

Texte

46
04

ISSN
0722-186X

**Ableitung von Kriterien zur
Charakterisierung einer
schädlichen Bodenveränderung,
entstanden durch
nutzungsbedingte Verdichtung
von Böden/Regelungen zur
Gefahrenabwehr**

**Umwelt
Bundes
Amt**



Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 200 71 245
UBA-FB 000706



**Ableitung von Kriterien zur
Charakterisierung einer
schädlichen Bodenveränderung,
entstanden durch
nutzungsbedingte Verdichtung
von Böden/Regelungen zur
Gefahrenabwehr**

von

**Dr. Matthias Lebert
Dr. Joachim Brunotte
PD Dr.-Ing. Claus Sommer**

Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist auch als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in dem Bericht geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet II 4.2
Holger Böken

Berlin, Dezember 2004

1. Berichtsnummer UBA-FB 000706	2.	3.
4. Titel des Berichts Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr		
5. Autoren Lebert, Matthias Brunotte, Joachim Sommer, Claus	8. Abschlussdatum 04.03.2004	
	9. Veröffentlichungsdatum 04.03.2004	
	10. UFOPLAN-Nr. 200 71 245	
6. Durchführende Institution Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Bundesallee 50; 38116 Braunschweig	11. Seitenzahl 128	
	12. Literaturangaben 186	
	13. Tabellen 22	
7. Fördernde Institution Umweltbundesamt; Postfach 33 00 22; 14191 Berlin	14. Abbildungen, Karten 21	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung In dem Vorhaben wird untersucht, ob eine Aufnahme von Regelungen zur Gefahrenabwehr von Bodenschadverdichtungen nach § 8 Bundes-Bodenschutzgesetz in die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung möglich ist. Eine Bodenschadverdichtung kann mittels bodenphysikalischer Untersuchungen und Feldgefüge- Ansprache festgestellt werden. Ein Prüfkonzept zur Gefahrenerkennung muss Indikatoren in vier Richtungen enthalten (Fahrzeug, Bodendruck, Druckbelastbarkeit und Berücksichtigung der Bodenfeuchte). Für den Unterbodenschutz werden vier Konzepte analysiert; alle sind in der derzeitigen Form noch nicht geeignet, als alleinige Basis zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung durch Verdichtung verwendet zu werden.		
17. Schlagwörter Bodenschadverdichtung, Unterboden, Bodenschutz, Gefahrenabwehr, Prüfkonzepte		
18. Preis	19.	20.

1. Report No. UBA-FB 000706	2.	3.
4. Report Title Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr		
5. Authors Lebert, Matthias Brunotte, Joachim Sommer, Claus	8. Report Date 04.03.2004	
	9. Publication Date 04.03.2004	
	10. UFOPLAN-Ref. No. 200 71 245	
6. Performing Institution Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Bundesallee 50; 38116 Braunschweig	11. No. of Pages 128	
	12. No. of References 186	
	13. No. of Tables 22	
7. Sponsoring Institution Umweltbundesamt; Postfach 33 00 22; 14191 Berlin	14. No. of Figures, Maps 21	
15. Supplementary Notes		
16. Abstract The goal of the project was to investigate whether or not it is possible to establish regulations to risk avert of soil damaging compaction into § 8 Federal Soil Protection Act. Harmful changes to the soil through compaction needs to be identified by soil physical investigations and soil structure estimation in the soil profile. A assessment concept has to include indicators in four directions (vehicle, soil pressure, soil bearing capacity and the consideration of soil moisture). Four concepts regarding subsoil compaction have been analysed; in the present form they all are not suitable to be the basis alone for characterising a soil damaging compaction and to take measures to risk avert, as well.		
17. Key Words Harmful Soil Compaction, Subsoil, Soil Protection, Aversion of Danger, Indicator, Federal Soil Protection Act		
18. Price	19.	20.

Inhalt

1	Einführung	1
2	Identifikation einer Bodenschadverdichtung	3
2.1	<i>Beschreibung und Bewertung möglicher Parameter</i>	5
2.1.1	Lagerungsdichte	5
2.1.2	Effektive Lagerungsdichte	7
2.1.3	Packungsdichte.....	9
2.1.4	Spatendiagnose	10
2.1.5	Strukturmerkmalskombination	11
2.1.6	Luftkapazität	12
2.1.7	Luftleitfähigkeit	14
2.1.8	Sauerstoff-Diffusion.....	17
2.1.9	Nutzbare Feldkapazität	21
2.1.10	Gesättigte Wasserleitfähigkeit	23
2.1.11	Ungesättigte Wasserleitfähigkeit	25
2.1.12	Wurzellängendichte.....	26
2.1.13	Eindringwiderstand	27
2.2	<i>Zusammenstellung eines Indikatorensystems für Bodenschadverdichtungen.....</i>	30
2.3	<i>Fazit: Identifikation einer Bodenschadverdichtung</i>	33
3	Erheblichkeit von Schäden durch Bodenverdichtungen.....	34
3.1	<i>Betroffene Bodenfunktionen, Folgen und deren Anzeiger</i>	35
3.2	<i>Aktuelle Schäden oder Veränderungen an den Bodenfunktionen</i>	37
3.3	<i>Zukünftige Prognosen.....</i>	41
3.3.1	Bodenmonitoring.....	41
3.3.2	Bodenmechanische Prognose	44
3.4	<i>Fazit: Erheblichkeit von Bodenverdichtungsschäden</i>	46
4	Prüfkonzepte zur Gefahrenerkennung.....	47
4.1	<i>Einzelindikatoren der Verdichtungsgefährdung.....</i>	48
4.1.1	Fahrzeugparameter.....	48
4.1.2	Bodendruck.....	51
4.1.3	Bodentypische Druckbelastbarkeit	53
4.1.3.1	Vorbelastung.....	54
4.1.3.2	Vergleichsberechnungen mit Regressionsansätzen	56
4.1.3.3	Druckbelastbarkeit nach KUL	69
4.1.3.4	Schadverdichtungsgefährdungsklassen nach ZALF	70
4.1.3.5	Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit im NIBIS	74
4.1.3.6	Vergleichseinstufung in Klassen von Vorbelastung, Schadverdichtungsgefährdung und potenzieller Verdichtungsempfindlichkeit	77
4.1.3.7	Plastizitätsgrenzen nach Atterberg	80
4.1.4	Bodenfeuchteabhängige Druckbelastbarkeit	82
4.2	<i>Prüfkonzepte und ihre Schlüsselindikatoren</i>	84
4.2.1	Konzept „Vorbelastung“ (ATV-DVWK).....	84
4.2.2	Konzept „Belastungsquotient“ (KUL)	87
4.2.3	Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ (ZALF).....	89
4.2.4	Konzept „Befahrbarkeit“ (FAL)	91
4.2.5	Vorschlag einer EU-Arbeitsgruppe	93
4.2.6	Fazit: Prüfkonzepte	94

