

# 01.14

# Bodenschutz

19. Jahrgang  
1. Quartal 2014  
42234

[www.BODENSCHUTZdigital.de](http://www.BODENSCHUTZdigital.de)

**Erhaltung, Nutzung und  
Wiederherstellung von Böden**

**Organ des BVB**

## Inhalt

*Kuratorium Boden des Jahres*  
**Boden des Jahres 2014 – Weinbergsboden**

*Roland Bono, Nina von Albertini, Jean-Pierre Clement,  
Gregor Klaus und Markus Vogt*

**Bodenkundliche Baubegleitung:  
der Schweizer Weg**

*Norbert Feldwisch, Olaf Penndorf und Jörg Schneider*  
**Leitfaden Bodenkundliche Baubegleitung (BBB)  
des Bundesverband Boden (BVB)**

*Björn Marx, Bettina Stock, Carsten Schilli und  
Jörg Rinklebe*

**Übertragbarkeit von Erkenntnissen  
physikalischer Bodenschäden aus der  
Landwirtschaft auf Hochbaustellen**

*Andreas Lehmann*  
**Bodenschutz mit der DIN 19731 in der  
Baubegleitung**

*Claudia Schliemer und Hubertus von Dressler*  
**Fortbildung Umweltbaubegleitung**

# Übertragbarkeit von Erkenntnissen physikalischer Bodenschäden aus der Landwirtschaft auf Hochbaustellen

Björn Marx, Bettina Stock, Carsten Schilli und Jörg Rinklebe\*

**Björn Marx, M.Sc. Bodennutzung und Bodenschutz B.Sc. Umweltwissenschaften.**

Seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwassermanagement der Bergischen Universität Wuppertal. Arbeitsschwerpunkt Bodenschutz bei Baumaßnahmen.

**Bettina Stock, Dipl.-Umweltwissenschaftlerin, Architektin**

Studium der Architektur an der Fachhochschule Würzburg und der Umweltwissenschaften an der Universität Koblenz. Seit 2008 Mitarbeiterin im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

**Carsten Schilli, Dipl.- Geogr.**

Studium der Geographie an der Ruhr-Universität Bochum; ab 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stadtökologie und Bodenschutz, seit 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwassermanagement der Bergischen Universität Wuppertal.

**Jörg Rinklebe, Univ.-Prof. Dr. Ing. agr.**

Promotion in Bodenkunde 2004, 1997–2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Sektion Bodenforschung am Umweltforschungszentrum (UFZ) Leipzig-Halle, 2006–2010 Juniorprofessor, seit 2010 Universitätsprofessor für „Boden- und Grundwassermanagement“ im Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen der Abteilung Bauingenieurwesen der Bergischen Universität Wuppertal.

Zusammenfassung

**Über das Risiko ungewollter, negativer Beeinträchtigungen bodenphysikalischer Eigenschaften durch Bautätigkeiten beim Hochbau ist bisher wenig bekannt. Hingegen dazu sind aus der Landwirtschaft verschiedene Prozesse bekannt, die sich auf bodenphysikalische Eigenschaften nachteilig auswirken. Ein Vergleich landwirtschaftlicher und bauwirtschaftlicher Prozesse soll mögliche Auswirkungen der aktuellen Baustellenpraxis auf Böden aufzeigen. Exemplarisch wird dies für den Prozess der Befahrung dargestellt. Wichtige Erkenntnisse über die Persistenz von Schäden, die Relevanz der Radlast für die Tiefenwirkung und des Kontaktflächen-drucks für oberflächennahe Wirkungen lassen sich übertragen. Auf der Basis der Ansprüche an die Böden in der nachbaulichen Nutzungsphase wurden zusätzlich besonders sensible Bereiche auf Baustellen hinsichtlich des Schädigungspotentials definiert. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich des Kontaktflächen-drucks von Baufahrzeugen auf unbefestigtem Untergrund und der Auswirkungen der direkten Befahrung des Unterbodens. Die Ergebnisse zeigen, dass auf Baustellen im Hochbau ungewollte negative Beeinträchtigungen bodenphysikalischer Eigenschaften zu erwarten sind.**

◆ **Schlüsselworte: Vorsorgender Bodenschutz, physikalische Bodenveränderung, Baustelle, Bauprozesse, Arbeitsprozesse im Bauablauf, Verdichtung**

Summary

**Currently, little knowledge concerning the risk of undesired changes of soil physical properties due to building construction activities is available. However, comparable processes in agriculture and the current practice on construction sites leads to the expectation that those changes might occur. In agriculture, the persistence of soil compaction and the resulting problems are well known. In this article, we defined sensitive zones on construction sites which are influenced by compaction during construction process and where natural soil functions should be usable when the construction is finished. Agricultural processes which are well known for causing changes of physical soil properties were compared with those on construction sites in the defined zones. The process of driving was chosen as an example. The comparison includes typical vehicle data and driving scheme. In general, it seem feasible to transfer knowledge about im-**

portant processes such as persistence of compaction and relevance of wheel load for effects in the subsoil and contact pressure for effects on the top-soil. Future research is needed to determine the actual contact pressure beneath construction vehicles on soils as well as the effect of driving directly on the subsoil. Nevertheless, undesired and potentially harmful changes of physical soil characteristics due to construction works on construction sites can be assumed and should therefore minimized in the future.

◆ **Keywords: Soil protection, compaction, construction site, construction process**

