzw. von Reisig freigehalten. Durch die Befahrung kam es zu einer Sackungsverdichtung, die sich vor allem in einer Verringerung des Grobporenraums und der Luft- und Wasserleitfähigkeiten zeigte. Durch die Reisigmatte konnte eine Verdichtung des Bodens nicht gänzlich verhindert werden.

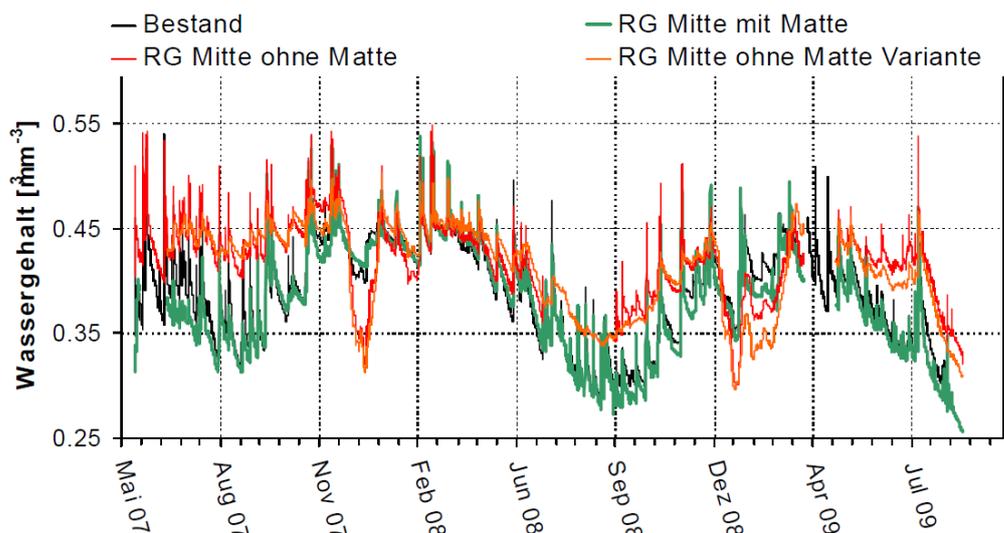


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf der Wassergehalte in 0-20 cm Tiefe im Bestand (Referenz), in der Mitte der Rückegasse mit und ohne Reisigauflage (Huber et al. 2011).

Zur Einschätzung der Funktionsfähigkeit der Feinwurzeln im Oberboden von Bestand und Rückegasse wurde mit ECH2O-Sonden der Bodenwassergehalt in den obersten 20 cm des Mineralbodens bestimmt. Bei allen fünf Wiederholungen wurden die Verhältnisse im Inneren des Bestands, an der Grenze Bestand/Rückegasse, in der Fahrspur und in der Mitte der Rückegasse zwischen den Fahrspuren mit je fünf Sonden an jedem Messort aufgezeichnet. Abbildung 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wassergehalte im Bestand (Referenz) sowie in der Mitte der Rückegassen. Auffällig ist der ähnliche Kurvenverlauf der mit Reisig bedeckten Rückegassen mit der Referenz. Bei Niederschlagsereignissen steigt der Wassergehalt zunächst stark an und geht infolge der Drainage der Grobporen ebenso schnell wieder zurück. Im Innern des Bestandes und auf der mit Reisig bedeckten Gasse sinkt der Wassergehalt danach während der Vegetationszeit bis zum nächsten Niederschlag weiter deutlich ab, während er auf den Rückegassen ohne Reisig kaum weiter zurückgeht. Dies dürfte im Fall der Reisigauflage auf einen stärkeren Wasserentzug über die Wurzeln durch Transpiration der Vegetation zurückzuführen sein.¹ Auch Dietrich (2011) stellte unter der Reisigauflage einer Rückegasse einen trockeneren Boden fest als in Abschnitten ohne Reisig.