5	Zusammenfassung der Ergebnisse	98
6	Schlussfolgerungen hinsichtlich Regelungen in der Bundes- Bodenschutz- und Altlastenverordnung.....	102
7	Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	103
8	Zusammenfassung.....	106
	Literatur.....	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Von Bodenschadverdichtung direkt betroffene Bodenfunktionen und mögliche Parameter als Anzeiger.....	4
Tabelle 2:	Einteilung der effektiven Lagerungsdichte in Klassen (LD-Stufen).	8
Tabelle 3:	Bewertungsschema der Parameter für ein Indikatorssystem zur Identifikation von Bodenschadverdichtung.	30
Tabelle 4:	Nach Anwendung der Ausschlusskriterien übrig gebliebene Indikatoren für eine Bodenschadverdichtung in der Reihenfolge ihrer Eignung.	32
Tabelle 5:	Indikatorensystem und Schadensschwellenwerte zur Erkennung einer Bodenschadverdichtung.....	32
Tabelle 6:	Ertragsschäden durch Bodenverdichtungen.....	38
Tabelle 7:	Berichte über Schäden an den Bodenfunktionen durch Schadverdichtungen	40
Tabelle 8:	Ermittelte Spannweiten für die Vorbelastung und die vertikale Druckbelastung (gemessen oder berechnet) für Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung	44
Tabelle 9:	Indikatoren für die Kriterien „Bodenbelastung“ und „Bodenbelastbarkeit“ aus vorhandenen Prüfkonzepthen zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen.....	47
Tabelle 10:	Kurzbewertung von Fahrzeugparametern für die Verwendung zur Charakterisierung der mechanischen Bodenbelastung in einem Prüfkonzepth	50
Tabelle 11:	Übersicht der Indikatoren für die bodentypische Druckbelastbarkeit	54
Tabelle 12:	Datenmatrix für Unterbodenhorizonte typischer deutscher Bodenregionen ...	58
Tabelle 13:	Übersicht der Gleichungen zur Berechnung der Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 der drei Vergleichsansätze	61
Tabelle 14:	Gemessene und geschätzte Vorbelastungen (Pv) der Vergleichsstandorte (pF 1,8)	63
Tabelle 15:	Potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit (Sm) in Abhängigkeit von der Bodenart nach NIBIS	75
Tabelle 16:	Ermittlung der Potenziellen Verdichtungsgefährdung (Sm) nach NIBIS	76
Tabelle 17:	Vereinheitlichung der Klassifizierung verschiedener Ansätze zur Bewertung der potenziellen Verdichtungsgefährdung	77
Tabelle 18:	Vergleich der Klassifizierung der potenziellen Verdichtungs-empfindlichkeit mit unterschiedlichen Ansätzen	79
Tabelle 19:	Einteilung von Böden in Gruppen zur Bewertung der Verdichtungs-empfindlichkeit unter Zugrundelegung der Plastizitätsgrenzen nach Atterberg aus dem Informationssystem Forstbefahrung der TU München	81
Tabelle 20:	Empfehlungen für SVGK-angepasste Kontaktflächendrücke in Ober- und Unterböden Brandenburgs für eine Bodenfeuchte von 70 % nFK	90
Tabelle 21:	Ziele und Wirkungsweise der Prüfkonzepthen zum Schutz gegen Bodenschadverdichtung.....	95
Tabelle 22:	Übersicht der Einzelindikatoren und Basisdaten von Prüfkonzepthen zum Schutz gegen Bodenschadverdichtungen.....	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht der durch Bodenverdichtung betroffenen Bodeneigenschaften, Prozesse und Bodenfunktionen sowie deren ranghöchste Anzeiger.....	36
Abbildung 2:	Zunahme der Lagerungsdichte und Abnahme des Gesamtporenvolumens von 144 niedersächsischen Ackerstandorten von 1952 bis 1982.....	43
Abbildung 3:	Vertikaler Bodendruck (gemessen) und Vorbelastung in einem konventionell bestellten, lehmig-schluffigen Sand bei Überfahrt eines Traktor-Gülewagen-Gespans und eines Mähdreschers.....	46
Abbildung 4:	Spannungsmodell zur Berechnung des vertikalen Bodendruckes unter Annahme einer elliptischen (Söhne) oder kreisrunden Kontaktfläche (Newmark) auf der Grundlage der Theorien nach Boussinesq und Fröhlich	52
Abbildung 5:	Schematische Ermittlung der Vorbelastung nach dem Casagrande-Verfahren.....	55
Abbildung 6:	Bodenregionen der Bundesrepublik Deutschland	57
Abbildung 7:	Vergleich der Schätzmodelle für die Vorbelastung mit originalen und idealisierten Variablen	67
Abbildung 8:	Vergleich der Schätzmodelle für die Vorbelastung nur mit idealisierten Variablen	68
Abbildung 9:	Beispiel für ein Nomogramm zur Abnahme der Luftkapazität ungestörter Bodenproben mit steigendem Druck im Ödometertest.....	70
Abbildung 10:	Obere Grenzwerte des optimalen Lagerungsdichtebereiches von Ap-Horizonten in Abhängigkeit von der Bodenart bei optimaler Humusversorgung.....	71
Abbildung 11:	Gruppierung der Böden in Schadverdichtungsgefährdungsklassen in Abhängigkeit von der Bodenart.....	72
Abbildung 12:	Druck-Verdichtungs-Kurven in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (% nFK) für die Bodenart SI3 in der Schadverdichtungsgefährdungsklasse 3	73
Abbildung 13:	Erstverdichtungsgeraden von repräsentativen Bodenarten der Schadverdichtungsgefährdungsklassen (SVGK) unter Berücksichtigung der Lagerungsdichtegrenzwerte	73
Abbildung 14:	Gesamtübersicht der Ermittlung von Druckbelastbarkeit und Druckbelastung des Bodens mit dem Vorbelastungskonzept.....	85
Abbildung 15:	Druckfortpflanzung unter einer kreisrunden Kontaktfläche nach Newmark	86
Abbildung 16:	Gesamtübersicht zur Ermittlung des Belastungsquotienten.....	88
Abbildung 17:	Beispiel für ein Bodendruck-Lagerungsdichteprofil für SVGK 3	89
Abbildung 18:	Spurtiefe eines 6-reihigen Köpfrdebunkers in Abhängigkeit von der Bunkerfüllung für zwei Bodenbearbeitungsverfahren.....	92
Abbildung 19:	Sensorik an der Einzelradmessvorrichtung der FAL zur Ermittlung von Radumdrehung und Reifenverformung.....	93
Abbildung 20:	Schematische Darstellung der in das Modell nach Jaklinski (1999) eingehenden Parameter der Reifenverformung.....	93
Abbildung 21:	Vorschlag für ein Prüfkonzept der mechanischen Belastbarkeit des Bodens in Abhängigkeit von der Verdichtungsempfindlichkeit und dem Reifeninnendruck.....	94

1 Einführung

Böden sind knappe und nicht erneuerbare natürliche Ressourcen. Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) verlangt daher, dass ihre Leistungsfähigkeit und natürlichen Funktionen erhalten bleiben. Das verpflichtet denjenigen, der auf den Boden einwirkt zur Vorsorge und gegebenenfalls auch zur Gefahrenabwehr, um schädliche Bodenveränderungen abzuwenden und nachhaltig die Bodenfunktionen zu sichern oder wiederherzustellen.