1. Einleitung

Bisher liegen kaum wissenschaftliche Erkenntnisse über die durch Bauaktivitäten verursachten Veränderungen bodenphysikalischer Eigenschaften bei Hochbaumaßnahmen vor. Dennoch ist zu vermuten, dass es auf Baustellen des Hochbaus zu ungewollten Veränderungen der bodenphysikalischen Eigenschaften durch Bauprozesse kommt. Hinweise darauf liefern Erkenntnisse aus der landwirtschaftlichen Forschung. In der Landwirtschaft sind sowohl physikalische Veränderungen, wie auch zugrundeliegende Prozesse und Faktoren bereits erforscht und dokumentiert [1]. Insbesondere aus dem Ackerbau ist bekannt, dass diverse Prozesse physikalische Bodeneigenschaften beeinflussen und verändern können. Die Befahrung mit schwerem landwirtschaftlichem Gerät ist als ein potentiell schädlicher Prozess bekannt [2]. Auf Baustellen befahren ebenfalls schwere Maschinen den Boden. Aus der Praxis sind Fälle bekannt, bei denen nach Abschluss der Bauaktivitäten Stauwasserbildungen in Bereichen der späteren Außenanlage oder Versickerungsanlage festgestellt wurden [3]. Veränderungen und Schäden können auf die Befahrung der Böden bei Bautätigkeiten zurückgeführt werden [4]. Solche Schäden können die Folgenutzung einschränken und eine Sanierung erfordern [5]. Vor dem Hintergrund, dass bodenphysikalische Veränderungen wie Verdichtung langfristige Folgen sind, ist der unzureichende Schutz kritisch zu bewerten. Nach § 1 des BBodSchG sind wesentliche Ziele des Gesetzes, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen sowie schädliche Bodenveränderungen abzuwehren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen [6]. Ein Schutz vor physikalischen Bodenschäden dient nicht allein dem Boden und der Vegetation, auch das Bauwerk selbst kann durch Stauwasser als Folge von Verdichtung geschädigt werden. Essentiell für eine praktische Umsetzung, des vorsorgenden Bodenschutzes auf Baustellen ist die Kenntnis über zu schützende Bereiche gleichermaßen, wie über potentiell besonders schädliche Einflüsse. Ziel muss es sein, bestehende Erkenntnisse zu nutzen, um:

- ◆ potentiell schädliche Prozesse und sensible Flächen auf Baustellen zu identifizieren und
- ◆ zukünftig schädliche Prozesse zu minimieren sowie sensible Flächen zu schützen.

Dazu bieten sich insbesondere die Erkenntnisse der Landwirtschaft an, da hierzu einschlägige jahrzehntelange Forschungen vorliegen. Ziel des hier vorgestellten Projektes war es, die Übertragbarkeit solcher Erkenntnisse zu prüfen (AZ: SWD/F - 10.08.17.7–12.31).

\* Korrespondierender Autor

Einfluss einzelner Prozesse auf Bodenfunktionen		Bodenfunktionen							
		Natürliche Funktion			Archiv		Nutzung		
Prozesse	Einflüsse/Auswirkung	Lebensraum	Naturhaushalt/Regelungsfunktion	Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium	Natur- und Kulturgeschichte	Rohstofflagerstätte	Fläche für Siedlung und Erholung	Standort für die Landwirtschaft und Forstwirtschaft	Verkehr, Ver- und Entsorgung
<b>Bodenversiegelung</b>	Unterbindung von Stoffaustausch zwischen Boden und Atmosphäre	+	++	++	-	-	+	++	o
<b>Abschieben von Oberboden</b>	Gefügestörung, Durchmischung, Umschichtung, Verlust der Boden vitalität	++	++	++	+	-	+	++	-
<b>Stellflächen</b>	Statische Belastung, tlw. gezielte Verdichtung und Vermischung, Gefügestörung, Verlust der Boden vitalität	+	+	+	o	-	o	+	-
<b>Mischplätze</b>	Statische Belastung, tlw. gezielte Verdichtung und Vermischung, Gefügestörung, Verlust der Boden vitalität, Stoffeinträge	+	+	+	+	-	+	+	-
<b>Baustraßen</b>	Dynamische Belastung, gezielte Verdichtung, tlw. Vermischung Gefügestörung, Verlust der Boden vitalität	+	+	+	o	-	o	+	o
<b>Auskoffern</b>	Verlust des Bodenmaterials	++	++	++	++	++	-	++	-
<b>Aufbringen von Oberboden</b>	Gefügestörung, Durchmischung, Verdichtung (dynamische Belastung)	++	++	+	o	-	+	-	o
<b>Bodenmieten</b>	Verdichtung (statische Auflast), Gefügestörung, tlw. Durchmischung, Erosionsgefahr	++	++	++	o	-	+	+	-
<b>Befahrung</b>	Verdichtung (dynamische Belastung), Gefügestörung	++	++	++	o	-	o	+	-
<b>Bodenbearbeitung</b>	Gefügestörung, Umschichtung	+	+	o	o	-	-	-	-
<b>Einbringen von Substanzen</b>	Veränderung Bodenchemie und tlw. -physik	+	+	+	o	-	-	++	-

++ = deutlicher Einfluss    + = minimaler Einfluss    o = möglicher Einfluss    - = kein Einfluss

Tabelle 1  
**Bewertung des Einflusses von Bauprozessen auf einzelne Bodenfunktionen.**

## 2. Bewertung des Einflusses von Bauprozessen auf einzelne Bodenfunktionen

Zunächst wurden im Rahmen des Projektes mögliche Einflüsse von typischen Abläufen auf Baustellen (Prozesse) hinsichtlich ihres Einflusses auf einzelne Bodenfunktionen bewertet. Tabelle 1 zeigt die Stärke des erwarteten Einflusses typischer Prozesse von Baumaßnahmen im Hochbau auf die Bodenfunktionen. Besonders starke Einflüsse zeigen sich bei Prozessen, die im Bereich der Gebäudegrundflächen angesiedelt sind (Auskoffern, Versiegeln). Aber auch Prozesse wie das Abschieben und Aufbringen von Oberboden haben deutliche Einflüsse auf verschiedene Bodenfunktionen.

## 3. Definition von sensiblen Flächen auf Baustellen des Hochbaus

Auf Baustellen sind Flächen hinsichtlich der Auswirkungen von Bauaktivitäten unterschiedlich stark beeinflusst [7]. Die Ansprüche an den Boden und seine Funktionen in der Nutzungsphase, also nach Abschluss der Bautätigkeit sowie die zu erwartenden Einflüsse während der Bauphase müssen berücksichtigt werden, um eine Bewertung der Flächen hinsichtlich der potentiellen Auswirkungen der Bauaktivitäten durchführen zu können. Abbildung 1 zeigt einen schematischen Grundriss einer Baustelle. Dargestellt sind die Ansprüche an den Boden und seine Funktionen in der nachbaulichen Nutzungsphase (Abb. 1 links) und eine Einteilung der Flächen anhand des erwarteten Einflusses auf den Boden während der Bauphase (Abb. 1 rechts).

