

Teil II: Bewertung eines Vorschlages zur Ableitung von Vorsorgewerten gemäß der Bundes-Bodenschutzverordnung sowie der Pedotransferfunktionen zur Ableitung der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden)“ nach LEBERT (2008) als Grundlage zur „Identifizierung sensibler Gebiete“ i. S. der Bodenschutzrahmenrichtlinie (BSRRL) der Europäischen Kommissionen

Thomas Vorderbrügge* und Joachim Brunotte**

Part II: Appraisal of a proposal for deriving precautionary values for judging soil compaction according to the German federal soil protection act and of new pedotransfer function for identifying risk areas „compaction“ in Germany

Vorbemerkung:

Der folgende Text setzt die Nummerierung der Tabellen und Abbildungen aus Teil I fort, damit der direkte Bezug erhalten bleibt.

1 Einleitung

Ein großes Defizit der gesetzlichen Grundlagen des Bodenschutzes besteht in den immer noch fehlenden gesetzlichen Vorgaben zur Bewertung von Verdichtungen im Hinblick auf ihre Schadwirkung bzw. einer dadurch hervorgerufenen Beeinträchtigung der Bodenfunktionen (SRU, 2000; WBB, 2000).

Für die Einschätzung, ob eine Verdichtung als „schädlich“ im Sinne des §2 Abs. 3 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) (1998) einzustufen ist, benötigt der Bodenschutz eine Grundlage, die sowohl für die Fragen der §§6,7 und 17 des BBodSchG als auch des §12 der Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV, 1999) bundesweit abgestimmt und einheitlich anzuwenden ist (Vorderbrügge, 2004).

Für die Beurteilung einer schädlichen (stofflichen) Bodenveränderung hat der Gesetzgeber bundeseinheitlich das Prinzip der „Bodenwerte“ [Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte] eingeführt. Ein erster prinzipieller Vorschlag für die Ableitung von „Bodenwerten“ zur Beurteilung einer Bodenschadverdichtung liegt vor (Vorderbrügge, 2004). Ein weiterer Vorschlag von bodenartspezifischen bodenphysikalischen Vorsorgewerten, u. a. für die Vorbelastung, wurde jüngst von Horn et al. (2009) publiziert. Mit der Einführung eines Vorsorgewertes der Vorbelastung werden

bisherige allgemeine Aussagen einer Klassifizierung wie „geringe“, „mittlere“ oder „hohe“ Vorbelastung in das Werte- und Normsystem der Gesetzgebung überführt. Bei einer Überschreitung des Vorsorgewertes ist „in der Regel davon auszugehen, dass die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht“ (§8 Abs. 2 BBodSchG). Eine einheitliche Klassifizierung der Vorbelastung wäre aber auch eine wesentliche Grundlage bei der Ausweisung von Risikogebieten i. S. der Bodenschutzrahmenrichtlinie (BSRRL) der EU. Im Folgenden werden deshalb zunächst die bisher publizierten Klassifikationen der Vorbelastung vorgestellt, sowie deren Grenzen in Beziehung zu den von Horn et al. (2009) vorgeschlagenen Vorsorgewerten gesetzt. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der Nutzung der Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung für die Aufgaben des Vorsorgenden Bodenschutzes, insbesondere auch zu Möglichkeiten der Ausweisung von „risk areas“ auf Basis der BÜK 1000 N für das Bundesland Hessen.

2 Bewertung der Klassifizierungen der Vorbelastung sowie des Vorschlages von „Vorsorgewerten“ der Vorbelastung nach Horn et al. (2009)

Die bisher bekannten Ansätze einer Klassifizierung der Vorbelastung zeigt die Tabelle 20. Die Klassifizierungen nach DVWK 234 (1995); DIN-V-19688 (1998) sowie Lebert & Schäfer (2005) unterscheiden sich deutlich in den jeweils zugrunde gelegten Klassenbreiten bzw. den Maximalwerten: letztere reichen von 130 bis über 200 kPa.

Der Literatur ist nicht zu entnehmen, nach welchen Kriterien die Festlegung bzw. die Änderung der Klassengrenzen im

* Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dezernat Bodenschutz und Bodeninformationen, Rheingastr. 186, 65203 Wiesbaden; E-Mail: thomas.vorderbruegge@hlug.hessen.de

** Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, E-Mail: joachim.brunotte@vti.bund.de

Vergleich zu anderen Arbeiten begründet wird. Es ist nicht erkennbar, ob sie bodenfunktional bzw. -ökologisch wie z. B. an Grenzwerten der Durchwurzelbarkeit begründet wurden oder ob es sich um eine rein statistische Herleitung, d. h. auf Basis einer angenommenen Normalverteilung sowie der ermittelten Extrema handelt. Den Einfluss unterschiedlicher PTF bzw. unterschiedlicher Klassengrenzen auf die Aussage einer Karte

zur „Verdichtungsempfindlichkeit der Unterböden“ ist aber gravierend. Dies zeigen Ergebnisse von Hennings & Düwel (2009), die fünf Varianten zur Berechnung der Vorbelastung bzw. der Klasseneinteilung für die BÜK 1000 N (Richter et al., 2007) verglichen. Je nach Verfahren und Klassengrenzen ergaben sich völlig unterschiedliche prozentuale Flächenanteile für die 5 bzw. 6 Klassen der Vorbelastung (s. Tabelle 21).

Tabelle 20:

Klassen der Vorbelastung (Pv) in kPa und ihre Bezeichnung in Publikationen aus dem Zeitraum 1989 bis 2009

Quelle	Vorbelastung (Pv) in kPa	Klasse	Klassenbezeichnung
Horn et al. (1989) zit. von Schamp & Martin (1991)	< 40	1	sehr hoch verdichtungsempfindlich
	41 – 80	2	hoch verdichtungsempfindlich
	81 – 120	3	mittel verdichtungsempfindlich
	121 – 200	4	gering verdichtungsempfindlich
	> 200	5	kaum verdichtungsempfindlich
DVWK 234 (1995)	<30	1	very low (sehr geringe) mech. Vorbelastung
	31 - 60	2	low (geringe)
Horn & Fleige (2001)	61 - 90	3	mean (mittlere)
Horn et al. (2005)	91 - 120	4	high (hohe)
Stahl et al. (2005)	121 - 150	5	very high (sehr hohe)
Ad-hoc-AG Boden (2000)	> 150	6	extremly high (extrem hohe)
DIN V Norm 19688 (1988)	< 70	1	sehr geringe mechanische Belastbarkeit
Ad-hoc-AG Boden (1999)	71 - 90	2	geringe
Lebert et al. (2004)	91 - 110	3	mittlere
Müller (2004b)	111 - 130	4	hohe
GD NRW (2006)	> 130	5	sehr hohe
Paul (2004)	< 90	1	sehr geringe Druckbelastbarkeit bei pF 2.5 !!
	91 - 110	2	geringe
	111 - 130	3	mittlere
	131 - 150	4	hohe
	> 150	5	sehr hohe
Lebert Schäfer (2005)	< 40	1	äußerst hohe Empfind. für zusätzliche Verdicht.
Lebert (2008)	41 – 80	2	sehr hoch
	81 – 120	3	hoch
	121 – 160	4	mittel
	161 - 200	5	gering
	> 200	6	sehr gering
van den Akker & Hoogland (2009)	< 80	k. A.	Compression Strength, based on precompression stresses
	81 - 150	k. A.	
	151 - 200	k. A.	
	> 200	k. A.	
Strobel (1989)	k. A.	1	keine potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit
Müller (1997; 2004a)	k. A.	2	sehr geringe pot. Verdichtungsempfindlichkeit
Biakowski (2001)	k. A.	3	geringe pot. Verdichtungsempfindlichkeit
! Parameter ist die Setzungsempfindlichkeit (Sm) nach Horn (1981)!	k. A.	4	mittlere pot. Verdichtungsempfindlichkeit
	k. A.	5	hohe potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit
	k. A.	6	sehr hohe pot. Verdichtungsempfindlichkeit
	k. A.	7	äußerst hohe pot. Verdichtungsempfindlichkeit

Tabelle 21:

Klassenanteile der Vorbelastung in Prozent für fünf Varianten der Transferfunktionen bzw. der Klasseneinteilung für die BÜK 1000 N (Richter et al., 2007) - aus Hennings & Düwel (2009).

Variante	Verdichtungsempfindlichkeit in Prozent der Flächen für die Klassen 1 - 6				
	1 sehr gering	2 gering	3 mittel	4 hoch	5 + 6 sehr hoch + äußerst hoch
A	12,5	22,1	20,0	7,5	38,0
B	7,8	7,8	24,6	51,8	8,0
C	32,8	29,3	26,5	7,3	4,1
D	-	5,8	46,8	43,2	4,2
E	-	17,8	29,2	46,9	6,1

Betrachtet man die Summen für die Klassen 4 bis 6 (hoch bis äußerst hoch) bekommt man, je nach Methode und Klasseneinteilung (A = 46 %, B = 60 %, C = 11 %, D = 47 % und E = 53 %), Flächenanteile zwischen 11 und 60 %. Für die Aufgaben des Bodenschutzes ist dies nicht akzeptabel. Hennings & Düwel (2009) schlagen deshalb vor: „Im Hinblick auf die Ausweisung verdichtungsgefährdeter Flächen („Risk Area Assessment“) nach EU-Bodenrahmenrichtlinie sollte detailliert erläutert werden, nach welchen Kriterien und für welchen Anwendungszweck die Skala möglicher Vorbelastungen neu interpretiert und in Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit eingeteilt wurde“.

Allein die Festlegung der Grenzen hat bereits großen Einfluss auf die Aussage der thematischen Karten. Dies verdeutlichen die Abbildung 12a bis 12c. Je nach gewählter Klassenbreite (Abb. 12a 20 kPa, Abb. 12b 30 kPa, Abb. 12c 40 kPa) ist der Anteil der Werte mit einer Abweichung zwischen „geschätzt“ und „gemessen“ von 1, 2 oder mehr „Klassenbreiten“ sehr unterschiedlich.

Es ist deutlich zu erkennen, dass bereits die gewählte Klassenbreite die Aussagegenauigkeit der Ergebnisse bestimmt. Je größer die Klassenbreite desto geringer ist logischerweise auch der Anteil an Schätzwerten mit einer großen Abweichung (s. Tabelle 22). Alle drei Skalierungen werden in der Bundesrepublik angewendet. Für eine Vergleichbarkeit von Flächen bezogenen Aussagen muss die Herleitung der Klassengrenzen unbedingt erläutert werden, damit nicht der Eindruck einer gewissen Beliebigkeit entsteht, insbesondere dann, wenn man den Anspruch einer bundesweiten Gültigkeit der Methodik hat.

Den Arbeiten ist zudem nicht zu entnehmen, ob bzw. wie die Klassengrenzen gemäß den Vorgaben der Bodenschutzgesetzgebung abgeleitet wurden. Diese Frage gewinnt vor allem deshalb an Bedeutung, da in jüngeren Publikationen erstmals „test values“ (Horn & Fleige, 2009) bzw. „Vorsorgewerte“ (Horn et al., 2009) für die „Vorbe-

lastung“ vorgeschlagen wurden. Ob Horn & Fleige (2009) unter „test values“ Prüfwerte (eigentlich „trigger values“, BMU (1998)) oder tatsächlich Vorsorgewerte („precautionary values“) meinen, ist dieser Publikation allerdings nicht eindeutig zu entnehmen.

Tabelle 22:

Prozentuale Häufigkeit der Abweichung um Klassenbreiten zwischen Mess- und Schätzwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite

Klassenbreite in kPa	Abweichung um „n“- Klassen in Prozent		
	< 1 Klasse	1 – 2 Klassen	> 2 Klassen
20	31	29	40
30	47	29	24
40	60	25	15

Geht man von Vorsorgewerten aus, dann liegt nach Meinung der Autoren eine Überschreitung der Vorsorgewerte für Tone bei Werten von > 70 kPa, für Lehme bei Werten > 90 kPa und für Sande bei Werten > 130 kPa vor. Ein Wert für Schluffe wurde nicht vorgeschlagen. Diese Spezifizierung der Werte bzw. Klassengrenzen nach Bodenartenhauptgruppen (S, L, T) gibt es für die Klassifizierungen der Vorbelastung nach DVWK (1995) und DIN (1998) nicht.