Die Sorge, das Bodengefüge könnte durch unsachgemäßen Technikeinsatz Schaden nehmen, stützt sich auf eine Vielzahl von Untersuchungen, bei denen unter Versuchsbedingungen im Einzelfall negative Auswirkungen von mechanischen Bodenbelastungen auf den Boden ermittelt wurden. In der Literatur sind diese Forschungsergebnisse zusammengestellt (u.a. Barnes et al., 1971; KTBL, 1986; Larson et al., 1989; Soane und van Ouwerkerk, 1994; KTBL, 1995; Horn et al., 2001). Trotz der Fülle von Einzelergebnissen ist es bisher nicht gelungen, generelle Aussagen zu den Auswirkungen des Technikeinsatzes auf die Entwicklung des Bodengefüges abzuleiten; zu komplex ist das Wirkungsgefüge aus aktuellem Bodenzustand, Bodenbelastbarkeit und Bodenbelastung.

Die geforderten Verhaltensweisen zur Vorsorge in der Landwirtschaft sind im § 17 BBodSchG in den Grundsätzen zur Einhaltung der guten fachlichen Praxis aufgelistet. Darin heißt es unter anderem, dass Bodenverdichtungen so weit wie möglich zu vermeiden seien. Die entsprechenden Handlungsempfehlungen sind in Vollzugshilfen von Bund- und Länderarbeitsgruppen zusammengestellt worden (KTBL, 1998; BML, 1999; BMVEL, 2001). Sie sind in dem 4-Bausteine-Konzept nach Sommer (1998) zusammengestellt und sollen von den jeweils zuständigen landwirtschaftlichen Beratungsstellen vermittelt werden.

Für die Gefahrenabwehr von Schäden an den Bodenfunktionen hat der Gesetzgeber mit § 8 BBodSchG die Option, nach der Anhörung von entsprechenden Fachkreisen, Anordnungen über zu ergreifende Maßnahmen zu treffen. Grundlage für solche Anordnungen ist die Bundes-Bodenschutzverordnung, die als untergesetzliches Regelwerk die zu treffenden Maßnahmen und ihre Herleitung beschreibt. Eine Aufnahme von Regelungen zur Gefahrenabwehr gegen Bodenschadverdichtungen in die Bundes-Bodenschutzverordnung erfolgte bisher nicht. Erste Vorschläge als Vollzugshilfen zur Abwehr von Bodenschadverdichtungen wurden von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft im Rahmen eines Kriterienkataloges für umweltverträgliche Landwirtschaft (KUL, Eckert et al., 1999), vom Zentrum für Agrarlandschaftsforschung Müncheberg (ZALF, Petelkau et al., 2000) und vom ATV-DVWK im Merkblatt 901 (Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil III, 2002) erarbeitet. Diese Konzepte wurden zunächst für Zwecke der Vorsorge entwickelt, enthalten jedoch auch Ansätze zur Abwehr von Schäden.

Sollen verbindliche Regeln zur Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen durch die nutzungsbedingte Verdichtung von Böden eingeführt werden, sind für den Bodenschutzvollzug zunächst folgende Fragen zu klären:

1. Definition des Gefahrenbegriffs: Wie kann ein Schadenseintritt bzw. die Besorgnis des Eintretens einer schädlichen Bodenveränderung durch Verdichtung zweifelsfrei beschrieben und identifiziert werden?
2. Welche Gefügeschäden im Boden führen zu einer erheblichen Beeinträchtigung von Schutzgütern ?
3. Welche Anforderungen sind an ein Prüfkonzert zur Beurteilung einer konkreten Schadverdichtungsgefährdung zu stellen?

Diese Fragen werden in dieser Reihenfolge im vorliegenden Forschungsbericht behandelt.

Es handelt sich beim vorliegenden Vorhaben um eine ergebnisoffene Prüfung, ob die Aufnahme von Regularien zur nutzungsbedingten Verdichtung von Böden in das untergesetzliche Regelwerk heute - nach fachlichen Gesichtspunkten - möglich ist.

Zu Beginn des Vorhabens wurde vereinbart, dass eine saisonal bedingte Verdichtung der Ackerkrume, die durch übliche Bodenbearbeitungstechnik wieder behoben werden kann, hier nicht im Vordergrund stehen soll. Die Betrachtung der Auswirkungen einer nutzungsbedingten Verdichtung auf die Bodenfunktionen konzentriert sich deshalb auf den Bodenbereich unterhalb der regelmäßig bearbeiteten Ackerkrume. Dies ist im Falle der Pflugbewirtschaftung der mineralische Unterbodenhorizont unterhalb des Ap-Horizontes. Im Falle flacher, konservierender Bodenbearbeitung kann das auch die nicht mehr gelockerte, ehemalige Unterkrume sein. Ein durch Krumenverdichtung eintretender Schaden, der Erosion und Oberflächenabfluss nach sich zieht, würde in diesem Zusammenhang durch die Regelungen in § 4 Abs. 3 BBodSchG und § 8 der BBodSchV nach Bodenschutzrecht behandelt.

2 Identifikation einer Bodenschadverdichtung

Das Bundesbodenschutzgesetz (§ 2, Abs. 2 BBodSchG) unterscheidet zwischen verschiedenen Gruppen von Bodenfunktionen:

- Ausgleichs- und Regelungsfunktionen für Stoff- und Wasserkreisläufe
- Filter-, Puffer- und Transformationsfunktionen
- Lebensraumfunktionen
- Produktionsfunktionen.

Schädliche Bodengefügeveränderungen wirken sich infolge Wechselwirkungen grundsätzlich auf alle Bodenfunktionen aus. Direkt betroffen sind aber zunächst die physikalischen Ausgleichs- und Regelungsfunktionen und die Produktionsfunktionen des Bodens. Ein Kriteriensystem zur Identifikation für Bodenschadverdichtungen muss sich an den direkt betroffenen Bodenfunktionen orientieren, um eine möglichst hohe Effizienz eines Indikators zu erreichen. **Tabelle 1** gibt einen Überblick über die von Schadverdichtung direkt betroffenen Bodenfunktionen und deren unmittelbare Indikatoren.

Es ist grundsätzlich zwischen Einzelparametern und aggregierten Parametern zu unterscheiden. Einzelparameter sind elementare, nicht mehr teilbare Eigenschaften. Sie haben entweder unmittelbaren Bezug zur Bodenfunktion, wie z.B. die Luftkapazität, oder sie deuten indirekt über mögliche Korrelation auf die Bodenfunktionen hin, wie z.B. die Lagerungsdichte. Aggregierte Parameter sind die Kenngrößen der Feldgefügeansprache, wie z.B. die Spatendiagnose oder die Packungsdichte, die zwar keinen unmittelbaren Bezug zu den Bodenfunktionen haben, aus deren Bewertungsmaßstab aber Rückschlüsse auf die Bodenfunktionen gezogen werden können.

Tabelle 1: Von Bodenschadverdichtung direkt betroffene Bodenfunktionen und mögliche Parameter als Anzeiger.