Für die Zeit nach Abschluss der Bautätigkeit können 2 Bereiche mit Ansprüchen an die Bodenfunktionen unterschieden werden (Abb. 1 links). Der schematische Grundriss einer Baustelle kann in eine Fläche mit dem Anspruch an die natürlichen Funktionen des Bodens (hellgrau) und eine Fläche mit dem Anspruch an die Nutzungsfunktion für bauliche Zwecke (schwarz) unterschieden werden.

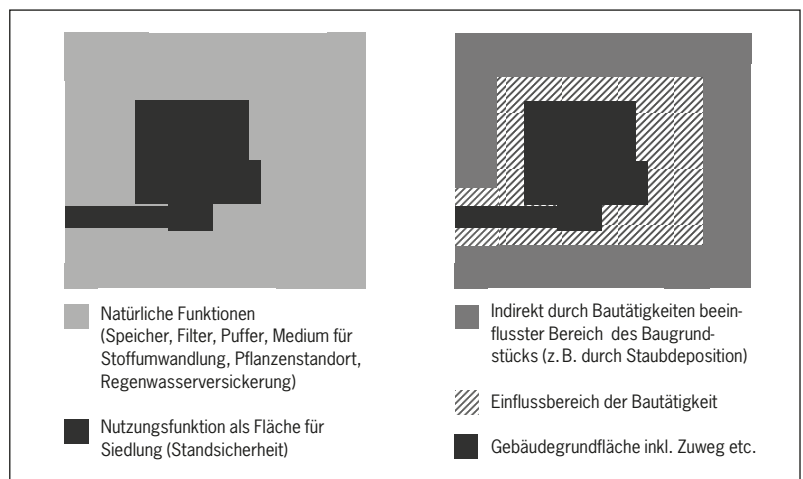


Abbildung 1  
**Schematischer Grundriss einer Baustelle; links mit Aufteilung der Fläche nach Ansprüchen an die Bodenfunktionen während der nachbaulichen Nutzungsphase; rechts mit Einteilung der Flächen nach erwarteten Einflüssen durch Bauprozesse auf den Boden während der Bauphase.**

Die schwarze Fläche (Abb. 1 links) mit den Ansprüchen während der nachbaulichen Nutzungsphase, ist deckungsgleich mit der schwarzen Fläche (Abb. 1 rechts), der Gebäudegrundfläche. Die bodenphysikalischen Eigenschaften dieser Fläche werden zur Sicherung der Standfestigkeit von Gebäuden, Zuwegen und sonstigen baulichen Anlagen bewusst beeinflusst und werden hier nicht weiter betrachtet. Auf dieser Fläche stehen die baulichen Interessen im Vordergrund und es besteht kein Anspruch an natürliche Bodenfunktionen. Die Fläche mit Ansprüchen an die natürlichen Bodenfunktionen in der nachbaulichen Nutzungsphase kann während der Bauphase in einen stark (Schraffur) und maximal indirekt (dunkelgrau) durch Bautätigkeiten beeinflussten Bereich unterteilt werden (Abb. 1 rechts). Die meisten Prozesse erfolgen möglichst nah am Gebäude, um die Laufwege kurz zu halten. Dies gilt für klassische Arbeitsbereiche sowie für die Anlieferung und Lagerung von Material, was eine Befahrung dieser Bereiche bedingt. In den dunkelgrau gekennzeichneten Bereichen, ist nur dann mit einem lediglich geringen, indirekten Einfluss auf den Boden zu rechnen (z. B. durch Staubdeposition), wenn sie wirksam gegen eine Benutzung z. B. mit Bauzäunen geschützt ist (Abb. 1 rechts). Bei engen Platzverhältnissen oder fehlender Abtrennung wird diese Fläche häufig von der schraffierten Fläche komplett überlagert. Der Fokus der vorliegenden Betrachtung liegt daher auch auf der schraffierten Fläche, die während der Bauphase durch Bauprozesse beeinflusst wird. Hier sollen die natürlichen Bodenfunktionen für die Nutzungsphase aufrechterhalten werden. Die relevanten Flächen auf Baustellen sind dementsprechend die Bereiche mit hoher Bauaktivität während der Bauphase und Ansprüchen an die natürlichen Bodenfunktionen in der nachbaulichen Nutzungsphase. Diese Flächen sollten durch Maßnahmen des vorsorgenden Bodenschutzes während der Bauphase so geschützt werden, dass die Ansprüche an die natürlichen Bodenfunktionen während der Nutzungsphase berücksichtigt werden können.

#### 4. Prozess im Ackerbau und auf Baustellen

In der landwirtschaftlichen Flächenbewirtschaftung und im Baustellenbetrieb sind Abläufe üblich, die als Phasen der Flächennutzung bezeichnet werden können. Innerhalb dieser Phasen treten regelmäßig wiederkehrende, häufig angewendete Tätigkeitsfolgen bzw. Vorgänge aus verschiedenen Arbeitsschritten oder Handlungen (im Folgenden: „typische Prozesse“) auf, die sich in den unterschiedlichen Phasen wiederholen können. Als Beispiel sei hier das Lagern von Erntegut oder Bodenmaterial in Mieten oder das Einrichten von Baustraßen genannt. In einem ersten Schritt wurden typische Phasen und Prozesse der landwirtschaftlichen Flächenbewirtschaftung identifiziert, von denen Auswirkungen auf bodenphysikalische Eigenschaften bekannt sind. Im Anschluss wurden in den Phasen des Baustellenbetriebs, gezielt Prozesse aus der Bauwirtschaft analysiert, die potentiell vergleichbar sein könnten und üblicherweise auf Baustellen ablaufen.

Tabelle 2 zeigt eine Auflistung typischer Prozesse in den verschiedenen Phasen der Bauwirtschaft und Landwirtschaft sowie deren Vergleichbarkeit untereinander. Auf Baustellen gibt es grundsätzlich Prozesse, die jenen im Ackerbau (Befahrung, Mieten, Bodenbearbeitung) ähnlich bzw. mit ihnen vergleichbar sind. Ein Großteil der Prozesse auf Baustellen weist jedoch nur geringe Ähnlichkeiten zu landwirtschaftlichen Prozessen auf.