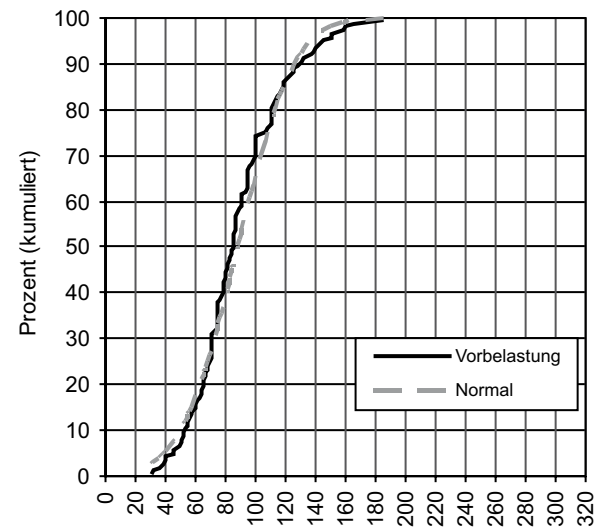


Abbildung 11:

Kumulative Verteilung der Messwerte der Vorbelastung (Linie durchgezogen) und die entsprechende kumulative Verteilung bei unterstellter „Normalverteilung“ der Messwerte (Linie gestrichelt) für die Bodenartenhauptgruppe Lehm

Im Folgenden wird zur richtigen Einordnung dieses Vorschlages am Beispiel der Messwerte aus der Literatur für die Bodenartenhauptgruppe Lehm aufgezeigt, wie viele der Werte den vorgeschlagenen Vorsorgewert überschreiten.

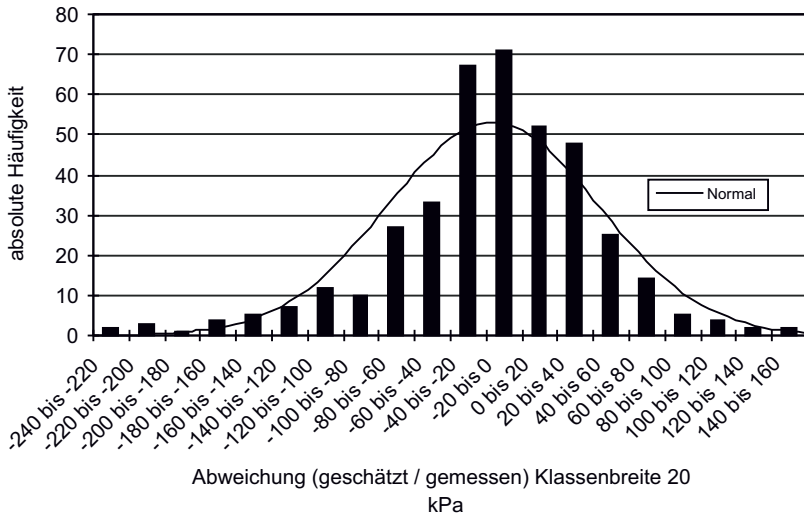


Abb. 12 a:
Häufigkeit der Abweichung der Schätzwerte von den Messwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite.
20 kPa gemäß DIN-V-19688 (1998)

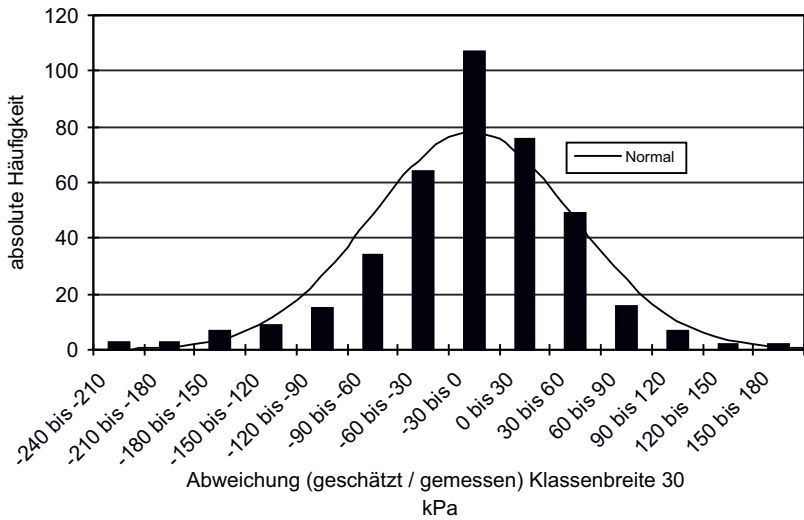


Abb. 12 b:
Häufigkeit der Abweichung der Schätzwerte von den Messwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite.
30 kPa gemäß DVWK (1995)

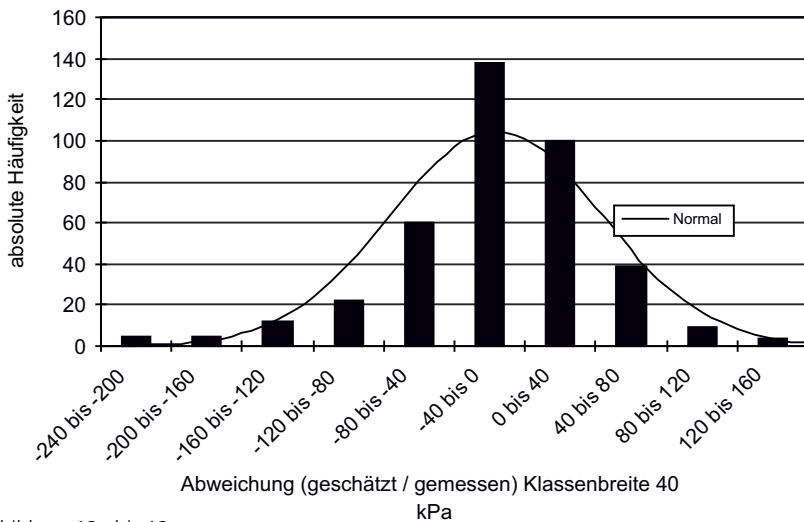


Abb. 12 c:
Häufigkeit der Abweichung der Schätzwerte von den Messwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite.
40 kPa gemäß Lebert (2008)

Abbildung 12a bis 12c:

Häufigkeit der Abweichung der Schätzwerte von den Messwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite (20, 30, 40 kPa) der Methoden nach a: DIN-V-19688 (1998), b: DVWK (1995) und c: Lebert (2008)

Hierzu kann die kumulative Verteilung der Messwerte betrachtet werden (s. Abbildung 11). Gibt man fünf Klassen mit jeweils 20 % Anteil vor, dann liegen die Grenzen bei den Werten 65, 80, 90, 110 und 130 kPa. Die Werte der „Normalverteilung“ liegen in einer ähnlichen Größenordnung (s. Tabelle 23). Hinsichtlich des vorgeschlagenen Vorsorgewertes von 90 kPa hätte man also in nahezu 40 % der Fälle eine Überschreitung des Vorsorgewertes.

Tabelle 23:
Theoretische Ableitung von Klassengrenzen der Vorbelastung in kPa auf Basis der Daten aus der Literatur

Unterboden Lehm	Anteil der Messwerte in % („durchgezogene“ Linie, Abb. 11)	Klassengrenze in kPa	Anteil der Werte in % bei einer Nvtlg. („gestrichelte“ Linie, Abb. 11)	Klassengrenze in kPa
Klasse 1	20	65	20	60
Klasse 2	40	80	40	80
Klasse 3	60	90	60	95
Klasse 4	80	110	80	110
Klasse 5a	90	130	90	125
Klasse 5b	100	> 130	100	> 125

Betrachtet man die Daten für die Bodenartenhauptgruppen Ton, Schluff und Sand nach dem in Abbildung 12 dargestellten Prinzip, dann bedeuten die von Horn & Fleige (2009) vorgeschlagenen Werte eine Überschreitung der Vorsorgewerte bei der Gruppe Ton für 80 % der Horizonte, bei Schluff (unterstellt man den Vorsorgewert für Lehm von 90 kPa) eine Überschreitung bei ca. 70 % und für Sand immerhin noch für 40 % der Horizonte (s. Tabelle 24).

Tabelle 24:
Theoretische Ableitung von Klassengrenzen der Vorbelastung in kPa auf Basis der Messdaten aus der Literatur, „fett und kursiv“ dargestellt die von Horn & Fleige (2009) vorgeschlagenen „Grenzwerte“

Anteil der Messwerte in %	Bodenartenhauptgruppe nach KA5				
	Sand	Schluff	Lehm	Ton	
Klasse 1	20	60	70	65	70
Klasse 2	40	90	100	80	90
Klasse 3	60	(130)	120	90	120
Klasse 4	80	160	150	110	150
Klasse 5a	90	250	200	130	170
Klasse 5b	100	> 250	> 200	> 130	> 170

Diese Tabelle gibt zusätzlich einen deutlichen Hinweis darauf, dass eine einheitliche, die Bodenartenhauptgruppen nicht differenzierende Klasse der Vorbelastung in fünf

gleiche Klassen mit einer einheitlichen Klassenbreite von 40 kPa eigentlich nicht plausibel ist, liegen doch z. B. die Werte für Lehme in der Klasse 4 bis 6 deutlich unter den Werten für Sande, Schluffe oder Tone.

Inwieweit bei dem Vorschlag von Horn & Fleige (2009) die gesetzlich definierten Anforderungen zur Ableitung von Wertekollektiven für die Beurteilung einer schädlichen Bodenveränderung gemäß den Vorgaben des Bodenschutzes (Vorderbrügge, 2004) berücksichtigt wurden, ist im Vorschlag der Autoren nicht zu erkennen. Auch wurde nicht dargestellt, wie mit diesen Werten der erforderliche Nachweis eines kausalen Zusammenhanges zwischen den Werten und dem Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung zu erbringen ist (Vorderbrügge, 2004). Hier besteht durchaus noch großer Klärungsbedarf. Weiter lässt dieser Vorschlag die Einschränkung der Gültigkeit auf Unterböden von ackerbaulich genutzten Standorten offen. Dies würde bedeuten, dass für die forstliche Nutzung, für Vorsorgeaspekte beim Auf- und Eintrag von Böden (§6 BBodSchG), für Fragen einer ordnungsgemäßen Rekultivierung (§12 BBodSchV) jeweils neue Wertekollektive nach einem normierten Verfahren festgelegt werden müssten. Wenn das aufgrund der spezifischen Eigenschaften solcher Standorte seitens der Methodik erforderlich ist, dann müsste es selbstverständlich umgesetzt werden. Entscheidend ist, dies rechtzeitig zu benennen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Vorsorgewerte ausschließlich für eine Nutzung (Ackerbau) etabliert werden, für andere, aus Sicht des Bodenschutzes ebenso wichtige Fragestellungen aber nicht. Daraus würden sich für den Bodenschutz große Probleme ergeben.

3 Abschließende Betrachtung

Der von Lebert (2008) vorgeschlagene Ansatz ist die siebte „Generation“ von Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Verdichtungsempfindlichkeit resp. der mechanischen Belastbarkeit seit der Arbeit von Horn aus dem Jahre 1981 (s. h. Tabelle 25). Im Laufe der Zeit wurde eine Vielzahl von Modifikationen, insbesondere in der Gruppierung der Bodenartenuntergruppen durchgeführt. Für die Fälle, in denen die Grunddaten für eine Schätzung mittels einer PTF nicht vorhanden sind, stehen Schätztabellen in Form einer Matrix zur Verfügung. Sie ermöglichen eine nominalskalierte Schätzung der Vorbelastung allein auf Basis der klassifizierten Rohdichte bzw. effektiven Lagerungsdichte und der Bodenartenuntergruppen.

Im Prinzip gilt: Je höher die Vorbelastung eines Horizontes, desto geringer ist bei einer weiteren mechanischen Belastung, z. B. durch Befahrung mit großen Lasten, die Wahrscheinlichkeit einer zusätzlichen, vor allem aber bleibenden Verformung des Gefüges. Gemäß dieser Theorie führen im Umkehrschluss Belastungen unterhalb der

Vorbelastung nicht zu einer bleibenden (plastischen) Gefügeveränderung. Der Grad der Vorbelastung bewertet somit eigentlich den mechanischen „Ist-Zustand“ eines Horizontes und nicht dessen ökofunktionale Eigenschaften bzw. potenzielle Änderungen in der Funktionalität. Die Vorbelastung wird auch als eine Art Summenparameter angesehen, der die bisherige Belastungsgeschichte (etwa durch Befahrung, Austrocknung etc.) ebenso wie die Wirkung zurückliegender Strukturierungs- als auch Lockerungsprozesse widerspiegelt (Sommel, 1993). Die Komplexität der Größe lässt sich schon allein an der Vielzahl der sie beeinflussenden bodeneigenen Faktoren leicht erkennen.