Bodenfunktion	Teilfunktion	Einzelparameter	Aggregierte Parameter
Luftkreislauf	Luftspeicherung	Luftkapazität Lagerungsdichte	Für alle Teilfunktionen: Feldgefügeansprache durch: • effektive Lagerungsdichte • Packungsdichte • Spatendiagnose • Strukturmerkmalskombination
	Luftleitung	Luftleitfähigkeit O ₂ -Diffusion Lagerungsdichte	
Wasserkreislauf	Wasserspeicherung	nutzbare Feldkapazität Lagerungsdichte	
	Wasserleitung	gesättigte/ungesättigte Wasserleitfähigkeit Lagerungsdichte	
Ertragsfähigkeit	Durchwurzelbarkeit	Wurzellängendichte Lagerungsdichte Eindringwiderstand	

Die aufgeführten Parameter werden im Folgenden einer Bewertung im Hinblick auf ihre Eignung zur Kennzeichnung einer Bodenschadverdichtung und ihre Verwendbarkeit für den Vollzug des Bundesbodenschutzgesetzes nach folgendem Schema unterzogen:

1. *Definition:* Der Parameter sollte klar und mit möglichst wenigen Worten definierbar sein.
2. *Analytik:* Der Parameter sollte über eine standardisierte Analytik zu bestimmen sein, die einfach und mit möglichst geringem Aufwand durchführbar ist.
3. *Indikatorqualität:* Der Parameter sollte eine Bodenschadverdichtung möglichst direkt anzeigen. Die Interpretierbarkeit des Parameterwertes sollte möglichst eindeutig sein, es darf nicht viel Spielraum für Diskussionen über den kausalen Zusammenhang zwischen Parameter und Schadverdichtung geben.
4. *Klassifizierung:* Der Parameter muss zur Identifikation einer Schadverdichtung anhand von Schadensschwellen insbesondere für den Unterboden klassifizierbar sein.
5. *Fazit:* Es erfolgt eine Positionierung über die Verwendbarkeit des Parameters für einen möglichen Vollzug des Bundesbodenschutzgesetzes.

2.1 Beschreibung und Bewertung möglicher Parameter

2.1.1 Lagerungsdichte

Definition

Die Lagerungsdichte (dB) gibt an, wie viel Trockenmasse ein Volumenelement Boden enthält (Hartge und Horn, 1992). Sie quantifiziert das durchschnittliche Verhältnis zwischen Festsubstanz und Hohlräumen eines Bodenvolumens. Sie hat die Dimension einer physikalischen Dichte (gcm^{-3}). Synonyme Bezeichnungen sind Rohdichte (trocken) oder Trockenrohdichte (engl.: bulk density).

Analytik

Die Bestimmung der Lagerungsdichte von original gelagerten Böden erfolgt durch Wägung einer Bodenprobe von bekanntem Bodenvolumen mit ungestörtem Bodengefüge (z.B. in einem 100-cm^3 -Stechzylinder). Die Bodenprobe darf kein freies Wasser mehr enthalten, sie muss mindestens 16 h lang bei 105°C getrocknet sein. Die Bestimmungsmethodik ist in bodenkundlichen Methodenbüchern dokumentiert, z.B. in Hartge und Horn (1992), Schlichting et al. (1995) und in Anleitungen von Normungsausschüssen und Verbänden z.B. DIN ISO (11272, 2001), VDLUFA (1991).

Indikatorqualität

Die Lagerungsdichte zeigt eine Veränderung der Dichtlagerung zuverlässig und sensibel an. Allerdings hat sie keinen direkten bodenfunktionalen Bezug, da eine physikalische Dichte keine Bodenfunktion ist. Folgt man dem Konzept der „Critical State Soil Mechanics“ nach Roscoe et al. (1958), dann ist ersichtlich, dass bei einem gegebenen Boden eine bestimmte Dichte durch ganz verschiedene Kombinationen der gefügebildenden Spannungen erzeugt werden kann. Je nach Belastungspfad ergibt sich dann bei gleicher Dichte eine ganz unterschiedliche Porenanordnung und Porengeometrie. Betrachtet man aber Böden aus einer geologischen Einheit, die etwa eine gleiche oder ähnliche Belastungshistorie aufweisen, dann kann man die Lagerungsdichte mit Einschränkungen doch als indirekten Indikator für Bodenfunktionen heranziehen, da zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass sich in Korrelation zur Lagerungsdichte auch viele andere bodenphysikalische Eigenschaften ändern. Besonders eng sind diese Korrelationen, wenn geschüttete Böden vorliegen, z.B. auf Rekultivierungsflächen (Tenholtern, 2000). Hier sind die Entstehungsbedingungen und die oben beschriebenen Einflüsse des Belastungspfades auf die Bodengefügeentwicklung weitgehend einheitlich. Die Voraussetzung für eine Verwendung der Lagerungsdichte als bodenfunktionaler Indikator ist allerdings, dass für konkrete Böden die Belastungshistorie bekannt und die korrelativen Beziehungen von Bodenfunktionen zur Lagerungsdichte empirisch ermittelt worden sind.

Klassifizierung

Der sehr eingeschränkte Bezug zwischen der Lagerungsdichte und einzelnen bodenfunktionalen Kenngrößen gewachsener Böden erfordert es, dass für eine Klassifizierung der Lagerungsdichte im Hinblick auf eine Schadverdichtung noch weitere Bodeneigenschaften hinzugezogen werden müssen. Mögliche Kriterien sind die Bodenart, der Bodentyp und das geologische Ausgangsmaterial der Bodenbildung. Der erfahrene Bodenkundler kann in Kenntnis dieser drei Größen eine gegebene Lagerungsdichte funktional einordnen. Er stützt sich dabei aber nicht auf ein Zahlenwerk, sondern auf seine Erfahrung. Eine Datengrundlage für systematische Zuordnungen von Lagerungsdichten zu bodenphysikalischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der drei o. g. Bodenkriterien ist bei den geologischen Landesdiensten vorhanden. Diese Daten konnten aber bisher nicht für eine Klassifizierung der Lagerungsdichte im Hinblick auf die Erkennung einer Bodenschadverdichtung ausgewertet werden. Die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4, 1994) der Geologischen Landesdienste teilt lediglich die gesamte Spannbreite der am häufigsten vorkommenden Werte in 5 gleich große Klassen ohne funktionalen Bezug ein.

Den einzigen, regional begrenzten Ansatz zur Bewertung der Lagerungsdichte für die Erkennung einer schädlichen Gefügeänderung bieten Petelkau et al. (2000) im Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“. Den Bodenartenuntergruppen des Feinbodens werden empirische ermittelte, optimale Lagerungsdichten und funktionale Lagerungsdichtegrenzwerte zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt für die Krume und den Unterboden unterschiedlich.