Abbildung 2 zeigt sehr anschaulich die unterschiedlich starke Durchwurzelungsintensität von zwei Bodensäulen die nach der Befahrung entnommen, im Computer-Tomographen analysiert und anschließend wieder eingebaut worden waren. In der Bodensäule aus der mit Reisig bedeckten Fahrspur fanden sich zwei Jahre später fünf bis sechsmal mehr Wurzeln als in dem Boden ohne Reisigauflage.

¹ Die niedrigeren Wassergehalte auf den Rückegassen ohne Reisigauflage im Winter dürften auf Bodenfrost beruhen.



Abb. 3: Die Durchwurzelung von Bodensäulen zwei Jahre nach der Befahrung unter einer Fahrspur links ohne und rechts mit Reisigauflage (Fotos: Kremer)

Obgleich es mit Sackungsverdichtungen bis etwa 10 cm zu keinen schwerwiegenden Bodenverformungen gekommen ist, wurden ohne Schutz von Reisig die Wurzeln der randständigen Bäume offenbar gequetscht oder ab geschert. Über zumindest drei Vegetationsperioden hinweg konnten die Bäume den Bereich zwischen den Fahrspuren kaum als Wurzelraum wieder erschließen.

1.4 Auswirkungen auf die Befahrbarkeit

Tiefe Spurgleise behindern die weitere Befahrbarkeit von Rückegassen. Die Fahrer von Forstmaschinen neigen dazu, in solchen Fällen versetzt zu den Spurgleisen zu fahren. Dadurch wird der von Bodenverformungen betroffene Bereich zunehmend ausgedehnt.

1.5 Auswirkungen auf das Waldbild

Auf viele Waldbesucher wirken tiefe Spurgleise in den Wäldern abstoßend. Derartige Bilder sind häufig der Anlass für Kritik an der Forstwirtschaft durch die Medien. Um die gesellschaftliche Akzeptanz für die Waldbewirtschaftung nicht zu verlieren, sollte im Hinblick auf die Waldästhetik die Gleisbildung vermieden werden.

2 Vermeidung von Bodenschäden

2.1 Befahrene Fläche gering halten

Da sich Bodenverformungen beim Fahren auf natürlich gelagerten unbefestigten Waldböden selten ganz vermeiden lassen, sollte die befahrene Fläche möglichst gering gehalten werden. Es ist forstlicher Standard, dass Maschinen abseits der Forststraßen nur auf Rückegassen fahren. Rückegassen sind Schneisen, die in regelmäßigen Abständen, z.B. 20, 30 oder 40 m, in die Bestände geschlagen werden und als Fahrlinien dienen, ohne dass die Stöcke gerodet oder der Boden befestigt wird. Das Netz solcher Rückegassen bildet das Feinerschließungssystem eines Waldgebietes. Auf den Rückegassen werden Bodenstrukturveränderungen in Kauf genommen, solange die Gassen noch gut befahrbar bleiben, keine Erosion droht und das Waldbild nicht negativ beeinträchtigt wird (Erler et al. 2010). Die Rückegassen sollen dauerhaft genutzt werden, weshalb es zweckmäßig ist, wenn diese besitzübergreifend und unabhängig von der aktuellen Bestockung angelegt werden. Bislang gibt es noch keine befriedigenden Lösungen, um Rückegassen z.B. nach Sturmwürfen mit ausreichender Genauigkeit wiederaufzufinden. Derzeit arbeiten einige

Bundesländer daran, zumindest im Landeswald die Rückegassen kartographisch zu erfassen.