In der folgenden Übersicht werden die bestimmenden Faktoren (bodeneigene sowie exogene) der Vorbelastung angeführt (Horn, 1981; 1988; 2004; Lebert, 1989; Horn et al., 1991a; 2001; 2002; Horn & Lebert, 1992; Sommel & Horn, 1993; Wiermann, 1998).

Übersicht 1:

Bodeneigene sowie exogene Faktoren, die Einfluss auf die Höhe der Vorbelastung haben

<i>Bodeneigene Faktoren</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Korngrößenverteilung und -form, 2. Art (Typ) und Anteil der Tonminerale, 3. Art und Gehalt sorbierter Kationen, 4. Gehalt und Form organischer Substanz, 5. Gefügeform und Gefügestabilität (in Folge von Frost, Quellung und Schrumpfung), 6. biologische Aktivität, 7. Stabilisierung durch Wurzeln und organische Substanzen, 8. Stabilisierung durch anorganische Stoffe (z. B. Kalk, Fe-, Al-, Si-Oxide, Gips und Salze), 9. Aggregierungsgrad, Anordnung der Aggregate im Gefügeverband, 10. Trockenrohddichte, Aggregatdichte, Porengrößenverteilung, Porenform, Porenkontinuität, 11. Wassergehalt, Wasserspannung, Porenwasserdruck und der 12. Wasserleitfähigkeit.
<i>Exogene Faktoren</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Intensität der Belastung, 2. Art der Belastung (dynamisch/statisch), Intensität des Schlupfes, 3. Häufigkeit der Belastung, Häufigkeit einer Befahrung, 4. Zeitdauer der Belastung, 5. technische Merkmale (Kontaktfläche und Kontaktflächendruck, Reifeninnendruck, Radlast, Stollendruck), 6. Bewirtschaftungsweise, 7. Reliefeinfluss (Hangneigung) und die 8. Zeit.

Die Pedotransferfunktionen berücksichtigen allerdings nur einen Bruchteil der in der Übersicht angeführten Größen und bilden die Komplexität der Größe Vorbelastung somit eigentlich nur mangelhaft ab.

Die Methode zur Bestimmung im Labor ist mehr oder weniger normiert und in der einschlägigen Literatur (Hartge & Horn, 2009; Horn & Baumgartl, 2002; HBU, 2008) bzw. in den o. a. Publikationen ausführlich beschrieben.

Die Ergebnisse unterschiedlicher Autoren müssten bei übereinstimmender technischer Versuchsanstellung eigentlich vergleichbar sein; Ergebnisse über Ringversuche (normierte Zylinder, gleiche Entnahmebedingungen, gleiches Mess- und Auswertungsverfahren) mit mehreren Laboratorien sind den Verfassern allerdings nicht bekannt.

Die Bedeutung einer solchen Normierung lässt sich beispielhaft an Daten aus einer Publikation von Zink et al. (2009) aufzeigen. In einem Überfahrungsversuch mit typischen landwirtschaftlichen Maschinen (Achslast bis zu 7,8 t) auf zwei Kalkmarschstandorten untersuchten sie den Einfluss der Befahrung auf die mechanische Stabilität. Beprobte wurden drei Tiefen (25, 45 und 65 cm), die Vorbelastung wurde bestimmt nach Casagrande sowie mittels RETC. Erstaunlicherweise fanden sich am Standort 2 in allen 3 Tiefen nach der Befahrung niedrigere Werte der Vorbelastung als vor der Befahrung (s. Abbildung 13). Sowohl die Auswertung nach Casagrande als auch mittels RETC führten zum gleichen Sachverhalt.

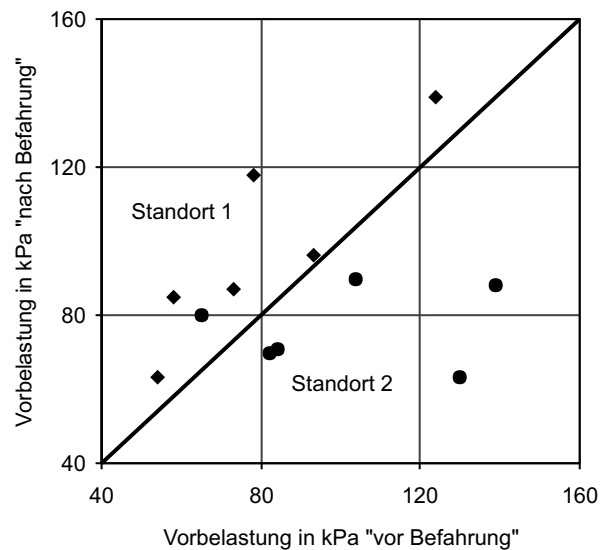


Abbildung 13:

Vergleich der Vorbelastungswerte für je drei Entnahmetiefen und zwei Bestimmungsmethoden aus einem Befahrungsversuch (zwei Standorte), ermittelt jeweils vor und nach einer Befahrung (eigene Darstellung mit Daten aus Zink et al., 2009)

Dieses unerwartete Ergebnis, bei dem eine Befahrung zu einer Wiederauflöckerung des Unterbodens geführt

hätte, dürfte eher mit der Art der Beprobung oder Laboranalytik als mit den tatsächlichen Vorgängen im Unterboden erklärbar sein.

Einen nicht geringen Einfluss auf das Ergebnis hat wohl auch die Erfahrung der Versuchsansteller bei der endgültigen Bestimmung, d. h. bei der grafischen Auswertung der Messdaten der Vorbelastung nach Casagrande (Rücknagel et al., 2007; 2010). Hier kann es bei gleichen Labordatensätzen durchaus zu deutlichen Unterschieden kommen. So ergaben die Untersuchungen von Rücknagel et al. (2010) für 13 Standorte bei einer grafischen Auswertung durch fünf erfahrene Personen maximale Fehler von 1 bis 57 kPa. Die maximalen Fehler bei einer Auswertung mittels mathematischen Modellen reichten von 10 bis 77 kPa. Methodische Fehler von ein bis zwei Klassenbreiten (DVWK Klassenbreite 30 kPa) sind somit nicht ganz auszuschließen.

Neben der Erfahrung des Labors kann das Ergebnis auch durch die Wahl des Auswertungsverfahrens (grafisch; RETC) beeinflusst werden. Dies lässt sich ebenfalls an den bereits angeführten Versuchen von Zink et al. (2009) aufzeigen. Die Auswertung erfolgte sowohl nach dem grafischen Verfahren gemäß Casagrande als auch mittels des RETC-Verfahrens nach van Genuchten. Vergleicht man die mit den zwei Verfahren ermittelten Daten (s. Abbildung 14), so zeigen sich deutliche Abweichungen, vor allem im Bereich höherer Werte (> 80 kPa nach RETC). Es ist aber keine systematische Unter- oder Überschätzung zu erkennen, die Hinweise auf Möglichkeiten einer rechnerischen Korrektur ergeben könnten.

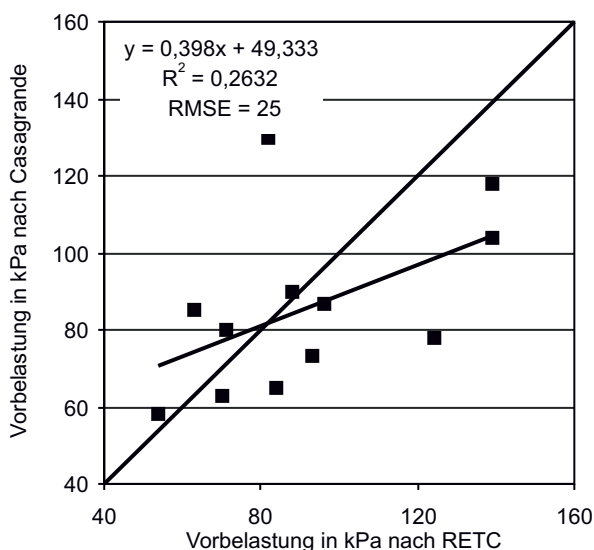


Abbildung 14:

Vergleich der Vorbelastungswerte von zwei Standorten mit je drei Entnahmetiefen für die zwei Bestimmungsmethoden Casagrande bzw. RETC (eigene Darstellung mit Daten aus Zink et al., 2009).

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen in ihren Untersuchungen auch Arvidsson & Keller (2004), Baumgartl & Köck (2004), Cavaleri et al. (2008), Clementino (2005), Keller et al. (2004) sowie Narra (2009). Es empfiehlt sich daher, die Verfahren der Auswertung zu harmonisieren und die Methoden der Bestimmung und Auswertung über Ringversuche, incl. einer Normierung durch und mit Messungen im Felde (Nolting et al., 2006), allgemeingültig zu beschreiben und zu vereinheitlichen. Zumindest die Fehler-toleranz der Methode wäre immer mit anzuführen, insbesondere dann, wenn belastbare Aussagen und der Einsatz der Methode für die Vorsorge im landwirtschaftlichen Bodenschutz (§17 BBodSchG) angestrebt werden.

Die Bestimmung der Vorbelastung im Labor für Flächen bezogene repräsentative Aussagen ist sehr aufwändig. Deshalb werden die Werte der Vorbelastung mittels Pedotransferfunktionen (PTF), d. h. mit Hilfe multipler Regressionsgleichungen, geschätzt. Die bis zum Jahr 2010 publizierten bzw. den Verfassern bekannten PTF sind in Tabelle 25 zusammengestellt.

Vom Prinzip her entsprechen sie alle dem von Horn (1981) gewählten Ansatz, sie unterscheiden sich nur in der Anzahl der zur Entwicklung der PTF genutzten Datensätze, der Anzahl der jeweils zu berücksichtigenden Parameter sowie der Art der Gruppierung der Eingangsdaten (bodenartbezogen oder tongehaltsbezogen). Eine substratbezogene Differenzierung gibt es bisher nicht.

Neben den Pedotransferfunktionen gibt es noch eine einfache Schätzung und zwar in Form einer Matrix mit Schätzwerten der Vorbelastung in Abhängigkeit von Bodenartengruppen und Klassen der Rohdichte (DIN, 1998; Hennings, 2001; Müller, 2004b) bzw. Klassen der effektiven Lagerungsdichte (Lebert, 2008).

Obwohl die ersten Transferfunktionen bereits vor 30 Jahren publiziert wurden, haben mit Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen bisher nur zwei Bundesländer dieses Thema systematisch aufgegriffen, die Methode in die Methodenbanken ihrer Bodeninformationssysteme aufgenommen und eine landesweite Auswertung vorgelegt (GD NRW, 2006; Biakowski, 2003; Müller, 1997; Müller, 2004a; 2004b; Lebert & Schäfer, 2005). Für Thüringen (Paul, 2004; Paul & Fettisov, 2007) gibt es eine landesweite Anwendung mit Aussagen zur Druckbelastbarkeit und zur Schadverdichtungsgefährdung (für ca. 42 % der Landesfläche bestehen demnach Schadverdichtungsrisiken) auf Basis einer leicht modifizierten Anwendung der Regressionen nach DVWK (1995). Die Ergebnisse einer „recht guten Übereinstimmung“ zwischen Schätzung und Messung sind für Thüringen für 6 Horizonte (0 bis 30 cm und 30 bis 40 cm) publiziert (Paul, 2004). Für Bayern gibt es eine Testanwendung für zwei Blätter (Schamp & Martin, 1996). Auch die Erstellung der DIN-V-19688 (1998) hat noch nicht dazu geführt, dass eines dieser Verfahren im Vorsorgenden Bo-

denschutz bundesweit anerkannt und weit verbreitet eingesetzt wird. Gründe hierfür finden sich in den Arbeiten von Schwertmann et al. (1990), Dürr et al. (1995), Frielinghaus et al. (1997), Sommer (1998), Van den Akker (1999), Nissen (1999), Quasem et al. (2000), Feldwisch (2000), Schäfer-Landefeld & Brandhuber (2001a, 2001b), Biakow-

ski (2001), Gysi (2001a, 2001b), Lebert et al. (2004), Keller et al. (2005), Cramer (2006), Cramer et al. (2006), Keller & Arvidsson (2006), Lebert (2008), Keller et al. (2009) und Schjønnning et al. (2009). In vielen dieser Arbeiten wird u. a. auf die nicht zufriedenstellende Reproduzierbarkeit der Daten bzw. ihre große Streuung hingewiesen.