Im Bereich der Krume wurden die optimalen Lagerungsdichten durch gefügeabhängige Ertragskurven bestimmt. Der Lagerungsdichtegrenzwert entspricht der Lagerungsdichte beim Höchstertrag plus einen pauschalen Zuschlag von $0,5 \text{ g cm}^{-3}$. Bei Überschreitung dieses Grenzwertes wird von Schadverdichtung in der Krume ausgegangen. Es werden noch weitere Grenzwerte benannt, die nach dem Grad der zu erwartenden Ertragsausfälle gestaffelt sind.

Steuergröße dieses Konzeptes für den Krumenschutz ist der Ertrag, also die Produktionsfunktion. Lagerungsdichtegrenzwerte werden aber auch für den Unterboden im Bereich der Krumenbasis angegeben. Diese wurden nicht aus Ertragsmessungen abgeleitet, sondern aus Kompressionstests im Labor. Gesiebtetes Bodenmaterial wurde solange komprimiert, bis nach dem Verfahren von Gätke (1989) noch eine Mindestluftleitfähigkeit von 1 cm s^{-1} gemessen werden konnte. Schadensschwelle ist also eine Luftleitfähigkeit, der eine Lagerungsdichte korrelativ zugeordnet wird. Auch hier wird ein Nomogramm zum Abgreifen einer kritischen Lagerungsdichte in Abhängigkeit von der Bodenart angegeben. Auf die Vorgehensweise dieses Konzeptes wird später im Bericht noch intensiver eingegangen.

Eine Korrelation zwischen der Lagerungsdichte von gesiebten Böden und den Bodengefügeeigenschaften kann kausal dann gegeben sein, wenn der Belastungspfad, der zum vorhandenen Bodengefüge führte, einigermaßen einheitlich war. Das ist bei gewachsenen Ackerböden aber in der Regel nur in der Krume der Fall. Generell muss deshalb eine Abschätzung von Schadverdichtungen im Unterboden auf der

Basis von Messungen an gesiebttem Bodenmaterial sehr kritisch betrachtet werden. Durch den Siebvorgang wird die natürliche Lagerung gestört, d.h. das natürliche Bodengefüge wird verändert. Die bodenmechanische Forschung hat eindeutig bewiesen, dass für die Gefügebewertung gewachsener Böden kein gesiebtes Bodenmaterial herangezogen werden kann (u. a. Horn, 1990; Hartge, 1994). Ausnahmen sind lediglich bei sortiert abgelagerten Böden mit geringer Gefügedynamik denkbar, wie z.B. Böden aus Sandersanden oder fluviatilen Sandablagerungen.

Fazit

Die Lagerungsdichte (= Trockenrohdichte) kann als Indikator zur Bewertung des Gefüges von Unterböden natürlich gelagerter Böden generell nicht herangezogen werden, da entsprechende Klassifizierungen nicht vorhanden oder kausal nicht herleitbar sind. Ausnahmen sind bei Sandböden möglich.

Die Verwendbarkeit des Parameters ist jedoch für gepflügte Ackerkrumen gegeben, wenn regional Korrelationen auf empirischer Datengrundlage vorhanden sind. Gleiches gilt für technisch hergestellte Böden im Bereich der Rekultivierung.

2.1.2 Effektive Lagerungsdichte

Definition

Die effektive Lagerungsdichte (LD) ist eine Kenngröße der bodenkundlichen Feldgefügeansprache (Bodenkundliche Kartieranleitung, (KA4) 1994). Der erfahrene Bodenkundler kann die Gefügequalität eines Bodens am Bodenprofil sehen. Die visuellen Merkmale der Gefügebearbeitung sind zu einem Bestimmungsschlüssel zusammengefasst und erlauben eine funktionale Bewertung des Makrogrob- und des Makrofeingefüges. Die effektive Lagerungsdichte ist dimensionslos und wird in 5 LD-Stufen von gering bis sehr hoch eingeteilt.

Analytik

Der feldbodenkundliche Bestimmungsschlüssel für die effektive Lagerungsdichte ist in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4, 1994) der geologischen Landesdienste beschrieben. Er basiert auf Vorarbeiten von Mückenhausen (1963) und Benecke (1966). Weiterhin ist er Gegenstand der ATV-DVWK-Regel 129 (1995). Kriterien des Bestimmungsschlüssels sind Makrogrobgefügeform, Verfestigungsgrad, Rissbreite, Mikrogröbgefügeform, Größenklasse und Lagerungsart der Aggregate. Die Ansprache der effektiven Lagerungsdichte im Felde erfordert Erfahrung in der Bodenkartierung. Der Kartierer muss z.B. aus Erfahrung wissen, wie sich das bei aktuellem Wassergehalt vorgefundene Bodengefüge bei einem anderen Wassergehalt präsentieren würde.

Es existiert auch eine Berechnungsformel für die effektive Lagerungsdichte (LD) aus der Lagerungsdichte (dB) und dem Tongehalt (T) (Renger, 1971):

$$LD (-) = dB \text{ (gcm}^{-3}\text{)} + 0.009 T \text{ (\%)} \quad (1)$$

In diesem Fall stellt die effektive Lagerungsdichte einen dimensionslosen Zahlenwert dar, der über einen Schlüssel einer LD-Klasse zugeordnet werden kann (Tabelle 2).

Tabelle 2: Einteilung der effektiven Lagerungsdichte in Klassen (LD-Stufen).

LD-Stufe	Bezeichnung	häufig auftretende Kennwerte nach: $\text{dB (gcm}^{-3}) + 0,009 T (\%)$
LD 1	sehr gering	<1,4
LD 2	gering	1,4–1,6
LD 3	mittel	1,6–1,8
LD 4	hoch	1,8–2,0
LD 5	sehr hoch	>2,0

Indikatorqualität

Die effektive Lagerungsdichte (LD) stellt als Ergebnis einer Gefügeansprache den Bezug zwischen der Dichtlagerung und den Eigenschaften des Bodengefüges her. Sie ist damit bodenfunktional aussagefähig und kann grundsätzlich zur Identifikation von Schadverdichtungen herangezogen werden.

Die Verwendung der Gleichung (1) zur Ermittlung der effektiven Lagerungsdichte ist ein Weg, bei dem auch ohne Gefügeansprache ein LD-Wert ermittelt werden kann. Sie ist zur Gefügebewertung weit verbreitet, da sie von der Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde der geologischen Bundes- und Landesdienste in die 3. und 4. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA3, 1982; KA4, 1994) übernommen wurde. Die Datenbasis der Regressionsgleichung stammt allerdings von dränbedürftigen Böden der Marschen, Auen- und Tonbodenlandschaften. Verwitterungsböden oder Böden der Löß- und Moränenlandschaften sind nicht dabei. Darüber hinaus kann die Formel die Durchwurzelung und die Ausprägung des Grobporensystems nicht berücksichtigen. Mit der Gleichung kann zwar ein dichtes Bodengefüge erkannt werden. Man kann damit aber keinen Schaden diagnostizieren, da keine visuelle Gefügeansprache stattfindet. Sie ist also zur Erkennung von Schadverdichtungen nicht geeignet.

Klassifizierung

Eine Klassifizierung der effektiven Lagerungsdichte in Sinne einer Funktionalität des Bodengefüges ist in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 4, 1994) aufgeführt (Tabelle 2). Mit zunehmender LD-Stufe nehmen die sichtbaren, weiten Grobporen ab, die Gefügeausdifferenzierung nimmt ab und die Gefügeeinheiten werden größer.