Aufgrund der hohen Relevanz in beiden Bereichen, in Bau- und Landwirtschaft, wird der Prozess der Befahrung hier näher betrachtet. Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften von Böden durch schwere landwirtschaftliche Fahrzeuge sind bekannt. Auch die Baustellenpraxis zeigt, dass Böden der Baugrundstücke teilweise mit schweren Maschinen in hoher Frequenz befahren werden.

#### 5. Der exemplarische Vergleich des Prozesses Befahrung

Befahrung ist im Ackerbau ein zentraler Prozess, der mit vielen Bewirtschaftungsphasen verbunden ist.

Wirtschaftszweig	Phase	Prozess Bauwirtschaft	Prozess Landwirtschaft	Vergleichbarkeit
<b>Bauwirtschaft</b>	Baustelleneinrichtung	Baustraßen	–	nein
		Stellflächen	–	nein
		Mischplätze	–	nein
	Herrichten des Grundstückes	Abschieben von Mutterboden	–	nein
		Herstellen eines Planums	–	nein
	Bodenmieten	Mieten	teilweise	
	Aushub der Baugrube	Auskoffern	–	nein
	Außenanlagen	Aufbringen von Oberboden	–	nein
Beton- und Mauerarbeiten	Befahrung	Befahrung	ja	
	Versiegelung	–	nein	
<b>Landwirtschaft</b>	–	Auf-, Abtrag und Umlagern von Boden	Bodenbearbeitung	teilweise
	Sähen, Pflanzen	Befahrung	Befahrung	ja
	Düngen	Befahrung	Befahrung	ja
	Pflanzenschutz	Befahrung	Befahrung	ja
	Ernte	Befahrung	Befahrung	ja
	Lagerung in Mieten	Bodenmieten	Mieten	teilweise

Tabelle 2  
**Auflistung typischer Prozesse nach Phase und Einschätzung der grundsätzlichen Vergleichbarkeit.**

Hierbei ist eine mögliche Schädigung der Bodenstruktur dokumentiert [8]. Eine negative Beeinflussung der Bodenstruktur kann insbesondere eine Abnahme der

Versickerung und eine Verringerung des Gasaustausches durch Erhöhung der Dichte und Abnahme der Porenkontinuität bedeuten. Erosion, Stauwasser, Wurzel-

Maschinentyp	Leistung	Gewicht	Radlast (G)	Reifeninnen- druck (p <sub>i</sub> )	Bereifung	Kontaktfläche (A)	Kontaktflächen- druck (p <sub>k</sub> )
[Anzahl]	[kW]	[t]	[t]	[bar]	–	[cm <sup>2</sup> ]	[bar]
<b>Landtechnik</b>							
Schlepper klein (5)	≤ 50	3,8	1,0	0,8	240/70 R 16*	301,8	0,73
		–	–	–	–	–	–
		5,3	1,3	2,6	340/85 R 30	1632,7	3,09
		–	–	–	–	–	–
Schlepper mittel (24)	52	4,1	1,0	0,8	250/85 R 20*	322,2	0,59
		–	–	–	–	–	–
	83	8,5	2,3	2,8	540/65 R 34	2990	3,12
		–	–	–	–	–	–
Schlepper groß (20)	88	8,5	2,1	0,8	340/85 R 28	1849,5	0,63
		–	–	–	–	–	–
	330	23,6	7,1	2,8	800/70 R 38	7154,9	1,23
		–	–	–	–	–	–
Feldhäcksler (6)	315	11,4	2,9	0,6	540/65 R 28	3100,8	0,53
		–	–	–	–	–	–
	650	13,2	3,3	1,9	800/70 R 32	5314,4	0,91
		–	–	–	–	–	–
Mährescher (7)	116	8,3	2,1	0,6	500/60 – 22,5*	1099,9	0,51
		–	–	–	–	–	–
	261	13,5	3,4	2,4	900/60 R 32	6002,8	2,32
		–	–	–	–	–	–
Rübenernter (4)	220	19,8	4,9	1,8	650/75 R 32	5240,9	0,72
		–	–	–	–	–	–
	440	48,7	12,2	4,0	1050/50 R 32	10670,9	2,70
		–	–	–	–	–	–
Anhänger für Pflanzenschutzmittel oder Dünger (4)	–	6,1	3,1	2,0	340/85 R 48	2328,7	0,93
		–	–	–	–	–	–
		13,0	6,5	4,4	710/70 R 42	6826,4	1,62
		–	–	–	–	–	–
Ernteanhänger (5)	–	16,0	4,0	1,0	500/55–20*	1407,6	0,88
		–	–	–	–	–	–
		34,0	12,1	4,0	800/65 R 32	9369,9	2,79
		–	–	–	–	–	–
<b>Baufahrzeuge</b>							
Mobilbagger (17)	65	11	1,4	7	9.00–20	265 <sup>1</sup>	1,57
		–	–	–	–	–	–
	155	28	3,5	9	11.00–20	1069 <sup>2</sup>	7,10 <sup>3</sup>
		–	–	–	–	–	–
Radlader (16)	41	4	1	3	12.5–18	215 <sup>1</sup>	0,68
		–	–	–	–	–	–
	128	16	4	10	20.5 R 25	2639 <sup>2</sup>	7,80 <sup>3</sup>
		–	–	–	–	–	–
Baustellen-LKW (4)	184	18	3	–	315/70 R 22,5	562 <sup>1</sup>	2,49
		–	–	–	–	–	–
	420	22	6,5	7	315/80 R 22,5	1152 <sup>2</sup>	5,63 <sup>3</sup>
		–	–	–	–	–	–
Kipper (9)	160	10	1,4	6	235/75 R 17,5	257 <sup>1</sup>	1,51
		–	–	–	–	–	–
	350	40	5	7	315/80 R 22,5	1624 <sup>2</sup>	5,70 <sup>3</sup>
		–	–	–	–	–	–
Mobilkran (9)	205	24	–	7	385/95 R 25	930 <sup>1</sup>	2,04
		–	–	–	–	–	–
	500	108	6	9	525/80 R 25	2883 <sup>2</sup>	7,10 <sup>3</sup>
		–	–	–	–	–	–