Tabelle 25:

Pedotransferfunktionen zur Bestimmung der Vorbelastung in der Fachliteratur in der Reihenfolge ihrer Publikation

Quelle	Anzahl der Profile und ihre Herkunft	Anzahl der Pedotransferfunktionen (PTF) in der Publikation	Anzahl der Datensätze mit Angaben zu Vorbelastung bzw. Ermittlung der PTF	Anzahl der zu berücksichtigten Parameter bei den PTF 1 – n.	Grundlage der Gruppierung; Anzahl der Bodenarten; Grenze Tongehalt	Angaben zum Gültigkeitsbereich	Bestimmtheitsmaße (r^2)
Horn (1981)	8 Berlin und Niedersachsen	10 PTF mit Fallunterscheidung nach Tongehaltsunterschieden	33 für 10 Bodenartenuntergruppen, mittels PTF abgeleitet wurde aber die Setzungsziffer (S_m)	PTF 1: 8; PTF 6: 6 PTF 2: 7; PTF 7: 6 PTF 3: 8; PTF 8: 5 PTF 4: 5; PTF 9: 4 PTF 5: 4; PTF 10: 4	4 Gruppen nach Tongehalt (< 10, 20, 45, > 45 %)	ebene Standorte	0,4900 bis 0,9801
Leber (1989), Horn et al. (1991a)	37 Bayern	11 PTF für pF 1,8 und 2,5, nochmals differenziert durch Berücksichtigung der Gefügeparameter: Winkel der inneren Reibung = \emptyset und der Kohäsion = Koh.	118 für 17 Bodenartenuntergruppen nach KA3 bzw. 20 nach heute gültiger KA5	PTF 1: 7; PTF 2: 4; + \emptyset und Koh. PTF 3: 3; - \emptyset und Koh. PTF 4: 7; + \emptyset und Koh. PTF 5: 5; - \emptyset und Koh. PTF 6: 8; + \emptyset und Koh. PTF 7: 6; - \emptyset und Koh. PTF 8: 6; + \emptyset und Koh. PTF 9: 4; - \emptyset und Koh. PTF 10: 7; + \emptyset und Koh. PTF 11: 5; - \emptyset und Koh.	5 Gruppen: nach Bodenartenhauptgruppe und Tongehalt; Sande, sandige Lehme, Schluffe sowie Tone und lehmige Tone mit < 35 % T bzw. > 35 % T	Sande dB > 1.3 g/cm ³ und org. Subst. < 3 %; sandige Lehme dB > 1.10 g/cm ³ und org. Subst. < 5 %; Schluffe dB > 1.2 g/cm ³ und org. Subst. < 3 %; Tone und tL bei < 35 % T org. Subst. < 4.5 % falls dB < 1.35 g/cm ³ ; Tone und tL > 35 % T falls org. Subst. > 10 % muss dB > 0,7 g/cm ³ sein	0,3700 bis 0,8280
DVWK (1995)	k. A.	5 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	k. A.; zitiert wird Horn et al., 1991a; übernommen wurden die PTF Nr. 2, 4, 6, 8 und 10 aus Horn et al., 1991a	PTF 1: 4 PTF 2: 7 PTF 3: 8 PTF 4: 6 PTF 5: 7	5 Gruppen erweitert von 17 (Horn et al., 1991a) auf 23 Bodenartenuntergruppen: 1.) Ss, Su, Slu, Sl, St2, 2.) St3, Ls 3.) Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3 4.) Lu, Ut4, Lt2, Ts4, 5.) Lt3, Tu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, Tt	Gehalt an organischer Substanz < 15 %; ebene Flächen d. h. < 2% Gefälle	k. A.
DVWK (1997)	30 aus 8 Bundesländern	7 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenhauptgruppen	k. A.; zitiert wird Nissen (1999); übernommen wurden die PTF Nr. 2 und 3 aus Nissen (1999)	PTF 1: 5; PTF 6: 4 PTF 2: 5; PTF 7: 5 PTF 3: 5; PTF 4: 4; PTF 5: 4;	7 Bodenartenhauptgruppen: Gesamt; Sande und Schluffe; Lehme und Tone: (L + T < bzw. > 35 % T)	k. A.	0,4330 bis 0,8890
Nissen (1999)	25 aus 8 Bundesländern	6 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenarten und Tongehalt	78 für 22 Bodenartenuntergruppen	PTF 1: 5; PTF 6: 4 PTF 2: 5; PTF 7: 5 PTF 3: 5; PTF 4: 4; PTF 5: 4;	Bodenartenhauptgruppen: Sande und Schluffe; Lehme und Tone; Sande und Schluffe; LT < 35 % T; LT > 35 % T	k. A.	0,4330 bis 0,8890

Fortsetzung Tabelle 25:

Quelle	Anzahl der Profile und ihre Herkunft	Anzahl der Pedotransferfunktionen (PTF) in der Publikation	Anzahl der Datensätze mit Angaben zu Vorbelastung bzw. Ermittlung der PTF	Anzahl der zu berücksichtigten Parameter bei den PTF 1 – n.	Grundlage der Gruppierung; Anzahl der Bodenarten; Grenze Tongehalt	Angaben zum Gültigkeitsbereich	Bestimmtheitsmaße (r ²)
DIN-V-19688 (1998)	k. A.	3 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	k. A.	PTF 1: 5 PTF 2: 4 PTF 3: 6	3 Bodenartenuntergruppen: 1.) Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Slu, Us, Uu, Uls, Ut2, Ut3 2.) Ss, St2, Sl4, Ls4, Ls3, Ls2, Lu, Ut4, Tu4 3.) St3, Ts4, Ts3, Ts2, Lts, Lt2, Lt3, Tu3, Tu2, Tl, Tt	mäßig schwach geneigt (< 2 % Gefälle), bei mittlerer Hangneigung muss Neigung berücksichtigt werden; PTF1: dB > 1.30 g/cm ³ Corg < 3 M.-%; PTF2: dB > 1.30 g/cm ³ und Corg < 3 M.-%; PTF3: dB < 1,85 g/cm ³ und Corg < 10 M.-%	k. A.
DIN-V-19688 (1998)	k. A.	Schätztabelle in Form einer Matrix	k. A.	Trockenrohddichte (dB) - 3 Klassen und Bodenartenuntergruppen	k. A.	3 Klassen der dB gemäß AG Boden (1994)	k. A.
Ad-hoc-AG Boden (1999)	k. A.	3 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenarten	k. A.	PTF 1: 5 PTF 2: 4 PTF 3: 6	3 Bodenartenuntergruppen: 1.) Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Slu, Us, Uu, Uls, Ut2, Ut3 2.) Ss, St2, Sl4, Ls4, Ls3, Ls2, Lu, Ut4, Tu4 3.) St3, Ts4, Ts3, Ts2, Lts, Lt2, Lt3, Tu3, Tu2, Tl, Tt	ebene Lage, bei geneigten Flächen (> 9 %) Berücksichtigung Hangneigungsfaktor; Projektkarten im Maßstab 1:5.000 bis 1:10.000	k. A.
Ad-hoc-AG Boden (1999)	k. A.	Schätztabelle in Form einer Matrix	k. A.	Trockenrohddichte (dB) - 3 Klassen und Bodenartenuntergruppen	k. A.	3 Klassen der dB gemäß AG Boden (1994)	k. A.
Ad-hoc-AG Boden (2000)	k. A.	5 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	k. A.	PTF 1: 4 PTF 2: 7 PTF 3: 8 PTF 4: 6 PTF 5: 7	5 Gruppen erweitert von 17 (Horn et al., 1991a) auf 31 Bodenartenuntergruppen: 1.) Ss, Su2-Su4, Slu, Sl2-Sl4, St2 2.) St3, Ls2-Ls4 3.) Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3, 4.) Lu, Ut4, Tu4, Lt2, Ts4 5.) Lt3, Tu2-Tu3, Lts, Ts2, Ts3, Tl, Tt	k. A.	k. A.
Hennings (2001)	k. A.	3 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	154	PTF 1: 5 PTF 2: 4 PTF 3: 6	Klassenbildung der mittels einer einheitlichen (aber nicht angeführten) PTF errechneten Vorbelastung	dB, Gehalt an organischer Substanz,	0,4900 0,5000 0,6100

Fortsetzung Tabelle 25:

Quelle	Anzahl der Profile und ihre Herkunft	Anzahl der Pedotransferfunktionen (PTF) in der Publikation	Anzahl der Datensätze mit Angaben zu Vorbelastung bzw. Ermittlung der PTF	Anzahl der zu berücksichtigten Parameter bei den PTF 1 – n.	Grundlage der Gruppierung; Anzahl der Bodenarten; Grenze Tongehalt	Angaben zum Gültigkeitsbereich	Bestimmtheitsmaße (r ²)
Hennings (2001)	k. A.	Schätztabelle in Form einer Matrix	k. A.	Trockenrohdichte (dB) - 3 Klassen und Bodenartenuntergruppen	Klassenbildung der mittels der drei PTF nach Hennings (2001) errechneten Vorbelastung (Pv)	Klassen der dB gemäß AG Boden (1994)	k. A.
ATV-DVWK (2002)	k. A.	2 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenhauptgruppen	k. A.	PTF 1: 5 PTF 2: 5	2 Bodenartenhauptgruppen		k. A.
ATV-DVWK (2002)	k. A.	Empirische Schätztabelle für Werte der Vorbelastung (Unterboden)	k. A.	Sande und Schluffe 106 kPa als fixer Wert Lehme und Tone 76 kPa als fixer Wert	6 bzw. 7 Bodenartenuntergruppen in 2 fixen Gruppen Sande und Schluffe: Ss, Slu, Sl3, Su3, Ut3, Ut4 Lehme und Tone: Ls3, Ls4, Lt2, Lt3, Tu3, Tu4, Tl		k. A.
Müller (2004b)	k. A.	3 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	k. A.	PTF 1: 5 PTF 2: 4 PTF 3: 6	3 Bodenartenuntergruppen: 1.) Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Slu, Us, Uu, Uls, Ut2, Ut3 2.) Ss, St2, Sl4, Ls4, Ls3, Ls2, Lu, Ut4, Tu4 3.) St3, Ts4, Ts3, Ts2, Lts, Lt2, Lt3, Tu3, Tu2, Tl, Tt	ebene Lage, bei geneigten Flächen (> 9 %) Berücksichtigung Hangneigungsfaktor; Projektkarten im Maßstab 1:5.000 - 1:10.000 Neigungsstufe ≤ N2	k. A.
Müller (2004b)	k. A.	Schätztabelle in Form einer Matrix	k. A.	dB (3 Klassen) und Bodenartenuntergruppen		3 Klassen der dB gemäß AG Boden (1994)	k. A.
Lebert (2008)	90 aus 12 Bundesländern	11 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartengruppen	180 für 27 Bodenartenuntergruppen	PTF 1- PTF 11 1 Parameter: effektive Lagerungsdichte (Ld)	11 Bodenartengruppen: 2 Gruppen ≠ Def. KA5 durch andere Zuordnung des Sl3	k. A. Projektkarten im Maßstab 1:5.000 - 1:1.000.000	0,232 bis 0,878
Lebert (2008)	90 aus 12 Bundesländern	5 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen bzw. -hauptgruppen	180 für 27 Bodenartenuntergruppen	PTF 1- PTF 5 1 Parameter: Trockenrohdichte	1.) Ss, St2, Sl2, Su2 2.) Sl3, Sl4, Su3, Su4, Slu, St3 3.) Schuffe, 4.) Lehme, 5.) Tone	k. A. Projektkarten im Maßstab 1:5.000 - 1:1.000.000	0,273 bis 0,856
Lebert (2008)		Schätztabelle in Form einer Matrix als Regionalisierungsschlüssel		Effektive Lagerungsdichte (5 Klassen) und Bodenartengruppen keine PTF	11 Bodenartengruppen:	k. A. Projektkarten im Maßstab 1:5.000 - 1:1.000.000	k. A.