Fazit

Die effektive Lagerungsdichte hat bodenfunktionalen Bezug, sie gibt Aufschluss über die Dichtheit oder Lockerheit eines Bodens und es existiert eine allgemein aner-

kannte Klassifizierung. Sie erfüllt damit als Parameter die Voraussetzungen für eine Anwendung im Vollzug. Allerdings ist die rechnerische Bestimmung aus Lagerungsdichte und Tongehalt für eine Identifikation von Schadverdichtungen in einem Vollzugssystem nicht verwendbar, da bei dieser Bestimmung die Kriterien der Gefügeansprache nicht angewandt werden.

2.1.3 Packungsdichte

Definition

Die Packungsdichte ist ähnlich wie die effektive Lagerungsdichte eine bodenkundliche Kenngröße zur Beschreibung der Dichte bzw. Lockerheit des Bodengefüges (DIN 19682-10, 1998). Sie wird in 5 Stufen eingeteilt und ist dimensionslos. Sie unterscheidet sich von der effektiven Lagerungsdichte dadurch, dass die visuellen Beurteilungskriterien des Bodengefüges hinsichtlich der Bewertung der physikalischen Bodenfunktionen weiter verfeinert wurden. Die am Bodenprofil ermittelte Packungsdichte wurde mit Laboranalysen von Kenngrößen wie Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität, Wasser- und Luftleitfähigkeit sowie weiteren Feldanalysen wie Wurzellängendichten und Penetrometerwiderständen verglichen und daran geeicht. Es gibt zwar keine allgemeingültige Berechnungsformel, so wie in dem einfacheren Ansatz der effektiven Lagerungsdichte. Es ist jedoch möglich, für bestimmte Bodengruppen die Packungsdichte mit multiplen Regressionsgleichungen anhand von bodenphysikalischen Messwerten zu berechnen, insofern eine entsprechende Datenbasis vorhanden ist (Harrach et al., 1999).

Analytik

Die Ermittlung der Packungsdichte geschieht an der Profilwand im Felde. Der Bewertungsschlüssel für die Zuordnung der Packungsdichte ist in DIN 19682-10 (1998) beschrieben. Als Parameter gehen ein: Aggregatgröße, Verfestigungsgrad, Lagerungsart, Makroporenanteil und Wurzelverteilung.

Indikatorqualität

Die Packungsdichte hat ähnliche Indikatorqualität wie die effektive Lagerungsdichte. Sie ist ein indirektes Maß für die physikalische Funktionalität des Bodengefüges. Sie ist damit grundsätzlich geeignet, einen Verdichtungsgrad und damit auch Schadverdichtungen anzuzeigen. Während die effektive Lagerungsdichte mehr auf eine allgemein bodenkundliche Gefügeansprache ausgerichtet ist, orientiert sich die Gefügeansprache durch die Packungsdichte mehr an der Durchwurzelung und den physikalischen Bodenfunktionen. Es konnten Zusammenhänge zwischen der Packungsdichte und allen funktional wichtigen bodenphysikalischen Parametern und Durchwurzelungs- und Ertragskenngrößen ermittelt werden (Harrach, 1984; Dumbek, 1986; Harrach und Vorderbrügge, 1991; Selige, 1997; Tenholtern, 2000).

Klassifizierungen

Eine Klassifizierung der Packungsdichte gibt DIN 19682-10. Die Einteilung erfolgt analog zur effektiven Lagerungsdichte in 5 Klassen. Die Stufen 4 und 5 sind auf die Erfassung von Schadverdichtungen ausgerichtet.

Fazit

Die Packungsdichte eignet sich ähnlich wie die effektive Lagerungsdichte als Indikator einer Schadverdichtung für den Vollzug. Ihr Vorteil gegenüber der effektiven Lagerungsdichte ist ihre stärker auf die Beschreibung der bodenphysikalischen Eigenschaften ausgerichtete Gefügeansprache. Sie erfordert allerdings vom Kartierer noch mehr Erfahrung als die Ansprache der effektiven Lagerungsdichte.

2.1.4 Spatendiagnose

Definition

Die Spatendiagnose ist ein weiteres Verfahren zur Gefügebeurteilung im Felde (Diez und Weigelt, 1997). Die Beurteilung basiert auf der Erfahrung von Zusammenhängen zwischen der sinnlich wahrnehmbaren Gefügeform und -ausprägung und dem Pflanzenwachstum. Kennziffer ist eine dimensionslose Stufe auf einer 5-stufigen Skala.

Analytik

Die Spatendiagnose wurde erstmals von Göbring (1947) als ein technisch einfaches Instrument zur schnellen Bodengefügebestimmung im Felde vorgestellt. Später wurde das Verfahren von Diez und Weigelt (1989, 1. Auflage; 1997, 2. Auflage) für die gezielte pflanzenbauliche Beurteilung von Oberkrume, Unterkrume, oberem Unterboden und unterem Unterboden weiter vereinfacht und objektiviert. Je nach Zieltiefe wird der Boden mit dem Spaten freigelegt, ein Bodenblock herausgelöst, auseinander gebrochen und bewertet. Die Bewertung erfolgt aufgrund von optischer, fühlbarer und riechbarer Wahrnehmung. Das Beurteilungsschema wird mit viel Bildmaterial zum Vergleich hinterlegt.

Indikatorqualität

Die Spatendiagnose hat ähnliche Indikatorqualität wie die effektive Lagerungsdichte und die Packungsdichte. Sie ist ein indirektes Maß für die physikalische Funktionalität des Bodengefüges. Sie ist ebenfalls grundsätzlich geeignet, einen Verdichtungsgrad und damit auch Schadverdichtungen anzuzeigen (Diez, 1991). Das Verfahren der Spatendiagnose ist primär auf die Bewertung des Pflanzenwachstums ausgerichtet. Ausgleichs- und Regelungsfunktionen des Bodens werden nur indirekt einbezogen.

Klassifizierung

Eine Klassifizierung ist als 5-stufige Skala vorhanden. Die günstigste Gefügestufe ist die 1 und die ungünstigste die 5. Verdichtungsschäden werden in die Stufen 4 und 5 eingeordnet.

Fazit

Mit der Spatendiagnose liegt ein weiterer Indikator zur Gefügebewertung im Felde vor, der grundsätzlich im Vollzug zur Erkennung von Schadverdichtung verwendet werden kann. Ihr Vorteil gegenüber den anderen beiden Verfahren ist der etwas geringere analytische Aufwand, da die Priorität der Untersuchung nicht auf die Profilwand, sondern auf den heraus gelösten Bodenblock gerichtet ist. Dadurch ist eine leichtere Beurteilung von großen Flächen möglich. Nachteile ergeben sich durch die Restsubjektivität, die auch nach der Objektivierung über ein fotografisch hinterlegtes Auswerteschema übrigbleibt. Die Spatendiagnose wurde im Vergleich zur Packungsdichte stärker an Erfahrungswerten geeicht, während sich die Packungsdichte mehr an der bodenphysikalischen Analytik orientiert.