2.2 Organisatorische Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden

Um die Befahrbarkeit der Rückegasse zu erhalten, sollte im Zustand hoher Wassersättigung des Bodens grundsätzlich nicht gefahren werden (Borchert 2010). Bei der Beurteilung kann der Ausrolltest hilfreich sein. Ist der Mineralboden so trocken, dass er sich in der Hand nicht zu einer Wurst ausrollen lässt, kann die Rückegasse ohne Bedenken befahren werden. Lässt er sich ausrollen, ist eine Sackungsverdichtung zu erwarten. Bei der Fahrt sollte jetzt die Spurbildung beobachtet werden. Entstehen randliche Aufwölbungen entlang der Fahrspuren, sollte die Last verringert oder der Einsatz abgebrochen werden. Dabei kann der rein optische Eindruck einer Bodentragfähigkeit trügerisch sein: Er kann kurzzeitig vorgetäuscht werden, weil das Wurzelgeflecht die mechanische Belastung aufnimmt. Niemand kann jedoch einschätzen, wann dessen Tragfähigkeit überschritten wird. Häufig kommt es dann zum plötzlichen Einsinken der Maschine, weil das tragende Netz der Wurzeln reißt (Abb. 4). Ist eine Bodenprobe so nass, dass sie sich in der Hand nicht ausrollen lässt, sondern verschmiert, droht auf jeden Fall eine Gleisbildung. Ohne technische Vorkehrungen, die ein Einsinken bei Wasser gesättigtem Boden verhindern, sollte jetzt keine Maschine fahren.



Abb. 4: Gleisbildung auf einer Rückegasse, nachdem das tragende Wurzelgeflecht gerissen war.

Der Wassergehalt in Waldböden unterliegt charakteristischen saisonalen Schwankungen (Abb. 5). Obgleich der meiste Niederschlag in den Sommermonaten fällt, sinkt der Wassergehalt aufgrund der hohen Transpiration während der Vegetationszeit kontinuierlich ab. Gegen Ende der Vegetationsperiode erreicht er ein Minimum. Werden Holzerntearbeiten auf empfindlichen Standorten schwerpunktmäßig während dieser Zeit durchgeführt, treten unerwünschte Bodenverformungen seltener auf.

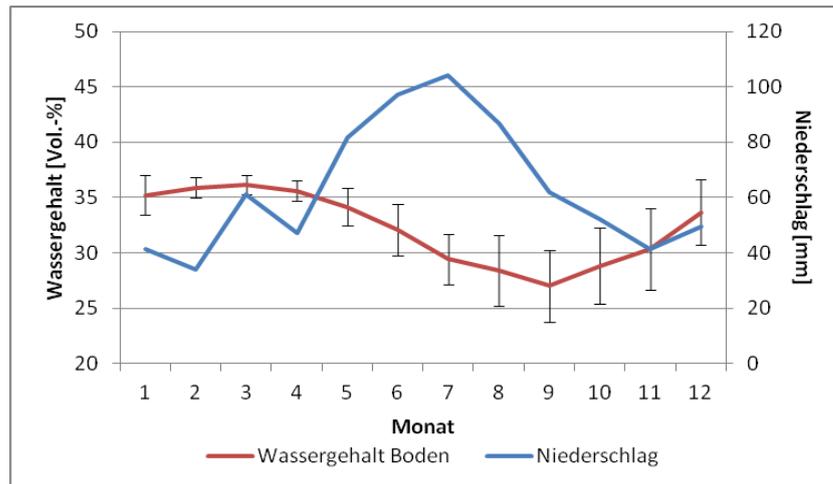


Abb. 5: Die mittleren monatlichen Wassergehalte eines Waldbodens an der Waldklimastation Freising im Zeitraum 2000 bis 2011 und ihre Standardabweichung sowie der mittlere Freiland-Niederschlag im selben Zeitraum.

Um teure Stillstandzeiten bei Forstmaschinen zu vermeiden, sollten Ausweichflächen vorgehalten werden. Dies ist naturgemäß in größeren Forstbetrieben leichter zu realisieren als in den meisten Privatwäldern mit den zumeist kleinen Waldgrundstücken. Werden die Holzerntemaßnahmen im „Kleinprivatwald“ durch die Forstbetriebsgemeinschaften organisiert, können die Maschinen auch dort eher standorts- und witterungsangepasst eingesetzt werden.