Mit dem aktuell vorgestellten Verfahren (Lebert, 2008) wird die Vorbelastung nur noch auf Basis eines einzigen Parameters, nämlich der Trockenrohdichte (dB) bzw. der effektiven Lagerungsdichte, regressionsanalytisch oder mittels einer Matrix abgeleitet. Diese Entwicklung steht im deutlichen Gegensatz zu aktuellen Aussagen in der Literatur, z. B. von Horn & Kutilek (2010): *„...it should be obvious that the consideration of bulk density values and texture classes alone are insufficient to predict actual differences in site specific soil strength“*.

Damit wird der Ansatz im Vergleich zu den multiplen Regressionen nach DVWK (1995), DIN-V-19688 (1998) oder ATV-DVWK (2002) mit bis zu acht zu berücksichtigenden Parametern (s. Tabelle 25) enorm vereinfacht. Es ist nicht auszuschließen, dass allein durch diese Vereinfachung die Methode eine breitere Anwendung als bisher erfahren wird. Dies ist umso kritischer zu betrachten, da doch schon die PTF nach DVWK (1995) und DIN (1998) nur einen geringen Teil der die Größe der Vorbelastung bestimmenden bodeneigenen Faktoren aufgenommen haben und selbst mit diesen PTF keine valide Schätzung erreicht wird. Eine kritische Überprüfung dieses neuen, aber auch der bisherigen Ansätze zur Schätzung der Vorbelastung bleibt im Hinblick auf Plausibilität und Validität der Aussagen vor einer Anwendung im Vorsorgenden Bodenschutz deshalb dringend geboten.

Das gilt vor allem aber auch dem Aspekt der Übertragbarkeit von Schätzwerten in die Fläche, d. h. insbesondere ihre Darstellung in Form von Karten zur „potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit“.

Zum einem stellt sich die Frage, ob das Verfahren wirklich für alle Bodenartenuntergruppen eingesetzt werden kann. Nimmt man z. B. die Definition der Vorbelastung der DIN-V-19688 (1998) wörtlich, lässt sich diese eigentlich nur für strukturierte Böden ableiten. Nach Kretschmer & Bohne (1993), Horn (1994, 2002) oder Horn & Baumgartl (2002) kann von einer nennenswerten Bindigkeit und Gefügeausbildung (Strukturierung) erst ausgegangen werden, wenn die Tongehalte oberhalb von 10 bis 15 % liegen. Bodenartenuntergruppen mit Tongehalten < 10 % werden seitens der Landtechnik (Sommer & Voßhenrich, 2002) aufgrund mangelnder Fähigkeit einer Gefügeausbildung für die konservierende Bodenbearbeitung ohne Lockerung als ungeeignet angesehen. Aufgrund dessen dürfte die Methode der Vorbelastung nach DIN-V-19688 für die beschriebenen Bodenartenuntergruppen eigentlich nicht verwendet werden. Bodenartenuntergruppen mit weniger als 8 % Ton sind Uu, Us, Su4, Su3, Su2, Sl2 und Ss, 8 bis 12 % haben der St2, Sl3, Ut2 und teilweise auch der Ul1 und Slu. Insgesamt wäre damit für 12 der 31 Bodenartenuntergruppen darzulegen, wie dieser Aspekt bei Fragen des Gültigkeitsbereichs der PTF gelöst wird.

Zum anderen gilt diese Frage auch für den Einfluss der Hangneigung auf die Vorbelastung. Sowohl nach DVWK (1995) als auch nach DIN-V-19688 (1998) gelten die Methoden nur für „ebene“ bzw. „mäßig schwach geneigte“ Standorte (< 2 % Gefälle). Nach Ad-hoc AG Boden (1999) wäre hingegen erst bei einer Hangneigung von > 9 % ein „Hangneigungsfaktor“ zu berücksichtigen, wie wird aber nicht erläutert. Auch wird nicht dargelegt, wieso diese Abweichung gegenüber der ursprünglichen Methodik zulässig ist. Eine aktuelle Reliefauswertung von erosionsgefährdeten Flächen für Hessen (Tetzlaff et al., 2009) ergibt folgendes Ergebnis: Hangneigung < 2 % ca. 25 % Flächenanteil und Hangneigung < 9 % ca. 85 % Flächenanteil. Gemäß Definition der ursprünglichen Methodik nach DVWK (1995) und DIN (1998) wären die im „Zweiten Bodenschutzbericht“ der Bundesregierung Flächen bezogenen Aussagen für Hessen somit nur für 25 % der Fläche gültig. Dabei wurde noch nicht einmal überprüft, ob nicht auch tonarme Bodenarten auf diesen Standorten vorzufinden sind. Auch dies ist ein Aspekt, der bei zukünftigen bundes- bzw. landesweiten Aussagen unbedingt zu berücksichtigen ist.

Gemäß der im „Zweiten Bodenschutzbericht“ der Bundesregierung veröffentlichten Karte der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen in Deutschland zur Identifizierung der sensiblen Gebiete“ (Bt.-Drs. 16/12658 2009), sind sowohl in Hessen als auch in Niedersachsen insbesondere die Regionen mit Böden aus Löss durch eine „hohe potentielle mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen“ ausgewiesen. Dabei handelt es sich vor allem um Regionen mit Böden der Legendeneinheiten mit den Nummern 40 und 42 der BÜK 1000 N.

Bei der Einheit mit der Nummer 40 handelt es sich um „Tiefgründige, braune bis dunkelgraubraune, tiefhumose, lehmig-schluffige bis schluffige Böden mit z. T. schwarzgefärbtem, tonreicherem Unterboden aus Löss und z. T. umgelagertem Lösslehm (Tschernosem-Parabraunerde oder Parabraunerde-Tschernosem, z. T. als „Griserde“), örtlich kalkhaltig; auf Kuppen und an Hängen, z. B. in Erosionslagen, flachgründigere Böden aus unterschiedlichen Festgesteinen und deren Umlagerungsprodukten, (z. B. Pararendzina, Rendzina aus Kalkgesteinen, Regosol, Braunerde, Podsol aus Silikatgestein); an Unterhängen Kolluvisol; in Weinbaugebieten künstlich umgestaltete Böden (Rigosol); in Tälern Auenböden und Grundwasserböden (Gleye), selten Niedermoor“ (Adler 2008).

Bei der Einheit 42 handelt es sich um „Mittel- bis tiefgründige, braune Schluff-Böden mit tonreicherem Unterboden, aus Löss oder umgelagertem Lösslehm (Parabraunerde, in nordöstlichen Lössgebieten verbreitet Fahlerde) über verschiedenen Gesteinen; nicht selten mit Staunäseeinfluss (Pseudogley-Parabraunerde bzw. -Fahlerde, z. T. Pseudogley); örtlich Tschernosem-Parabraunerde bzw.

„Griserde“; in Nordwestdeutschland z. T. Brauner Plaggenesch; auf Kuppen und an steileren Hängen oft flachgründigere Böden (z. B. Regosol oder Pararendzina aus Löss, Ranker, Pelosol oder Braunerde aus Silikatgesteinen, Rendzina oder Braunerde-Terra fusca aus Kalkgesteinen); im bayerischen Tertiärhügelland häufig Braunerde aus Lösslehm über Tertiärsedimenten; in Tälern Kolluvisol, Auenböden und Gleye, selten Niedermoor“ (Adler, 2008).

Gemäß den repräsentativen tabellarischen Sachdaten bzw. bodenphysikalischen Kennwerten ist die Einheit 40 gekennzeichnet durch eine Trockenrohdichte der Klasse 3, eine Luftkapazität von 4 bis 7 Vol.-%, je nach Horizont und Tiefenlage, sowie die Bodenartenuntergruppen „Lu“ und „Tu3“ mit Polyeder- bzw. Subpolyedergefüge. Für die Einheit 42 wird eine Trockenrohdichte der Klasse 3 bis 4, eine Luftkapazität von 2 bis 4 Vol.-% sowie die Bodenartenuntergruppen „Ut3“, „Ut4“ und „Tu4“, ebenfalls mit Polyeder- bzw. Subpolyedergefüge angeführt (Adler, 2008).

Die Legendeneinheiten 40 und 42 der BÜK 1000 N sind gekennzeichnet durch eine weite Spanne der in diesen Einheiten jeweils zusammengefassten bodensystematischen Klassen. So finden sich in jeder Legendeneinheit bis zu neun dieser Klassen, und zwar Auenböden, Braunerden, Pelosole, Gleye, Lessivés (Parabraunerden), Ah/C-Böden (Pararendzinen, Rendzinen, Regosole), Stauwasserböden, Schwarzerden sowie terrestrische anthropogene Böden (Düwel et al., 2007a). Eine ebenso weite Spanne ergab die Auswertung der BGR (Düwel et al., 2007b), für die Bodenartenuntergruppen für die Oberböden der jeweiligen Legendeneinheiten. Sie ermittelten für die Einheit 42 mehr als 20 verschiedene Bodenartenuntergruppen für den Oberboden, kaum bzw. nicht vertreten waren nur die Bodenartenuntergruppen „Su4“, „St3“, „Ts2-Ts4“, „Tt“, „Tl“ und „Lts“, am häufigsten angetroffen wurde der „Ut4“. Die Perzentilwerte P.5, P.50 und P.95 lagen für Sand bei 2,1, 12,1 und 63,1, für Schluff bei 26,9, 66,3 und 84,0 sowie für Ton bei 6,8, 17,9 und 34,0. Auch wenn es sich um eine Auswertung der Bodenartenuntergruppen der Oberböden handelt, kann man davon ausgehen, dass bei der weiten Spanne der in den Einheiten zusammengefassten Böden eine ähnliche Spanne an Bodenartenuntergruppen auch für die Unterböden vorzufinden sein wird.

Die Legendendescriben sowie die Ergebnisse der Untersuchungen der BGR (Düwel et al., 2007 a, b) zeigen eindrucksvoll auf, welche Vielfalt an unterschiedlichsten Böden mit einer weiten Spanne der Körnung sowie der Eigenschaften in jeweils nur einer Einheit zusammengefasst wurden. Entsprechend muss man davon ausgehen, dass im Prinzip alle Klassen der Vorbelastung resp. der Verdichtungsempfindlichkeit für jede Legendeneinheit anzunehmen sein werden. Weder dem „Zweiten Bodenschutzbericht der Bundesregierung“ (Bt.-Drs. 16/12658 2009) noch den Ausführungen der UBA-Studie (Lebert, 2008) ist jedoch zu entnehmen, mit welcher

Flächen bezogenen Repräsentanz die Verdichtungsempfindlichkeit dargestellt wird und welche Spanne der Vorbelastung den Legendeneinheiten zugrunde liegen. Es ist durchaus vorstellbar, dass man für jede Legendeneinheit alle fünf Klassen der Vorbelastung resp. der Verdichtungsempfindlichkeit annehmen kann. Damit ist eine regionale bzw. Gebietsbezogene Differenzierung in Form einer Karte nicht zulässig. Wenn diese Art der Darstellung aber trotzdem gewählt wird sollte zumindest die Spanne der in den Legendeneinheiten abgebildeten Werte der Vorbelastung mit angeführt werden. Ohne diese Informationen sind belastbare Aussagen zur Repräsentativität der Werte nicht möglich.

In ihrem Vorschlag für eine Richtlinie zur „Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz“ (KOM (2006) 232 endgültig, 2006) hat die Kommission in Kapitel II (Abschnitt 1, Artikel 6.1) formuliert: „Binnen fünf Jahren [Datum der Umsetzung] bestimmen die Mitgliedsstaaten auf der geeigneten Ebene die nachstehend als „Risikogebiete“ bezeichneten Gebiete auf ihrem Hoheitsgebiet, bei denen stichhaltige Beweise vorliegen beziehungsweise der begründete Verdacht besteht, dass eine Verschlechterung der Bodenqualität durch eine oder mehrere Ursachen eingetreten ist beziehungsweise in naher Zukunft eintreten könnte:

- a. Erosion.....
- b. Verlust organischer Substanz.....
- c. Verdichtung durch erhöhte Bodendichte und verminderte Bodenporosität.
- d. Versalzung...
- e. Erdbeben...

Zur Bestimmung der Gebiete werden durch die Kommission die mindestens zu berücksichtigenden Kriterien angeführt. Im Falle der Verdichtung handelt es sich um die folgenden Kriterien:

- a. Bodentypologische Einheit (Bodentyp),
- b. Oberboden- und Unterbodentextur (auf der Ebene der bodentypologischen Einheit),
- c. Oberboden- und Unterbodendichte (auf der Ebene der bodentypologischen Einheit),
- d. Organische Substanz im Boden (auf der Ebene der bodentypologischen Einheit),
- e. Klima,
- f. Bodenbedeckung,
- g. Bodennutzung (einschließlich Bodenbewirtschaftung, landwirtschaftliche Anbauformen und Forstwirtschaft),
- h. Topografie.