2.1.5 Strukturmerkmalskombination

Definition

Die Strukturmerkmalskombination ist ein weiteres, visuelles Verfahren der Feldgefügeansprache, bei der fünf einzelne Strukturmerkmale in einer 4- bis 5-stufigen Skala bonitiert werden (Werner und Thämert, 1989). Das Boniturergebnis wird zu einer Zahlenkombination aus fünf Ziffern zusammengesetzt, z.B. 11222. Jede Ziffer steht für das Ergebnis der Bonitur eines bestimmten Strukturmerkmals. Eine kleine Ziffer bedeutet günstige und eine große Ziffer ungünstige bodenphysikalische Strukturmerkmale.

Analytik

Die Vorgehensweise beschreiben Werner und Thämert (1989). Folgende Strukturmerkmale werden in Anlehnung an TGL 24300/ 19 bonitiert:

- Größe der Gefügekörper (fünf Klassen)
- Form der Gefügekörper (vier Klassen)
- Scharfkantigkeit und Glattflächigkeit der Aggregatoberflächen (fünf Klassen)
- Öffnungswinkel der Aggregatgrenzflächen (vier Klassen)
- Anteile an biogenen Gröbstporen (vier Klassen).

Indikatorqualität

Die visuelle Ansprache wurde an bodenphysikalischen Merkmalen geeicht. Die Ansprachequalität ist vergleichbar mit den anderen beschriebenen Methoden der Feldgefügeansprache. Die Zielsetzung dieses Verfahrens ist jedoch eine Bewertung

der Meliorationsbedürftigkeit eines Standortes und die gleichzeitige Auswahl einer geeigneten Meliorationsmaßnahme. Da sich die Wahl des Meliorationsverfahrens nach der Art des Gefügeschadens richten muss, hat man sich dazu entschlossen, eine kombinierte Gefügekennzahl einzuführen, die erkennen lässt, wo die Schwächen einer Bodenstruktur liegen. Eine durchschnittliche Bewertungsziffer oder -klasse hätte die Anforderungen aus der Bodenmelioration nicht erfüllt.

Klassifizierung

Die Klassifizierung reicht von der optimalen Kombination 11111 bis zur ungünstigsten von 54544. Wie bereits ausgeführt kennzeichnet eine niedrige Ziffer günstige und eine hohe Ziffer ungünstige bodenphysikalische Strukturzustände. Es gibt allerdings keine Klassifizierung für eine Gesamtbewertung des Standortes. Es ist nicht klar definiert, bei welcher Kombination eine Schadverdichtung vorliegt.

Fazit

Wegen der fehlenden Gesamtbewertung des Standortes ist eine Verwendung des Verfahrens für den Bodenschutzvollzug problematisch. Es erfordert sehr viele Spezialkenntnisse des Anwenders, um die Strukturmerkmalskombination richtig zu interpretieren. Solange eine Klassifizierung der Methode fehlt, kann sie als Verfahren für den Vollzug im Sinne dieses Vorhabens nicht verwendet werden. Regionale Anwendung durch entsprechende Experten ist allerdings denkbar. Die Autoren selbst sagen, dass für eine breitere Anwendung des Verfahrens noch eine einfachere Auswertungsvariante zu entwickeln sei (Werner und Thämer, 1989).

2.1.6 Luftkapazität

Definition

Unter der Luftkapazität wird der Anteil der weiten Grobporen am Gesamtvolumen des Bodens verstanden (Hartge und Horn, 1992). Ihre Dimension ist Vol.-%. Weite Grobporen sind Poren mit einem Äquivalentdurchmesser von größer 0,05 mm.

Analytik

Die Luftkapazität wird an ungestörten Stechzylinderproben durch Entwässerung bestimmt. Die wassergesättigten Proben werden mit Unter- oder Überdruck bis zu einem mittleren Porenwasserdruck von – 6 kPa entwässert. Die Ermittlung des Restwassergehalts erfolgt gravimetrisch oder pyknometrisch. Die Methode gehört zur bodenphysikalischen Standardanalytik (Hartge und Horn, 1992; Schlichting et al., 1995; DIN ISO 11274, 2001; VDLUFA, 1991).

Indikatorqualität

Die Luftkapazität ist ein Maß für die Durchlüftbarkeit des Bodens und hat damit direkten bodenfunktionalen Bezug. Sie ist eine potentielle Kenngröße, die nur bei der

Bodenfeuchte von 100 % Feldkapazität wirksam ist. Sie eignet sich also zur Beurteilung der Durchlüftbarkeit von Böden bei dem Wassersättigungsgrad, der in unserem Klima üblicherweise im Frühjahr und im späten Herbst vorherrscht. Da sie über die Desorptions-Wasserspannungskurve bestimmt wird, können Hysteresiseffekte die tatsächliche Luftkapazität bei Wiederauffüllung des Porensystems z.B. im Herbst oder auch während der Vegetationsperiode vergrößern.

Klassifizierungen

Die Bedeutung des Luftgehaltes im Boden wurde unter verschiedenen funktionalen Aspekten untersucht.

Im Pflanzenbau konzentriert sich das Interesse an der Luftkapazität auf die Betrachtung der Sauerstoffversorgung der Kulturpflanzen. Nach Untersuchungen von Geisler (1967) wirken sich O₂-Konzentrationen von unter 16 Vol.-% vermindern auf das Wurzellängenwachstum aus. Allerdings reagieren die Kulturen unterschiedlich stark auf den O₂-Gehalt. In den Lehrbüchern des Pflanzenbaus werden einhellig optimale Luftkapazitäten von 10-20 Vol.-% angegeben, die die geforderte O₂-Konzentration sicherstellen (z.B. Czeratzki, 1978; Lütke-Entrup und Öhmichen, 2000). Geisler (1980) nennt Luftkapazitäten unter 5 Vol.-% als „sehr gering“ und ordnet sie den Tonböden zu. Als „mittel“ bezeichnet er Werte von 10-15 Vol.-% als typisch für Braunerden und Parabraunerden. Die Zahlen des Pflanzenbaus hinsichtlich des Luftbedarfs der Pflanze beziehen sich aber überwiegend auf die optimale Herrichtung der Ackerkrume und basieren meist auf Gefäßversuchen. Sie sind kaum zur Erkennung von nutzungsbedingten Schadverdichtungen im Unterboden verwendbar.

Ein auf systematischen Versuchen aufgebautes Beurteilungsschema des Unterbodenluftgehaltes für das Pflanzenwachstum wurde im Zusammenhang mit der Entwicklung des Packungsdichtekonzepts erstellt. Dumbeck (1986) fand in der Krume von Lößböden eine deutliche Abnahme der Wurzellängendichte von Wintergerste bei Luftkapazitäten unter 6 Vol.-%. Im Unterboden erfolgte hingegen eine kontinuierliche Abnahme der Wurzellängendichte mit dem Luftgehalt ohne erkennbaren funktionalen Schwellenwert. Die Pflanzen reagierten allerdings sensibler auf die Luftdurchlässigkeit als auf die Luftkapazität. Harrach et al. (1999) geben in der Packungsdichteklasse „sehr hoch“ für sandige und schluffige Kippsubstrate im Unterboden Luftkapazitäten von 4-6 Vol.-% an. Solche Zuordnungen von Wurzelwachstum und Luftkapazität sind jedoch sehr aufwendig zu erstellen, weshalb der vorhandene Datenbestand für eine generelle, systematische Auswertung zu klein ist. Bei den vorhandenen Untersuchungen wird aber immer wieder der Bereich von 4-6 Vol.-% Luftkapazität als derjenige identifiziert, bei dem das Wurzelwachstum im Unterboden auffällig reagiert.