2.3 Technische Möglichkeiten zur Vermeidung von Schäden

Entsprechend der verschiedenen Ursachen für die Gleisbildung gibt es einerseits technische Möglichkeiten, die Last auf den Boden besser zu verteilen und andererseits Maßnahmen, um den Schlupf zu reduzieren (Borchert, 2010).

Die Last kann besser verteilt werden, indem die Aufstandsfläche der Maschine erhöht wird, z.B. durch eine größere Zahl von Rädern. Hier ist die Situation in Deutschland schon sehr günstig. Fast alle eingesetzten Tragschlepper (Forwarder) sind 8-Rad-Maschinen. Die meisten Vollernter (Harvester) sind mit sechs Rädern ausgestattet. Wichtig ist aber auch eine möglichst ausgeglichene Lastverteilung auf der Maschine zwischen vorne und hinten. Die in den letzten Jahren neu hinzugekommenen Tragschlepper sind tendenziell immer schwerer geworden. Darauf deutet die Auswertung des in der Forstlichen Unternehmerdatenbank der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft erfassten Maschinenbestandes nach Baujahren hin. Damit droht die Lastverteilung im beladenen Zustand immer ungünstiger zu werden.

Die Aufstandsfläche kann auch durch eine größere Dimensionierung der Reifen erhöht werden. Größere Reifendurchmesser verbessern zudem die Steigfähigkeit bei Hindernissen. Der Raddurchmesser wird an Bogieachsen jedoch durch den Abstand der beiden Räder begrenzt. Seit einigen Jahren werden zunehmend breitere Reifen verwendet. Die breitesten Reifen sind derzeit 940 mm bei einer Fahrzeugbreite von nur 3 m (Borchert et al. 2012). Ein beträchtliches Potenzial besteht noch beim Reifeninnendruck. Derzeit werden die Reifen meist mit sehr hohem Reifenfülldruck gefahren. Auf weichem Untergrund, wie er häufig im Wald vorkommt, könnte mit erheblich niedrigerem Luftdruck gefahren und damit die Aufstandsfläche erhöht werden. Gerade die Druckspitzen mittig unter den Reifen würden

dadurch erheblich reduziert. Reifendruckregelanlagen, die eine rasche Anpassung des Fülldrucks ermöglichen, sind anders als in der Landwirtschaft bei Forstmaschinen noch nicht im Einsatz. Bislang gibt es diese dort nur an Prototypen. Konstruktionsbedingt erfordern die meisten Forstreifen auch einen vergleichsweise hohen Fülldruck. Den Konstrukteuren ging es bisher vorrangig um eine große Widerstandsfähigkeit und Tragfähigkeit unter sehr schwierigen Geländebedingungen. Das Ergebnis sind sehr steife Reifen meist in Diagonalbauweise mit einem guten Flankenschutz, die einen recht hohen Fülldruck brauchen.

Eine weitere technische Möglichkeit, die Last besser zu verteilen, bieten Bogiebänder, wenn diese als sogenannte „Softbänder“ ausgestaltet sind. Bogiebänder sind Bänder von Stahlplatten, die über die je zwei Reifen einer Bogieachse aufgespannt werden und mit Spikes bestückt sind. Als Softbänder haben sie besonders breite Platten. Es gibt sie inzwischen auch aus Polyurethan und mit Hartgummi, was für die Wurzeln schonender ist. Nachteilig ist die geringe Traktion dieser Kunststoffbänder.

Eine erheblich bessere Lastverteilung wird möglich, wenn Raupenfahrwerke verwendet werden. Im Forst werden Harvester nicht selten damit ausgestattet. Die sehr schweren Harvester für die Starkholzernte und mit großer Kranreichweite sind durchweg Raupenfahrzeuge. Aber auch bei großer Hangneigung haben sich Raupenfahrwerke bewährt. Nachteilig sind die stärkeren Wurzelverletzungen, die durch Raupenfahrwerke verursacht werden. Obgleich Forwarder meistens die größere Gefahr für die Böden darstellen, sind Raupenfahrwerke dort komplett wieder vom Markt verschwunden. Die Gründe sind nicht ganz klar. Vermutlich sind es sowohl die höhere Fahrgeschwindigkeit der Radfahrwerke als auch die geringere Verschmutzung der Forststraßen, welche bei Tragschleppern den Ausschlag für den eindeutigen Vorzug der Radfahrwerke gegeben haben.