Eine anzuwendende Methode wird nicht angeführt. In Artikel 7 heißt es dazu: „Bei der Bestimmung von Risikogebieten können sich die Mitgliedstaaten auf empirische Daten oder Modelle stützen. Werden Modelle herangezogen, so sind sie zu validieren, indem die Ergebnisse mit empirischen Daten verglichen werden, die nicht für die Entwicklung des Modells selbst verwendet wurden“.

Eine erfolgreiche Validierung der Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung als Modell zur Ausweisung von „Risiko-Gebieten“ im Sinne der BSRRL, hat sowohl für die Böden in Hessen als auch in Niedersachsen nach Meinung der Autoren bisher nicht stattgefunden. Die bisher publizierten Karten der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit“ durch das UBA bzw. die Bundesregierung erfüllen z. Zt. keinesfalls die methodischen Anforderungen des Entwurfs der BSRRL.

Unabhängig von der Diskussion zur Ausweisung von „risk areas“ im Rahmen der BSRRL könnten die Bundesländer bereits jetzt auf Grundlage des BBodSchG Gebiete bestimmen, in denen flächenhaft schädliche Bodenveränderungen auftreten oder zu erwarten sind. Diese Möglichkeit bietet ihnen §21, Abs. 3 BBodSchG - Landesrechtliche Regelungen. Nicht alle Länder haben allerdings von dieser Regelung bei der Formulierung ihrer Landesbodenschutzgesetze Gebrauch gemacht. Letztendlich bietet aber bereits das BBodSchG den Bundesländern die Möglichkeit mit eigenen oder bundesweit abgestimmten Methoden Gebiets bezogene Aussagen sowie Regelungen über Gebiets bezogene Maßnahmen zu treffen. Diese Möglichkeit und damit auch die Verantwortung bei der Methodik liegen bei den Ländern.

4 Zusammenfassung

Mit der Studie des UBA stehen nunmehr zwei weitere Gruppen von Pedotransferfunktionen bzw. eine weitere Matrix zur Schätzung der Vorbelastung zur Verfügung.

Die Ausführungen haben gezeigt, dass es eine Vielzahl von kritischen Aspekten wie fehlende Reproduzierbarkeit, ungenügende Schärfe der statistischen Absicherung, keine Übereinstimmung zwischen Schätz- und Messwerten, nicht nachvollziehbare Klassifizierung der Werte etc. gibt. Bevor diese Methode als Grundlage zu einer bundesweiten „Identifizierung sensibler Gebiete (so genannter risk areas)“ empfohlen werden kann, sollten die aufgezeigten Probleme überzeugend gelöst werden. Vor allem aber müssen prognostizierte Werte und die dabei zu erwartenden schädlichen Wirkungen im Feld und nicht nur im Labor bestätigt werden (Lebert & Böken, 2004; Lebert et al., 2006). Ansonsten ist eine breite Zustimmung seitens der Beratung als Instrument der Vorsorge und des Vollzuges berechtigterweise nicht zu erwarten.

Die Ausführungen haben weiterhin gezeigt, dass die Schätzung der Vorbelastung mittels PTF für landesweite Aussagen keine belastbaren Ergebnisse bringt. Der Einsatz dieser Verfahren für eine landes- bzw. bundesweite Ausweisung von verdichtungsempfindlichen Böden könnte somit mangels einer fehlenden breiten Akzeptanz auf Seiten der Vorsorgepflichtigen die Ziele und Aufgaben des Vorsorgenden Bodenschutzes eher konterkarieren als unterstützen.

5 Literatur

- Ad-hoc-AG Boden (1999) Ermittlung der Vorbelastung bei pF 1,8. Verknüpfungsregel 5.19: 1-7 [online]. Zu finden in <http://www.bgr.bund.de/cln_092/nn_334064/DE/Themen/Boden/Zusammenarbeit/Adhocag/Downloads/Methode_1_4,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Methode_1_4.pdf> [zitiert 12.03.2009]
- Ad-hoc-AG Boden (2000) Verknüpfungsregel 5.2: Ermittlung der Vorbelastung bei pF 1,8. In: Methodendokumentation Bodenkunde : Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Stuttgart : Schweizerbart, pp 188-190
- Ad-hoc-AG Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). Stuttgart : Schweizerbart, 438 p
- Adler G (2008) schriftliche Mitteilung vom 08.09.2008
- Arvidsson J, Keller T (2004) Soil precompression stress : I. A survey of Swedish arable soils. *Soil Tillage Res* 74:85-95
- ATV-DVWK (2002) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. Hennef, 27 p
- Baumgartl T, Köck B (2004) Modelling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci Soc Am J* 68:57-65
- BBodSchG - Bundes-Bodenschutzgesetz (1998) Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Bundesgesetzblatt : Teil 1 / Bundesminister der Justiz (16):502
- BBodSchV - Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (1999) Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Bundesgesetzblatt : Teil 1 / Bundesminister der Justiz (36):1554
- BMU (1998) Federal Soil Protection Act of 17. March 1998 (Federal Law Gazette I p. 502). Translation, Bonn, 28.08.1998: 31 p
- Brandhuber R (2010) schriftliche Mitteilung vom 07.04.2010
- Brunotte J, Lorenz M, Sommer C, Harrach T, Schäfer W (2008) Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. *Ber Landwirtschaft* 86(2):262-284
- Cavaleri KMV, Arvidsson J, Silva AP da, Keller T (2008) Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil Tillage Res* 98:17-26
- Clementino v R (2005) Discussion of „An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays“. *Can Geotech J* 42:972-974
- Cornelius WB, Ronsyn J, van Meirvenne M, Hartmann R (2001) Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Sci Soc Am J* 65:638-649
- Cramer B (2006) Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und zur Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. Bonn : Inst Bodenwiss, 235 p, Bonner Bodenkundl Abhandl 44
- Cramer B, Botschek J, Weyer T (2006) Untersuchung zur Bodenverdichtung nordrhein-westfälischer Böden. *Bodenschutz* 3:64-71
- Deutscher Bundestag (2009) Unterrichtung durch die Bundesregierung : zweiter Bodenschutzbericht der Bundesregierung. Bonn, 77p, Drucksache / Deutscher Bundestag 16/12658
- DIN-V-19688 (1998) Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden : Vornorm DIN V 19688. Berlin : Beuth, 7 p
- Dürr HJ, Petelkau H, Sommer C (1995) Literaturstudie „Bodenverdichtung“. Berlin : Umweltbundesamt, 203 p, Texte / Umweltbundesamt 95/55, UBA-FB 95-036
- Düwel O, Siebner CS, Utermann J, Krone F (2007a) Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands : Bericht über länderübergreifende Punktinformationen im FISBo BGR [online]. Zu finden in <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Schriften/Downloads/Humusgehalte_Bericht,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Humusgehalte_Bericht.pdf> [zitiert am 28.11.2010]
- Düwel O, Siebner CS, Utermann J, Krone F (2007b) Bodenarten der Böden Deutschlands : Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR [online]. Zu finden in <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Schriften/Downloads/Bodenarten_Bericht,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Bodenarten_Bericht.pdf> [zitiert am 28.11.2010]

- DVWK (1995) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden : Teil I: Mechanische Belastbarkeit. Bonn : Wirtschafts- Verl -Ges Gas Wasser, 12 p, Merkbl Wasserwirtsch 234
- DVWK (1997) Bodenphysikalische Untersuchungen über Ursachen und Auswirkungen von Bodenverdichtungen. Bonn : Wirtschafts- Verl -Ges Gas Wasser, DVWK-Materialien 1997/1
- Eckelmann W, Baritz R, Bialousz S, Bielek P, Carre F, Houskova B, Jones RJA, Kibblewhite M, Kozak J, Le Bas C, Toth G, Toth T, Varallyay G, Halla MY, Zupan M (2006) Common criteria for risk area identification according to soil threats. Luxembourg : Off Official Publ European Communities, 94 p, European Soil Bureau Research Report 20
- Feldwisch N (2000) Untersuchungs- und Handlungskonzept für verdichtungsempfindliche Standorte in Sachsen : Studie erstellt im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 106 p, unveröffentlicht
- Fenner S (1997) Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Standort. *J Plant Nutr Soil Sci* 160(2):157-164
- Frielinghaus M, Müller L, Schrade A, Werner A, Bachinger J (1997) Maßstäbe bodenschonender landwirtschaftlicher Bodennutzung : Erarbeitung von Beurteilungskriterien und Meßparametern als Grundlagen für fachliche Regelungsansätze ; Bericht zum Teil 1 des Forschungsvorhabens Nr. 207 02 009 des Umweltbundesamtes Berlin. Müncheberg : ZALF, 154 p, UBA-FB 98-020
- GD-NRW (2003) Auskunftssystem Mechanische Belastbarkeit der Böden in NRW [online]. Zu finden in <<http://www.gd.nrw.de/cgi-bin/geoshop/toc/705.pdf>> [zitiert am 11.11.2010]
- Glante F, Marahrens S, Mathews J, Hillges F (2009) Einsatz von Länderdaten für Bundesaufgaben : Vortrag Symposium „Bodendaten und ihre Nutzung“, Dresden, 02.09.2009 [online] Zu finden in <http://landwirtschaft.sachsen.de/umwelt/download/boden/Einsatz_von_Laenderdaten_fuer_Bundesaufgaben.pdf> [zitiert am 11.11.2010]
- Gysi M (2001a) Compaction of eutric cambisol und heavy wheel traffic in Switzerland : field data and a critical state soil mechanics model approach. *Soil Tillage Res* 61:133-142
- Gysi M (2001b) Bodenverdichtung : Vorbelastung als Stabilitätsmaß [online]. Zu finden in <<http://www.agroscope.admin.ch/publikationen/einzelpublikation/index.html?lang=de&aid=18471&pid=20087>> [zitiert am 11.11.2010]
- Håkansson I, Voorhees WB, Elonen P, Raghavan GSV, Lowery B, van Wijk ALM, Rasmussen K, Riley H (1987) Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil Tillage Res* 10:259-268
- Hartge KH, Horn R (2009) Die physikalische Untersuchung von Böden : Praxis, Messmethoden, Auswertung. Stuttgart : Schweizerbart, 178 p
- HBU – Handbuch der Bodenuntersuchung (2008) Bestimmung des Drucksetzungsverhaltens (Ödometersuchung) : Kapitel 5.1.10b, 30. Erg.-Lieferung/ Dezember 2008, 14 p
- Hennings V (2001) Vergleichende Bewertung bestehender Pedotransferfunktionen zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. *Arbeitshefte Boden* 2001(3):5-22
- Hennings V, Düwel O (2009) Verdichtungsempfindlichkeit der ackerbaulich genutzten Böden in Deutschland : ein Vergleich nach verschiedenen Bewertungsansätzen. Postervortrag Jahrestagung der DBG 2009, Bonn, 11.09.2009
- Horn R (1981) Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrößen. Berlin : TU, 200 p, Landschaftsentwicklung und Umweltforschung 10
- Horn R (1988) Compressibility of arable soils. In: Drescher J, Horn R, Bodt D (eds) Impact of water and external forces on soil structure : selected papers of the 1st Workshop on Soilphysics and Soilmechanics, Hannover 1986. Cremlingen-Destedt : Catena-Verl, pp 53-71
- Horn R (1994) Die Bodenstruktur : Regulator für Stofftransportprozesse in der Umweltforschung. In: Standortökologische Untersuchungen als Beitrag zu Landeskultur und Umweltschutz : wissenschaftliches Kolloquium zu Ehren von Prof. Dr. K. Bohne. Rostock : Univ, pp 21-28
- Horn R (2002) Soil mechanical properties and processes in structured unsaturated soils under various landuse and management systems. *Adv Geocool* 35:305-318
- Horn R, Lebert M, Burger N (1989) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen : Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 6333-972-57238 gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 177 p
- Horn R, Lebert M, Burger N (1991a) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen : Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 6333-972-57238 : Bayerisches Staatsminist Landesentwicl Umweltfragen, Materialien / Bayerisches Staatsminist Landesentwicl Umweltfragen 73
- Horn R, Baumgartl T, Kühner S, Lebert M, Kayser R (1991b) Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. *Z Pflanzenernähr Bodenkd* 154:21-26
- Horn R, Lebert M (1992) Möglichkeiten und Grenzen der physikalischen Bodenrekultivierung in der Forstwirtschaft *AFZ Wald* 47(19):998-1004
- Horn R, Simonta C, Fleige H, Dexter A, Rajkai K, De la Rosa D (2001) Möglichkeit zur Prognose der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. *Wasser und Boden* 53(9):9-12
- Horn R, Fleige H (2001) Prediction of the mechanical strength and ecological properties of subsoils for a sustainable landuse. *Landnutzung Landentwicl* 42:23-30
- Horn R, Hartge KH (2001) Das Befahren von Ackerflächen als Eingriff in den Bodenwasserhaushalt. *Wasser und Boden* 53(9):13-19
- Horn R, Paul R, Simonta C, Fleige H (2002) Schutz vor mechanischer Belastung. In: Blume HP, Felix-Henningsen P, Fischer W, Frede HG, Horn R, Stahr K (eds) *Handbuch der Bodenkunde*. Weinheim : Wiley VCH, 14. Erg. Lfg 12/2002, Kapitel 7.4, 12 p
- Horn R, Fleige H, Prange N, Simonta C, Dumitru E, Enache R, de la Rosa D, Morena J, Diaz-Pereira E, Mayol F, Dexter A, Czyz E, Rajkai K (o.J) SIDASS : a spatially distributed simulation model predicting the dynamics of agro-physical soil state within Eastern and Western European Countries for the selection of management practices to prevent soil erosion based on sustainable soil - water interaction; final report ; SIDASS-IC15-CT98-0106. Kiel : Univ, 27 p
- Horn R, Fleige H, Richter FH, Czyz EA, Dexter A, Diaz-Pereira E, Dumitru E, Enache R, Mayol F, Rajkai K, Rosa de la D, Simonta C (2005) SIDASS project Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil Tillage Res* 82:47-56
- Horn R, Fleige H (2009) Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil Tillage Res* 102(2):201-208
- Horn R, Fleige H, Peth S (2009) Gute fachliche Praxis aus Sicht der Bodenkunde : Vorsorge- und Maßnahmenwerte als Grundlage für die Bewertung der Verdichtungsgefährdung von Böden in der Landwirtschaft. *Bodenschutz* 3:80-85
- Keller T, Arvidsson J, Dawidowski JB, Koolen AJ (2004) Soil precompression stress : II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil Tillage Res* 77:97-108
- Keller T, Weisskopf P, Arvidsson J (2005) Können Bodenverdichtungen durch das Beschränken der mechanischen Belastung auf Werte kleiner als die Vorbelastung vermieden werden? *Bulletin / Bodenkundl Ges Schweiz* 28:35-40
- Keller T, Arvidsson J (2006) Prevention of traffic-induced subsoil compaction in Sweden : experiences from wheeling experiments. *Arch Agron Soil Sci* 52(2):207-222
- Keller T, Arvidsson J, Rydberg T (2009) In situ stress-strain behaviour during wheeling experiments as compared to stress-strain behaviour measured in uniaxial compression tests in the laboratory ; proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 - 19, 2009, T4-020 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webextra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Kuntze H (1986) Verdichtungen und Vernässungen des Bodens : Diagnose und Therapie. *Wertermittlungsforum / Sachverständigen-Kuratorium Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Gartenbau, Landespflege, Weinbau, Binnenfischerei* 4(1986)3