\* für Felgendurchmesser < 24 Zoll:  $A = (0,260 \cdot B \cdot D) - (295,944 \cdot p) + (0,556 \cdot G)$   
für Felgendurchmesser ≥ 24 Zoll:  
bei **Diagonalreifen**:  $A = 100 \cdot G / (1,128 + [0,665 \cdot p] + [0,009 \cdot G] - [0,004 \cdot D])$   
bei **Radialreifen**:  $A = 100 \cdot G / (2,677 + [0,575 \cdot p] + [0,011 \cdot G] - [0,016 \cdot D])$  Formeln nach [12]  
<sup>1</sup> Minimalwerte bei Berechnung nach [13]  
 $A = 100 \cdot G / (2,677 + [0,575 \cdot p] + [0,011 \cdot G] - [0,016 \cdot D])$   
<sup>2</sup> Maximalwerte bei Berechnung nach [12]  
 $A = 100 \cdot G / (1,128 + [0,665 \cdot p] + [0,009 \cdot G] - [0,004 \cdot D])$  für **Diagonalreifen** mit Felgendurchmesser < 24 Zoll bzw. Außendurchmesser < 130 cm  
 $A = 100 \cdot G / (2,677 + [0,575 \cdot p] + [0,011 \cdot G] - [0,016 \cdot D])$  für **Radialreifen** mit Felgendurchmesser < 24 Zoll bzw. Außendurchmesser < 130 cm  
<sup>3</sup> Maximalwerte bei direkter Berechnung des Kontaktflächenendrucks nach [14]  
Kontaktflächenendruck = (Reifeninnendruck · 0,7) + 0,8 (für p<sub>i</sub> > 2,25 bar)  
A: Kontaktfläche [cm<sup>2</sup>], B: Breite [cm], D: Reifendurchmesser [cm], G: Radlast [t], pi: Reifeninnendruck [bar]

Tabelle 3  
**Auszug technischer  
Kenndaten häufig  
verwendeter Fahr-  
zeuge in der Land-  
wirtschaft und auf  
Baustellen, sowie  
daraus berechneter  
Kontaktflächen und  
-drücke [12] bis [40].**



hemnisse auf Grund hoher Lagerungsdichten, ungünstige Durchlüftungsverhältnisse sind neben erhöhtem Arbeitsaufwand mögliche Folgen [9]. Dies kann sich besonders bei einer späteren Nutzung von Flächen der Baustellen mit Anspruch an die natürlichen Bodenfunktionen negativ auswirken (vgl. Abb. 1 links).

Wie hoch die Gefahr für solche Schäden und Veränderungen ist, hängt im Wesentlichen von den auf den Boden einwirkenden mechanischen Kräften und der Tragfähigkeit des Bodens ab. Die einwirkenden mechanischen Kräfte werden maßgeblich durch die Radlast, den Kontaktflächendruck und das Befahrungsschema bedingt [10, 11]. Das Befahrungsschema umfasst Befahrvorgang, Überfahrvorgangshäufigkeit, Fahrgeschwindigkeit, Standzeiten und Dauer der Befahrung. Hohe Radlasten und hohe Kontaktflächendrücke haben ebenso wie intensive Befahrungsschemata (insb. hohe Überfahrvorgangshäufigkeit) ein großes Potential

### Befahrung ist auch auf Hochbaustellen ein Prozess mit hohem Schädigungspotential

nachteilige bodenphysikalische Veränderungen wie Verdichtung zu verursachen. Die Tragfähigkeit und Stabilität des Bodens hängen im Wesentlichen von Bodenart, Bodenfeuchte, Aggregation und Humus-

gehalt ab. Für den Vergleich der einwirkenden Last wurden zunächst typische Maschinen anhand üblicher Kenngrößen wie Gewicht, Bereifung etc. verglichen. Die Tabelle 3 zeigt ausgewählte Fahrzeugdaten von Fahrzeugen aus Land- und Bauwirtschaft.

In der Landwirtschaft werden viele verschiedene, teilweise hoch spezialisierte Fahrzeuge eingesetzt. Am häufigsten findet jedoch der vielseitig einsetzbare Schlepper Anwendung. Je nach Einsatzzweck variieren Größe und Leistung und damit weitere wichtige Faktoren wie Gesamtgewicht, Radlast und die möglichen Reifendimensionen der Schlepper. Neben den Schleppern sind, insbesondere im Ackerbau, die Erntemaschinen von großer Bedeutung. Die in der Landwirtschaft eingesetzten Maschinen haben bis zu 650 kW Leistung und wiegen bis zu 50 t, in Ausnahmefällen bis zu 60 t. Die Radlasten können mehr als 12 t betragen. Reifen mit bis zu einem Meter Breite werden verwendet, um diese Lasten auf den Boden zu übertragen und dabei möglichst geringe Reifennendrucke (0,6 bar) zu ermöglichen. Durch breite, hohe Reifen (Felgendurchmesser bis 34 Zoll) und geringe Reifennendrucke werden hohe Kontaktflächen (1 m<sup>2</sup>) erreicht. Die Kontaktflächendrücke liegen somit meist unter 3 bar.

Auf Baustellen werden ebenfalls eine Vielzahl von Maschinen eingesetzt (z. B. Radlader, Mobilbagger, Kipper u. v. m.). Der Großteil der Fahrzeuge hat ein Gewicht von unter 40 t und Radlasten von unter 6,5 t. Die Reifen haben häufig eine Breite von 30–40 cm und die Felgen einen Durchmesser von 20–25 Zoll. Diese Reifendimensionen bedingen üblicherweise eine Kontaktfläche von unter 0,3 m<sup>2</sup>. Folglich können die resultierenden Kontaktflächendrücke bei Baumaschinen teilweise über 7 bar erreichen. Die Berechnung der Kontaktflächen der Baumaschinenreifen ist mit Unsicherheiten behaftet. Die bestehenden Formeln wurden zur Berechnung von Reifen landwirtschaftlicher Fahrzeuge entwickelt und für Baumaschinen noch nicht validiert. In der Praxis wird stark vereinfacht angenommen, dass der Kon-