Es gibt auch verfahrenstechnische Möglichkeiten, die Lasten breitflächiger zu verteilen. Der Harvester kann die Bäume gezielt über der Rückegasse entasten, sodass eine Reisigmatratze als Fahrunterlage entsteht. Auch das Auslegen von Stammteilen als sogenannte Knüppeldämme dient diesem Zweck. Aufgrund des großen Holzbedarfs und Zeitaufwandes lohnen sich Knüppeldämme jedoch nur, um kurze problematische Gassenabschnitte zu überwinden.

Etlliche technische Maßnahmen an Forstmaschinen dienen dazu, die Traktion zu verbessern und den Schlupf zu reduzieren. Dazu zählen der Allradantrieb und das hydrostatische Getriebe. Auch die Traktionsprofile bei den Reifen mit ihren hohen Stollen und großen Zwischenräumen dienen diesem Zweck. Bei diesen Profilen wird allerdings die Last wieder stärker konzentriert und damit der Kontaktflächendruck auf den Boden erhöht. Softprofile mit deutlich flacheren Stollen und wenig Zwischenräumen verteilen die Last dagegen besser. Reicht bei diesen die Traktion nicht aus, können Bogiebänder mit hohen Stegen, sogenannte Traktionbänder aufgezogen werden. Sehr häufig werden auch Gleitschutzketten verwendet. Hilfreich wäre es, würden Forstmaschinen mit einer Anti-Schlupf-Regelung ausgestattet. Beim Einsatz von Tragschleppern am Hang werden immer häufiger Traktionsseilwinden verwendet, die das Durchdrehen der Räder verhindern. Dabei wird das Seil am Oberhang an einem Baum befestigt und je nach Fahrrichtung synchron mit dem Radantrieb eingezogen oder ausgelassen, womit es die Traktion der Maschine unterstützt (Abb. 6).



Abb. 6: Durch eine Seilwinde am Tragschlepper kann die Traktion bei Fahrten am Hang unterstützt werden.

2.4 Institutionelle Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenschäden

Mit verschiedenen institutionellen Maßnahmen kann dem Auftreten von Bodenschäden vorgebeugt werden. Durch Aus- und Fortbildung von Waldeigentümern, Forstpersonal und Forstunternehmern kann die Informationslage verbessert werden. Ein besseres Verständnis der Zusammenhänge versetzt diese Akteure in die Lage, Vermeidungsstrategien umzusetzen. Anreize werden geschaffen, wenn der Einsatz schonender Technik finanziell honoriert wird. Manche Forstbetriebe gewähren z.B. für den Einsatz von Bändern höhere Entgelte. Ein weiteres Instrument kann eine gerechte Risikoverteilung sein. Wenn die Risiken eines Auftrags für ein Forstunternehmen nicht kalkulierbar sind, werden immer wieder Situationen eines hohen Leistungsdrucks entstehen. In solchen Situationen werden die Grenzen einer schadlosen Befahrung leicht überschritten. Schriftliche Arbeitsaufträge mit protokollierten „Altschäden“, regelmäßige Kontrollen während der Einsätze und Abnahmeprotokolle am Schluss stärken die Verbindlichkeit der Akteure im Hinblick auf den Bodenschutz. Zudem bedarf es wirkungsvoller Sanktionsmechanismen, wie der drohende Ausschluss von Folgeaufträgen. Indem der Schadensverursacher die Kosten von Reparaturmaßnahmen tragen muss, werden diese Kosten internalisiert. Oft handelt es sich bei diesen Reparaturen um ein Glattziehen der Rückegassen mithilfe von Baggern (Wickel 2009). Ob dadurch die Tragfähigkeit wieder hergestellt wird, ist bislang nicht untersucht.