- Kibblewhite MG, Jones RJA, Baritz R, Huber S, Arrouays D, Micheli E, Stephens M (2008) ENVASSO Final report : part I: scientific and technical activities ; contract 022713 [online]. Zu finden in <http://www.envasso.com/Publications/ENV_D11_FinalRep_prt2bk.pdf> [zitiert am 15.11.2010]
- KOM (2002) Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie : Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss sowie an den Ausschuss der Regionen. Luxemburg : Amt Amlt Veröff Europ Gemeinschaften, 41 p, Dokumente / Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2002/179
- KOM (2006) Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG (von der Kommission vorgelegt) [online]. Zu finden in <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/kom_bodenschutz_vorschlag.pdf> [zitiert am 14.12.2010]
- Kretschmer H, Böhne K (1993) Beurteilung der Befahr- und Bearbeitbarkeit norddeutscher Moräneböden. Mitt Dt Bodenkdl Ges 71:65–68
- Le Bas C, Houskova B, Bialousz S, Bielek P (2008) Identifying risk or priority areas for soil degradation by compaction in Europe. FAGUS-Schriften 15:215-234
- Lebert M (1989) Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuth : Univ, Bayreuther Bodenkundl Ber 12
- Lebert M (2008) Herleitung und Darstellung der potenziellen, mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Unterböden von Ackerflächen der Bundesrepublik Deutschland : Zwischenergebnisse aus dem UBA-Vorhaben: „Entwicklung eines Prüfkonzepes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden“ FKZ 3707 71 202 – Entwurf [online]. Zu finden in <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/downloads/verdichtung_bericht.pdf> [zitiert am 16.01.2010]
- Lebert M, Brunotte J, Sommer C (2004) Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Berlin : Umweltbundesamt, 121 p, Texte / Umweltbundesamt 04/46
- Lebert M, Böken H (2004) Vermeidung von Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Bodenschutz 2:36–43
- Lebert M, Schäfer W (2005) Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz 2:42-46
- Lebert M, Brunotte J, Sommer C, Böken H (2006) Bodengefüge gegen Verdichtung schützen : Lösungsansätze für den Schutz landwirtschaftlich genutzter Böden. J Plant Nutr Soil Sci 169(5):633–641
- Lebert M, Marahrens S (2009) Risk area identification according to soil compaction of agricultural soils in Germany : proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009, T4-013 [online]. Zu finden in <http://wvx5.webextra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Marahrens S, Lebert M (2009) Auswertungskarten zur Verdichtungsgefährdung in der Bundesrepublik Deutschland auf der Basis der BÜK 1000. Postvortrag, Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 5. bis 13. September 2009, Bonn
- Müller U (1999) Methodenbeschreibung sowie Verknüpfungsregel 7.6.5 - Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit „SM“. In: Müller U Auswertungsmethoden im Bodenschutz : Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystem (NIBIS). Hannover : Nieders. Landesamt Bodenforsch, pp 34–35, pp 217–220
- Müller U (2004a) Methodenbeschreibung 5.7 sowie Verknüpfungsregel 6.6.5 – Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit „SM“. Arbeitshefte Boden 2004(2):30–31, 2004(2):242–245
- Müller U (2004b) Methodenbeschreibung 5.28 sowie Verknüpfungsregel 6.6.24 – Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit (Vorbelastung nach DIN) aus der Vorbelastung bei pF 1,8. Arbeitshefte Boden 2004(2):72-73, 2004(2):271–275
- Narra S (2009) Influence of compaction curve modeling on void ratio and pre-consolidation stress. Int J Soil Sci 4(2):57–66
- Nissen B (1999) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland : bodenphysikalischer Ansatz. Kiel : Inst Pflanzenern Bodenkunde, Schriftenreihe / Inst Pflanzenern Bodenkunde 50
- Nolting K, Brunotte J, Lorenz M, Sommer C (2006) Bodenverdichtung : bewegt sich was? Setzungsmessungen im Unterboden unter hoher Radlast. Landtechnik 61(4):190–191
- Paul R (2004) Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbaulich genutzten Böden [online]. Zu finden in <<http://www.tll.de/ainfo/pdf/back1004.pdf>> [zitiert am 16.11.2010]
- Paul R, Fettisov A (2007) Einschätzung des Beratungsbedarfs für den Schutz der ackerbaulich genutzten Böden Thüringens vor Schadverdichtung [online]. Zu finden in <<http://www.tll.de/ainfo/pdf/bods0207.pdf>> [zitiert am 16.11.2010]
- Quasem H, Attinger W, Berli M, Schulin R (2000) Schlussbericht zum Forschungsprojekt: Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf den Trassen der Transitgasleitungen Däniken-Grimmel (TRG2) und Rodersdorf-Lostorf (TRG3). Zürich : ETH, 41 p
- Richter A, Adler GH, Fahrak M, Eckelmann W, Siebner C, Baritz U, Behrens J, Hartwich R, Schmidt R, Stegger U, Utermann J, Wolff B (2007) Erläuterungen zur nutzungs-differenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1 000 000 : (BÜK 1000 N, Version 2.3). Hannover : BGR, 47 p
- Robinson TP, Metternicht G (2005) Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps. Agric Syst 85:19–41
- Rücknagel J, Brandhuber R, Hofmann B, Lebert M, Marschall K, Paul R, Stock O, Christen O (2010) Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. Soil Tillage Res 106:165–170
- Schamp J, Martin W (1996) Karten der Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden. Mitt Dt Bodenkundl Ges 66(2):719–722
- Schäfer-Landefeld L, Brandhuber R (2001a) Die „mechanische Vorbelastung“ : eine geeignete Grundlage zur Beurteilung der Verdichtungsgefährdung von Ackerböden? SchrR Bayer Landesanst Bodenkultur Pflanzenbau 5(1):39–46
- Schäfer-Landefeld L, Brandhuber R (2001b) Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit von Böden : ein tragfähiges Konzept? Bodenschutz 2:48-52
- Schwertmann U, Schauder H, Beese F, Schmitt M, Matthias MU, Drescher-Kaden U (1990) Konzeptionelle Auswertung des Förderschwerpunkts „Bodenbelastung und Wasserhaushalt im Bodenforschungsprogramm des BMFT“ : Band 1: Textband. Freising : Lehrstuhl Bodenkunde, TU München-Weihenstephan, 160 p, FKZ 03-39308-A
- Semmel H (1993) Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. 183 p, SchrR Inst Pflanzenern Bodenkde 26
- Semmel H, Horn R (1995) Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwerten. KTBL Schrift 362:61-92
- SoCo Project Team (2009) Addressing soil degradation in EU agriculture: relevant processes, practices and policies : report on the project 'Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo)' [online]. Zu finden in <<http://soco.jrc.ec.europa.eu/documents/EUR-23767-web.pdf>> [zitiert am 26.11.2010]
- Sommer C, Steinkampf H, Brunotte J (1998) Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz 3(1):12-16
- Sommer C, Voßhenrich H-H (2002) Bodenbearbeitung (TP 3-3) KTBL-Sonderveröffentlichung 038:237–249
- SRU – Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, (2000) Schritte ins nächste Jahrtausend : Umweltgutachten 2000 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. Stuttgart : Metzler-Poeschel, 684 p
- Strobel P (1989) Untersuchungen zur Abschätzung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden unter Berücksichtigung der Auswertung von Bodenkarten. Hannover : Geograf Inst [Diplomarbeit]
- Tetzlaff B, Schreiner H, Vereecken H, Wendland F (2009) Modellgestützte Analyse signifikanter Phosphorbelastungen in hessischen Oberflächengewässern aus diffusen und punktuellen Quellen [online]. Zu finden in <http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/3586/1/Energie%26Umwelt_29.pdf> [zitiert am 26.11.2010]