taktflächendruck dem Reifennendruck entspricht [41]. Die berechneten Kontaktflächendrücke scheinen demnach realistisch, da die Reifennendrucke häufig zwischen 7 und 9 bar liegen. Die Radlasten der Baumaschinen liegen in einer vergleichbaren Größenordnung wie jene der Landmaschinen im Ackerbau (üblicherweise < 7,1 t ausgenommen schwere Rübenernter und Ernteanhänger). Die Kontaktflächendrücke liegen bei Baufahrzeugen dagegen mit bis zu 7,8 bar deutlich über denen für Landmaschinen üblichen Kontaktflächendrücken (meist < 3 bar). Dies liegt primär an den verwendeten Reifen. Bei Baumaschinen werden häufig vergleichsweise schmale Reifen mit geringen Durchmessern verwendet, welche hohe Reifennendrucke erfordern, um die notwendige Tragfähigkeit zu erreichen. Breitreifen werden wegen höherer Kosten in Anschaffung, Verschleiß und Kraftstoffverbrauch bei Fahrzeugen, die auch für Transportarbeiten auf der Straße eingesetzt werden, derzeit nicht verwendet. Der Einsatz von Breitreifen und Reifendruckregelanlagen für Fahrzeuge die hauptsächlich auf Baustellen unmittelbar eingesetzt werden, sollte in Zukunft detaillierter untersucht und hinsichtlich ihrer Praktikabilität geprüft werden. Die Reifen sind bei Maschinen in der Landwirtschaft größer dimensioniert und sorgen somit für eine größere Lastverteilung. Der Vergleich zeigt, dass die Radlasten der untersuchten Fahrzeuge (Landwirtschaft: Ausnahme schwere Rübenernter und Großschlepper) grundsätzlich vergleichbar sind. Die verwendeten Formeln zur Berechnung der in Tabelle 2 angegebenen Kontaktflächendrücke sind größtenteils ursprünglich für Reifen von Landmaschinen konzipiert und nicht explizit für die Bereifung von Baufahrzeugen. Demnach besteht für die Kontaktflächendrücke bei Baufahrzeugen Forschungsbedarf [42, 43]. Dennoch kann aufgrund des höheren Reifennendruckes und der geringeren Reifendurchmesser erwartet werden, dass die Kontaktflächendrücke von Baufahrzeugen zumeist deutlich über denen der Maschinen im Ackerbau liegen.

Auch die Befahrungsschemata wurden im Rahmen des Projektes verglichen. Tabelle 4 zeigt, dass es insbesondere Unterschiede in der flächigen Verteilung und der Dauer der Befahrungsphase gibt. Die Befahrungshäufigkeiten auf Baustellen schwanken extrem je nach Art der Baustelle und Organisation der Befahrung des Baugrundstücks. Aus Erkenntnissen der Praxis ist bekannt, dass bei Betrachtung des üblichen Bauzeitraums vieler Baustellen (< 3 Jahren) die zu erwartenden Überfahrvorgangshäufigkeiten tendenziell deutlich über denen in der Landwirtschaft liegen [3]. Tabelle 4 zeigt zusammenfassend Ergebnisse aus dem Vergleich für den Prozess Befahrung.

6. Exemplarische Übertragung von Erkenntnissen für den Prozess Befahrung aus der Landwirtschaft in die Baustellenpraxis. Der Befahrungsprozess ist insbesondere hinsichtlich der Kenngrößen wie z. B. Gewicht, Achs- und Radlast sehr ähnlich. Einige Erkenntnisse sind für eine Übertragung geeignet.

◆ Der Prozess Befahrung hat langfristige Folgen (z. B. Verdichtung) für bodenphysikalische Eigenschaften [44].

	Faktor	Acker	Baustelle
Befahrungsschema	Radlast [t]	1–12,2 meist unter 7,1	1–6,5
	Kontaktflächendruck [bar]	0,51–3,59	0,61–7,80
	Befahrungsverteilung	Linienartig	Tendenziell flächig, Konzentration an Ein- und Ausfahrten sowie um die Gebäudegrundfläche
	Überfahungshäufigkeit	6–15 mal/Jahr	Unbekannt
	Fahrgeschwindigkeit	6–15 km/h	4 km/h
	Standzeiten	Unüblich	Häufig
	Dauer der Befahrung	Jahrzehnte	Gewöhnlich < 3 Jahren

Tabelle 4  
Ergebnisse für den Vergleich des Prozesses Befahrung.

- ◆ Der Kontaktflächendruck ist insbesondere für oberflächennahe Veränderung bodenphysikalischer Eigenschaften relevant [11, 45].
- ◆ Die Radlast ist besonders für die Tiefenwirkung relevant [46].
- ◆ Die Veränderungen, die durch den Prozess Befahrung im Boden verursacht werden, können durch angepasste Befahrungsschemata reduziert werden [5, 47].
- ◆ Die Persistenz von nachteiligen physikalischen Veränderungen im Unterboden ist wegen einer relativ geringen biologischen Aktivität besonders hoch [48].
- ◆ Der Nachweis einer Schadverdichtung erfordert die Anwendung verschiedener Methoden und setzt bodenkundliche Fachkenntnisse voraus [42]

#### 7. Grenzen der Übertragbarkeit

Durch die unterschiedlichen Arbeitsweisen in Bau- und Landwirtschaft ergeben sich Grenzen für die Übertragbarkeit. Im Gegensatz zur Landwirtschaft wird in der Bauwirtschaft meist der Unterboden befahren. In diesem Fall wirkt die Last direkt auf den empfindlichen Unterboden. Dort sind dann vergleichsweise größere Veränderungen zu erwarten, wenn der Oberboden nicht für einen gewissen Schutz sorgt. Dies bedeutet im Umkehrschluss nicht, dass Oberboden unbeschränkt befahren werden darf.

Die Erstbelastung ist hinsichtlich bodenphysikalischer Veränderungen besonders relevant. Das wiederholte (intensive) Befahren kann jedoch zu zusätzlichen negativen Veränderungen der Bodeneigenschaften führen.

Der Kontaktflächendruck ist bei gleicher Radlast bei Baumaschinen meist höher als bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Verlässliche Formeln zur Berechnung der Kontaktfläche gibt es bislang nur für breite Reifen mit großen Durchmesser, wie sie für landwirtschaftliche Fahrzeuge typisch sind [12]. Die Überprüfung der berechneten Werte der Baustellenfahrzeuge in der Praxis ist somit erforderlich, um die Berechnungen zu validieren.