Literatur

- Albu, C. I. (2010):** Entwicklung und Test eines praxisorientierten Aufnahmeverfahrens zur flächigen Feinerschließungsqualität auf Waldflächen des Forstbetriebs Freising. Diplomarbeit an der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement der Technischen Universität München. 113 S.
- Bacher-Winterthaler, M.; Becker, G. (2009):** Die Wiederverwendung von „alten“ Befahrungslinien: Identifizierung von alten Befahrungslinien. In: Fakultät für Forst und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg u. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): Walderschließung und Bodenschutz. Freiburger Forstliche Forschung Heft 79. S. 25-38.
- Borchert, H. (2010):** In der Spur bleiben. Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. Lohnunternehmen Nr. 7, S. 32-34.
- Borchert, H.; Egner, J.-P.; Feist, H.; Wolf, M.; Prommersberger, J.; Diepold, A. (2012):** Vollmechanisierte Nadelholzernte auf befahrungsempfindlichen Standorten. In: Tagungsführer zur 16. KWF-Tagung 2012 Bopfingen. S. 73-77.

- Dietrich, K. (2011):** Auswirkungen einer Reisigauflage auf die Bodenfeuchte einer Rückegasse. Masterarbeit an der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden. 82 S.
- Erler, J.; Borchert, H.; Schack-Kirchner, H. (2009):** Ergebnisse des Arbeitskreises „Technisch-biologische Maßnahmen zur Wiederherstellung der Rückegasse“. Forsttechnische Informationen Nr. 9+10, S. 6-8.
- Gaertig, T.; Green, K. (2009):** Die Waldbodenvegetation als Weiser für Bodenstrukturstörungen. . In: Fakultät für Forst und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg u. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): Walderschließung und Bodenschutz. Freiburger Forstliche Forschung Heft 79. S. 83-105.
- Huber, C.; Borchert, H.; Kremer, J.; Matthies, D.; Göttlein, A. (2011):** Biomasse- und Nährelementverschiebungen bzw. -verluste bei Harvesterdurchforstungen und deren Auswirkungen auf Bodeneigenschaften und Stoffhaushalt von Waldökosystemen. Abschlussbericht (unveröff.).
- Kremer, J.; Wolf, B.; Matthies, D.; Borchert, H. (2007):** Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. LWF Merkblatt Nr. 22.
- Kremer, J. (2008):** Regenerationsvermögen befahrungsbedingter strukturveränderter Böden. LWFaktuell Nr. 67. S. 13-15.
- Lüscher, P.; Sciacca, S.; Thees, O. (2007):** Bestrebungen zur Verbesserung des Bodenschutzes in der Schweiz. LWF aktuell Nr. 67. S. 19-21.
- Lüscher, P.; Borer, F.; Blaser, P. (2009):** Langfristige Beeinträchtigungen der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: Thees, O.; Lemm, R. (Hrsg.) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich: vdf Hochschulverlag. 816 S.
- Uhl, E. (2008):** Bodenstruktur und Bestandeswachstum. LWF aktuell 67, S. 8-10.
- Weise, G. (2008):** Entwicklung und Einsatz von Forstreifen. LWF aktuell 67, S. 24-27.
- Wickel, F. (2009):** Erhaltung und Wiederherstellung der technischen Befahrbarkeit von Rückegassen. Bachelorarbeit an der Alberts-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaften. 76 S.

Zur Person:

Dr. Herbert Borchert

Abteilungsleiter Forsttechnik, Betriebswirtschaft und Holz

Die eigenen Forschungsschwerpunkte von Herbert Borchert liegen im Bereich der Forstökonomie. Im Bereich der Forsttechnik befasst er sich vor allem mit den Voraussetzungen für einen umweltverträglichen Maschineneinsatz bei der Waldbewirtschaftung.