- Van den Akker JH (1999) Development, verification and use of subsoil compaction model SOCOMO. In: Van den Akker JH, Arvidsson J, Horn R (eds) Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community : proceedings of the workshop of the Concerted Action "Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction", 28.–30 May 1998, Wageningen, The Netherlands. Wageningen : DLO-Staring Centre, pp 321-336
- Van den Akker JH, Simota C (2007) Risk assessment methods of compaction. RAMSOIL Project Report 2.3 Deliverable 2.3.2.5 [online]. Zu finden in <http://www.ramsoil.eu/NR/rdonlyres/9179FD01-072A-449C-8EE4-CE1D-C33DFF76/56724/PR23_compaction.pdf> [zitiert am 26.11.2010]
- Van den Akker JH, Hoogland T (2009) Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands ; proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009 T4-031 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webxtra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Vorderbrügge T (2004) Vorschlag zur Ableitung von Bodenwerten für die Beurteilung von Bodenschadverdichtungen gemäß den Vorgaben des Bundesbodenschutzgesetzes. Bodenschutz 2:44–53
- WBB – Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz (2000) Wege zum vorsorgenden Bodenschutz : fachliche Grundlagen und konzeptionelle Schritte für eine erweiterte Boden-Vorsorge. Bonn, 105 p, Drucksache / Deutscher Bundestag 14/2834
- Wiermann C (1998) Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. 213 p, Schriftenreihe / Institut für Pflanzenernährung, Univ Kiel 45
- Willmott CJ (1982) Some comments on the evaluation of model performance. Bull Am Meteorol Soc 63(11):1309–1313
- Zink A, Fleige H, Horn R (2009) Zur mechanischen Stabilität von Kalkmarschen – Spannungsausbreitungs- und Bodenstabilitätsmessungen bei Überfahrungsversuchen (Kaiser-Wilhelm- und Kronprinzenkoog in Dithmarschen) [online]. Zu finden in <http://www.lbeg.de/extras/boden/downloads/boeden_kueste/7_zink_stabilitaet_von_kalkmarschen.pdf> [zitiert am 28.11.2010]
- Literaturliste der Datenquellen (Tabelle 6)**
- Anken T (2003) Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung gepflügter und direktgesäter Parzellen [online]. Zu finden in <<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:27275/eth-27275-02.pdf>> [zitiert am 28.11.2010]
- Anonym (2003) Demonstrationsversuch auf der Dauerbeobachtungsparzelle „Oberacker“ [online]. Zu finden in <<http://www.pfluglos.de/media/documents/1242636549.pdf>> [zitiert am 28.11.2010]
- Arvidsson J (2001) Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters : I. Results from six long-term field experiments in southern Sweden. Report / Division of Soil Management, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences 100:66–78
- Arvidsson J, Trautner A, van den Akker JH, Sjöberg E (2001a) Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters : II. A model to avoid subsoil compaction. Report / Division of Soil Management, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences 100:99-107
- Arvidsson J, Trautner A, van den Akker JH, Schjønnig P (2001b) Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden : II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. Soil Tillage Res 60:79–89
- Arvidsson J, Trautner A, Keller T (2002) Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. Adv Geocool 35:331-338
- Arvidsson J, Sjöberg E, van der Akker JH (2003) Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden : III. Risk assessment using a soil water model. Soil Tillage Res 73:77-87
- Arvidsson J, Keller T (2004) Soil precompression stress : I. A survey of Swedish arable Soils. Soil Tillage Res 74:85-95
- Berli M (2001) Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery [online]. Zu finden in <<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:24435/eth-24435-02.pdf>> [zitiert am 28.11.2010]
- Bonetti C, Rauber P, Sparachino A, Suter U (2004) Umgang mit ausgehobenem Boden auf Großbaustellen : bodenphysikalische und bodenbiologische Charakterisierung einer Rekultivierung mit unterschiedlich zwischengelagerten Böden. Zürich : ETH, Semesterarb Department D_BAUG, 52 p
- Cramer B (2006) Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und zur Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen [online]. Zu finden in <<http://hss.ulb.uni-bonn.de/2006/0782/0782.pdf>> [zitiert am 28.11.2010]
- Fazekas O (2005) Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat [online]. Zu finden in <http://eldiss.uni-kiel.de/macau/accept.htm?http://eldiss.uni-kiel.de/macau/servlets/MCRFileNodeServlet/dissertation_derivate_00001548/d1548.pdf;jsessionid=4E2404AA6114221983DF4BE7ED95ECE0?hosts=>> [zitiert am 28.11.2010]
- Gysi M (2000) Soil compaction due to heavy agricultural wheel traffic. Zürich : ETH, 112 p
- Hammel K (1993) Spannungsverteilung und Bodenverdichtung unter profilierten Reifen am Beispiel zweier Böden unter Grünland. Hohenheim : Univ, 140 p, Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 14
- Haubold-Rosar M (1996) Bodenphysikalische und -mechanische Eigenschaften landwirtschaftlich rekultivierter Böden aus Löß und Geschiebemergel/-lehm sowie Möglichkeiten ihrer Melioration. Aachen : Shaker, 185 p, Ber Geowiss
- Horn R (1981) Die Bedeutung der Aggregation von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrößen. Berlin : TU, 200 p, Landschaftsentwickl Umweltforsch 10
- Horn R (1986a) Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. Z Pflanzenernähr Bodenkd 149:9–18
- Horn R (1986b) Ist die Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort anhand von Laborversuchen möglich? Z Vegetationstechnik 9:37–40
- Horn R (2004) Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. Soil Sci Soc Am J 68:1131–1137
- Horn R, Lebert M, Burger N (1991a) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen : Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben. München : Bayer Staatsminist Landesentwickl Umweltfragen, 178 p, Materialien / Bayer Staatsminist Landesentwickl Umweltfragen 73
- Horn R, Baumgartl T, Kühner S, Lebert M, Kayser R (1991b) Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. Z Pflanzenernähr Bodenkd 154:21-26
- Horn R, Müller K, Meier D, Blume HP (1993a) Landschaften und Böden Norderdithmarschens. Mitt Dt Bodenkundl Ges 70:151–180
- Horn R, Baumgartl T, Roweck H, Köppermann C (1993b) Bodenentwicklung und ökologische Eigenschaften typischer Böden der Jungmoränenlandschaft : bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des SFB 192. Mittlg Dtsch Bodenkdl Ges 70:275–286
- Horn R, Werner D, Baumgartl T, Winterot C (1994) Wirkungen technogener Druckbelastung auf die Spannungsverteilung und das Bodengefüge einer Schwarzerde aus Löß. Z Pflanzenernähr Bodenkd 157:433–440
- Horn R, Markgraf W, Baumgartl T, Bartsch W (2009) Wechselwirkung zwischen mechanischer Auflast und mikrobiologischer Aktivität in Böden. Bodenkultur 60:21-29
- Keller T, Arvidsson J (2004) Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction : effects of dual wheels, tandem axles and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. Soil Tillage Res 79(2):191–205
- Keller T, Arvidsson J, Dawidowski JB, Koolen AJ (2004) Soil precompression stress : II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. Soil Tillage Res 77:97-108

- Kühner S (1997) Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. Kiel : Univ, 231 p, Schriftenreihe / Inst Pflanzenern Bodenkunde 39
- Lebert M (1989) Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuth : Univ, 131 p, Bayreuther Bodenkundl Ber 12
- Lebert M, Springob G (1994a) Zur Rekultivierung von Lößböden : I. Wirkungen verschiedener Planierverfahren auf die Bodenstruktur. *Z Kulturtech Landentwickl* 35:112-121
- Lebert M, Springob G (1994b) Zur Rekultivierung von Lößböden : II. Wirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Unterbodenstruktur junger, planierter Flächen. *Z Kulturtech Landentwickl* 35:300-310
- Nissen B (1999) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland : bodenphysikalischer Ansatz. Kiel : Inst Pflanzenernähr Bodenkde, 159 p, Schr Inst Pflanzenernähr Bodenkde 50
- Quasem H, Attinger W, Berli M, Schulin R (2000) Schlussbericht zum Forschungsprojekt: Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf den Trassen der Transitgasleitungen Däniken-Grimsel (TRG2) und Rodersdorf-Lostorf (TRG3). Zürich : ETH, 41 p
- Richter F-H (2005) Vergesellschaftung und Eigenschaften von Böden unterschiedlicher geomorpher Einheiten einer Jungmoränenlandschaft des Ostholsteinischen Hügellandes. Kiel : Inst Pflanzenernähr Bodenkde, 132 p, Schr Inst Pflanzenernähr Bodenkde 66
- Rücknagel J (2007a) Entwicklung eines Modells zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten. Tönning : Der Andere Verl, 162 p, Schr R Pflanzenbauwiss Inst Agrar Ernährungswiss Univ Halle-Wittenberg 1
- Rücknagel J (2007b) Schadverdichtungsgefährdung von Ackerböden : Bewertung von Produktionsverfahren unter Berücksichtigung der Jahreswitterung 2007 [online]. Zu finden in <http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LLFG/dokumente/Acker_und_Pflanzenbau/Fruchtfolge_und_Bodenkultur/Ackerbautagungen/abt07_ruecknagel.pdf> [zitiert am 30.11.2010]
- Rücknagel J, Harrach T, Dumbeck G, Gerschlaue F, Christen O (2009) Morphological characterization of soil structure and the relation to precompression stress for recultivated loess soils ; proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009, T4-020 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webextra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Schäffer B, Egenschwiller L, Suter B, Vogt L, Buchter B, Pfister H, Schulin R (2007a) Einfluss der Zwischenlagerung auf die anfängliche Entwicklung rekultivierter Oberböden. *J Plant Nutr Soil Sci* 170:669-681
- Schäffer B, Attinger W, Schulin R (2007b). Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery : soil physical and mechanical aspects. *Soil Tillage Res* 93:28-43
- Schwab P, Weisskopf P, Berli M, Rehbein K, Brunner H, Scheid S, Sommer M, Ropka B (2006) Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften : Pilotprojekt LAZBO ; Teil 2: Bodenphysikalische Untersuchungen [online]. Zu finden in <www.bafu.admin.ch/bodenschutz/10161/10187/index.html?lang=fr..> [zitiert am 30.11.2010]
- Schneider R (1997) Möglichkeiten zur Verbesserung der mechanischen Belastbarkeit und der bodenphysikalischen Standortbedingungen bei Neulandböden aus Löß. *Z Kulturtech Landentwickl* 38:27-31
- Semmel H (1993) Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Kiel : Inst Pflanzenernähr Bodenkde, 183 p, Schr Inst Pflanzenernähr Bodenkde 26
- Stahl H, Marschall K, Götze H (2005) Bodendruck und Bodenbelastbarkeit : Abschlussbericht zum Projekt „Risikomanagement Bodengefüge“. Dresden : LfL, 132 p, Schr R Sächsischen Landesanst Landwirtsch 2005/15
- Stahl H, Marschall K, Freitag A, Götze H (2009) Bodendruck im Grünland : gute fachliche Praxis für Grünland: Bodengefüge und Narbenschutz [online]. Zu finden in <http://www.smul.sachsen.de/ffl/publikationen/jsp/inhalt.jsp?seite=detail&pub_id=3944> [zitiert am 30.11.2010]
- Stock O (2005) Untersuchungen zum Verfestigungsverhalten saalezeitlichen Geschiebemergels am Beispiel landwirtschaftlicher Rekultivierungsstandorte der Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft. Cottbus : Brandenburg TU, 126 p, Cottbuser Schr Bodenschutz Rekultivierung 30
- Tobias S (2005) Deriving threshold values for soil compaction from expert judgement [online]. Zu finden in <http://www.bodenkunde2.uni-freiburg.de/eurosoil/abstracts/id63_Tobias_full.pdf> [zitiert am 30.11.2010], ergänzt um bodenphysikalische Kennwerte per mail 2009
- Trautner A, Arvidsson J (2003) Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. *Soil Tillage Res* 73:107-188
- Voßbrink J (2005) Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren [online]. Zu finden in <http://eldiss.uni-kiel.de/macau/servlets/MCRFileNodeServlet/dissertation_derivate_00001434/d1434.pdf;jsessionid=B1ED2F107054563709CD6CA0B45CFBEA?hosts=>> [zitiert am 30.11.2010]
- Weyers M (1994) Auswirkungen von Melioration und bodenschonender Bewirtschaftung auf Bodeneigenschaften und Wasserhaushalt rekultivierter Böden aus Löß im Rheinischen Braunkohlengebiet. Aachen : Shaker, 197 p
- Weyers M, Schröder D (1991) Bodeneigenschaften verschieden meliorierter Neulandböden aus Löß unter konventioneller und bodenschonender Bewirtschaftung. *Mitt Dt Bodenkundl Ges* 66(2):1039-1042
- Wiemann A, Warnecke S (2003) Auswertung und Interpretation der bodenmechanischen Versuche : Praktikumsbericht ; Modul 82 Großpraktikum Ökosystemanalyse und Landschaftsschutz III [online]. Zu finden in <<http://www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/praktikum/ss03/protokolle/Interpretation%20bodenmechanik.PDF>> [zitiert am 30.11.2010]
- Wiermann C (1998) Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. Kiel : Univ, 213 p, Schr Inst Pflanzenernähr Bodenkde 45
- Zink A (2009) Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge auf physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung. Kiel : Univ, 144 p, Schr Inst Pflanzenernähr Bodenkde 84
- Zink A, Fleige H, Horn R (2008) Zur mechanischen Stabilität von Kalkmarschen : Spannungsausbreitungs- und Bodenstabilitätsmessungen bei Überfahrungsversuchen (Kaiser-Wilhelm- und Kronprinzenkoog in Dithmarschen) [online]. Zu finden in <http://www.lbeg.de/extras/boden/downloads/boeden_kueste/7_zink_stabilitaet_von_kalkmarschen.pdf> [zitiert am 30.11.2010]