#### 8. Fazit und Ausblick

Die Prozesse der Landwirtschaft sind nicht pauschal und unmittelbar auf die eines Baubetriebes übertragbar. Nach den bestehenden Erkenntnissen aus der Landwirtschaft sind dennoch auch auf Baustellen im Hochbau Veränderungen bodenphysikalischer Eigenschaften zu erwarten. Obwohl Kenntnisdefizite vorliegen ist anzunehmen, dass auch Prozesse auf Baustellen des

Hochbaus eine nachteilige Wirkung ausüben. Die intensive Befahrung und das Fahren auf dem Unterboden sowie ein hoher Kontaktflächendruck lassen erwarten, dass die negativen Folgen für den Boden erwartungsgemäß deutlich über dem Niveau derer der Landwirtschaft liegen. Eindeutig ist, dass die Gefährdung für konkrete Baumaßnahmen in der Praxis stark von der individuellen Ausprägung von Prozessen auf der Baustelle abhängig ist.

Für weitere Untersuchungen scheint es wichtig, detailliertere Kenntnisse über die spezifischen Eigenschaften der auf Baustellen eingesetzten Maschinen zu gewinnen. Zudem ist es wichtig, die allgemeinen Erkenntnisse über Befahrungsschemata auf Baustellen zukünftig zu quantifizieren und zu verifizieren. Für die Zukunft wäre zu prüfen, in wie fern bekannte Methoden (Messung der Saugspannung, Nomogramm) in Kombination mit einem angepassten Befahrungsschema auf Baustellen des Hochbaus anwendbar sind. Möglicherweise ergibt sich eine Vereinfachung des vorsorgenden Bodenschutzes durch Kooperation bei der Planung bauleistender Prozesse. Zudem stellt sich die Frage, in wie fern Bodenbelastungen auf Flächen konzentriert werden können, auf denen kein Anspruch an die natürlichen Bodenfunktionen besteht oder durch Krane eine Materialanlieferung erfolgen kann, die Auflasten auf den Boden in der Fläche vermeidet. Die Planung von Befahrung auf Baustellen wird bereits heute im Rahmen der Bauleistungsplanung, insbesondere unter beengten Verhältnissen, erfolgreich angewendet. Auf Baustellen wird häufig noch Oberboden abgetragen, um diesen vor Einflüssen zu schützen. Hier ist eine kritische Prüfung im Einzelfall nötig, ob der Schutz des Unterbodens dann noch ausreichend gewährleistet ist. Der Schutz des Oberbodens allein ist für den vorsorgenden Bodenschutz demnach nicht ausreichend, um den notwendigen Schutz der natürlichen Bodenfunktionen zu gewährleisten. Technische Anpassungen (z. B. Breitreifen, Reifendruckregelanlagen) wie sie bei landtechnischen Fahrzeugen bereits angewendet werden, scheinen für viele Baufahrzeuge häufig unpraktikabel und sind damit für eine Übertragung ungeeignet.

#### Förderung

Das Projekt „Ressourcenschutzpotenzial bei Baumaßnahmen bezüglich Boden“ (Az: SWD/F – 10.08.17.7-12.31) wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes ZukunftBAU des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung durchgeführt.

## Literatur

- [1] Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – A review. *Soil Use and Management* 25 (4). S. 335–345.
- [2] Zink, A., Fleige, H., Horn, R. (2009). Auswirkungen dynamischer Lasten landwirtschaftlicher Radfahrzeuge auf die physikalischen Eigenschaften von Lößböden. Böden – eine endliche Ressource. Jahrestagung der DGB. September 2009. Bonn.
- [3] Bundesverband Boden (2013). Bodenkundliche Baubegleitung BBB – Ein Leitfaden für die Praxis. BVB-Merkblätter. Band 2. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- [4] Rück, F., Reichel, A. und Schneider, O. (2011). Bodenzustand nach Erstellung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage in Südniedersachsen. Böden verstehen – Böden nutzen – Böden fit machen. 3.–9. September 2011. Berlin.
- [5] Lazar, S., Kaufmann, C., Hopp, M. (2009). Bodenschutz beim Bauen. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz. Recklinghausen
- [6] BBodSchG (Bundes-Bodenschutzgesetz) (1998). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten vom 17.3.1998. BGBl. I, S. 502–510.
- [7] Randrup, T. B. und Dralle, O. (1996). Influence of planning and design on soil compaction in construction sites. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 38. S. 87–92.
- [8] Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J., Guerif, J. (1999). Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil & Tillage Research* 51 (1–2). S. 151–160.
- [9] Raper, R. L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics* 42 (3–4). S. 259–280.
- [10] Canillas, E. C., Salokhe, W. M. (2001). Regression analysis of some factors influencing soil compaction. *Soil & Tillage Research* 61 (3–4). S. 167–178.
- [11] Lamande, M., Schjonning P. (2011). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil & Tillage Research* 114(2). S. 71–77.
- [12] Diserens, E. (2002). Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT). Nr. 582/2002. Tänikon.
- [13] Steiner, M. (1979). Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre des Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) 33. Dissertation. Technische Universität München.
- [14] Eymer, W., Oppermann, S., Redlich, R., Schürmann, M. (2006). Grundlagen der Erdbewegung. 2. Auflage. Kirschbaum Verlag, Bonn.
- [15] Amazone-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG (2013). Produkte – Technische Daten. Online: <http://www.amazone.de/maschinenlandtechnik-kommunaltechnik.asp>. (Stand: 16.04.2012).
- [16] Atlas Weyhausen GmbH (2013). Produktübersicht. Online: <http://www.atlas-weycor.de/atlas-weycor/radlader/produkte/index.php> (Stand: 08.05.2013).
- [17] Case IH (2013). Produkte Case IH Agriculture. Online: [http://www.caseih.com/de\\_de/Products/Pages/Produkte.aspx](http://www.caseih.com/de_de/Products/Pages/Produkte.aspx) (Stand: 16.04.2013).
- [18] Caterpillar (2013). Produktübersicht. Online: <http://deutschland.cat.com/maschinen/radlader> (Stand: 08.05.2013).
- [19] Claas Vertriebsgesellschaft mbH (2013). Produkte. Online: [http://www.claas.de/cl-pw/de/products/start, bpSite=43108, lang=de\\_DE.html](http://www.claas.de/cl-pw/de/products/start, bpSite=43108, lang=de_DE.html) (Stand: 16.04.2013).
- [20] Continental (2009). Technischer Ratgeber Landwirtschaftsreifen. CGS Reifen Deutschland GmbH, Hannover.
- [21] Hitachi Construction Machinery (2013). Produktübersicht. Online: <http://www.hcme.com/Products> (Stand: 08.05.2013).
- [22] Liebherr-International Deutschland GmbH (2013). Produktübersicht. Online: [http://www.liebherr.com/EM/de-DE/region-\(europe\)/products\\_em.wfwid-510-0/measure-metric](http://www.liebherr.com/EM/de-DE/region-(europe)/products_em.wfwid-510-0/measure-metric) (Stand: 08.05.2013).
- [23] Fendt (2013). Traktoren. Online: <http://www.fendt.com/de/default.asp> (Stand: 16.04.2013).
- [24] Gerling, U. (2011). 15 Tipps zum Dieselsparen. Trends – Praxis-Informationen für Landwirtschaft und Lohnunternehmen. Ausgabe 03.11. S. 16–17.
- [25] Goodyear (2011a). Produktblatt Optitrac H+. Goodyear Dunlop Tires Germany GmbH, Hanau.
- [26] Goodyear (2011b). Technisches Handbuch Farm und Industrie-/Baumaschinenreifen. Goodyear Dunlop Tires Germany GmbH, Hanau.
- [27] Holmer Maschinenbau GmbH (2013). Produkte – Rodetechnik. Online: <http://www.holmer-maschinenbau.de/produkte.html> (Stand: 16.04.2013).
- [28] John Deere GmbH & Co. KG (2013). Produkte. Online: [http://www.deere.de/wps/dcom/de\\_DE/products/product\\_by\\_name.page?](http://www.deere.de/wps/dcom/de_DE/products/product_by_name.page?) (Stand: 16.04.2013).
- [29] Kleine (2013). Produktübersicht – Rübetechnik. Salzkottener Maschinenbau GmbH, Salzkotten.
- [30] Komatsu (2013). Produktübersicht. Online: <http://www.komatsu-deutschland.de/> (Stand: 08.05.2013).
- [31] Manse (2013). Produktübersicht. Online: <http://www.man.eu/de/produkte-und-services/commercial-vehicles/man-lkw/MAN-Lkw.html> (Stand: 08.05.2013).
- [32] Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA (2011). Betriebsanleitung Landwirtschaftsreifen. Online: [http://www.michelin-online.de/agro/Betriebsanleitung\\_Doppelseiten\\_72dpi.pdf](http://www.michelin-online.de/agro/Betriebsanleitung_Doppelseiten_72dpi.pdf) (Stand: 16.04.2013).
- [33] New Holland (2013). Produkte. Online: <http://agriculture.newholland.com/Germany/de/Products/Pages/products.aspx> (Stand: 16.04.2013).
- [34] Nokian (2013). Technical Manual – Forestry Tyres. Online: [http://www.nokianheavytyres.com/files/nht/technical\\_manual/Nokian-HeavyTyres\\_Technical-manual\\_03\\_Forestry\\_15032013.pdf](http://www.nokianheavytyres.com/files/nht/technical_manual/Nokian-HeavyTyres_Technical-manual_03_Forestry_15032013.pdf) (Stand: 16.04.2013).
- [35] Ropa Fahrzeug- und Maschinenbau GmbH (2013). Produkte. Online: <http://www.ropa-maschinenbau.de/product/de> (Stand: 16.04.2013).
- [36] Scania Deutschland GmbH (2013). Produktübersicht. Online: <http://www.scania.de/trucks/construction/> (Stand: 08.05.2013).
- [37] Trelleborg Wheel Systems Italia S.p.A. (2012). Technical Manual. Online: <http://www.trelleborg.com/en/wheelsystems/Technical-Information/Technical-Manual/> (Stand: 16.04.2013).
- [38] Volvo Construction Equipment (2013). Produktübersicht. Online: <http://www.volvoce.com/CONSTRUCTIONEQUIPMENT/EUROPE/DE-DE/Pages/introduction.aspx> (Stand: 08.05.2013).
- [39] Wacker Neuson SE (2013). Produktübersicht. Online: <http://www.wackerneuson.de/de/produkte/detail/radlader-schaufelinhalt-07-18m3.html> (Stand: 08.05.2013).
- [40] Zeppelin Cat (2013). Produktübersicht. Online: <http://www.zeppelin-cat.de/produkte/bagger.html> (Stand: 08.05.2013).
- [41] VDI 6101 (2007). VDI Richtlinien – Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden – VDI 6101. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [42] Lebert, M., Brunotte, J., Sommer, C. (2004). Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. UBA-Texte 46/04. Berlin.
- [43] DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft) (2009). DLG-Merkblatt 356. Reifen richtig wählen und einsetzen. 1. Auflage. Frankfurt/Main.
- [44] Paul, R. (2004). Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbaulich genutzten Böden. Zwischenbericht 46.02./Bodendauerbeobachtungsflächen/Bodenschutzberatung. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt
- [45] Keller, T., Arvidsson, J. (2004). Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* 79 (2). S. 191–205.
- [46] Horn, R. (2002). Soil mechanical properties and processes in structured unsaturated soils under various landuse and management systems. *Sustainable Land Management – Environmental Protection* 35. S. 305–318.
- [47] Bochtis, D. D., Sorensen, C. G., Green, O. (2012). A DSS for planning of soil-sensitive field operations. *Decision Support Systems* 53 (1). S. 66–75.
- [48] Håkansson, I., Voorhees, W. B., Elonen, P., Raghavan, G.S.V., Lowery, b., Van Wijk, A.L.M., Rasmussen, K., Riley, H. (1987). Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil and Tillage Research* 10(3), S. 259–268.

## Anschriften der Autoren

### Bettina Stock

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Deichmanns Aue 31–37, 53179 Bonn

### Björn Marx, Carsten Schilli und Jörg Rinklebe

Bergische Universität Wuppertal, Boden- und Grundwasser-  
management, Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen,  
Department D, Pauluskirchstr. 7, 42285 Wuppertal.  
Tel. (02 02) 439 41 95  
[rinklebe@uni-wuppertal.de](mailto:rinklebe@uni-wuppertal.de)