Ein anderer Weg, um die Effekte der Luftkapazität auf die Bodenfunktionen zu quantifizieren, ist die Ermittlung von Korrelationen zwischen Luftkapazität und Sauerstoffverhalten im Boden. Flühler (1973) fand heraus, dass an einem saalezeitlichen Pseudogley aus Geschiebelehm bei Luftkapazitäten unter 4-6 Vol.-% der Sauerstoffpartialdruck auf Werte unter 15 Vol.-% sinken kann, also in den Bereich, ab dem die

Pflanzenwurzel mit Längenwachstumsstörungen reagiert (Geisler, 1967). Unterhalb dieses Luftkapazitätsbereiches schwankte der Diffusionskoeffizient für Sauerstoff um den Faktor 10000, was der Differenz der O₂-Diffusion in reiner Luft und reinem Wasser entspricht. Bei geringen Luftkapazitäten unter den genannten Werten bilden sich also Luftinklusionen aus, bei denen die O₂-Diffusion Wasserbarrieren überwinden muss.

Allerdings wurden auch bei sehr geringen Luftkapazitäten unter 4 Vol.-% vereinzelt O₂-Konzentrationen der Atmosphäre gemessen. Die Werte streuen also sehr stark in Abhängigkeit von der Porenkontinuität.

Blume (1968) stellte bei Untersuchungen an Stauwasserböden einen Zusammenhang zwischen Luftkapazität und dem Redoxpotential fest. Unterhalb einer Luftkapazität von 5 Vol.-% sank auch das Redoxpotential (Eh) längerfristig unter 200 mV und verursachte sichtbare, hydromorphe Marmorierungen.

Die bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Untersuchungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass in Unterböden unterhalb einer Spanne für die Luftkapazität von 4-6 Vol.-% eine Behinderung der Sauerstoff-Nachlieferung in den Boden zu erwarten ist, die sich nachteilig auf die Bodenfunktionen und das Pflanzenwachstum auswirkt. Diese Klassifizierung wurde auch in die Standard-Literatur zur Bodenphysik übernommen (Hartge und Horn, 1992).

Fazit

Die Luftkapazität ist grundsätzlich zur Identifikation einer Schadverdichtung geeignet. Sie hat direkten bodenfunktionalen Bezug und es existieren Schadensschwellenwerte. Allerdings ist eine Schadwirkung geringer Luftkapazitäten abhängig von der Porenkontinuität, so dass die Luftkapazität nicht allein als Indikator herangezogen werden kann.

2.1.7 Luftleitfähigkeit

Definition

Die Luftleitfähigkeit beschreibt den Durchfluss eines Luftvolumens durch einen Bodenquerschnitt in einer Zeiteinheit unter dem antreibenden Einfluss eines Druckgradienten. Sie beschreibt die Fähigkeit des Bodens, Luft unter den physikalischen Bedingungen des Massenflusses zu leiten. Am Lufttransport nehmen jeweils nur die von Wasser entleerten Porengrößenklassen teil (Hartge, 1967).

Die Luftleitfähigkeit wird über die Darcy-Gleichung berechnet:

$$VI = kl \times dh/l \quad (2)$$

mit:

VI = Volumenstrom Luft durch Bodenquerschnitt und Zeit (cm³cm⁻²s⁻¹)

kl = Luftleitfähigkeitskoeffizient (cms⁻¹)

dh = pneumatische Druckdifferenz (cm Luftsäule)

l = Fließlänge (cm)

dh/l = pneumatischer Druckgradient (-)

In dieser Form der Darcy-Gleichung werden beim Luftleitfähigkeitskoeffizienten k_l die Einflüsse von Viskosität und Dichte des Fließmediums und der Gravitation nicht berücksichtigt. Entscheidend für die Größe des k_l -Wertes ist die Wahl der Druckdimension im Gradienten. Wählt man anstelle der Höhe einer Luftsäule die Höhe einer Wassersäule, dann ist der Koeffizient etwa 775-mal größer. Dieser Faktor entspricht etwa dem Dichteverhältnis zwischen Wasser und Luft unter Standardbedingungen.

Eine andere Dimension als in Gleichung (2) erhält der Luftleitfähigkeitskoeffizient unter zusätzlicher Berücksichtigung von Viskosität und Dichte des Fließmediums und der Schwerkraft (3):

$$V_l = k_{oo} \times d \times g / \eta_l \times dh/l \quad (3)$$

- V_l = wie in (2)
- k_{oo} = Luftleitfähigkeitskoeffizient (10^{-8} cm^2)
- d = Dichte der Luft (gcm^{-3})
- g = Gravitation (981 cms^{-2})
- η_l = Viskosität der Luft ($\text{gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
- dh/l = wie in (2)

Der Luftpermeabilitätskoeffizient k_{oo} erhält jetzt die Dimension einer Fläche (cm^2) und ist von den Eigenschaften des Fließmediums unabhängig. Diese Form der Luftleitfähigkeit wird deshalb als intrinsische (= wahre) Permeabilität bezeichnet. Die Größe des Koeffizienten hängt aber auch hier von der Wahl der Druckdimension im Druckgradienten ab.

Analytik

Die Ermittlung der Luftleitfähigkeit geschieht meist mit selbst gebauten Geräten. Je nach Geräteaufbau und Berechnungsformel werden zur Beschreibung der Luftleitfähigkeit unterschiedliche Koeffizienten verwendet. Auch die Kürzel für die Koeffizienten unterscheiden sich. Kmoch (1962) und Kmoch und Hanus (1965) beschreiben ein Gerät zur Bestimmung der intrinsischen Permeabilität k_{oo} nach Gleichung (3). Als Druckeinheit im Gradienten verwenden sie dyn cm^{-2} , wodurch die Ergebnisse in der Größenordnung von 10^{-6} bis 10^{-8} cm^2 liegen. Eine ehemalige, nicht mehr gültige DIN-Norm (19682/9, 1972) beschreibt eine Feldmessmethode der Luftleitfähigkeit k_l in Anlehnung an Gleichung (2), bei der allerdings der Druck im Gradienten als N cm^{-2} eingeht. Die Ergebnisse liegen in der Größenordnung um 10^{-3} cms^{-1} .

Gätke (1989) beschreibt ein Verfahren, bei dem in Anlehnung an Gleichung (2) der Druckgradient über eine Luftsäulendifferenz angegeben wird. Er nennt den Permeabilitätskoeffizienten PI , der in cms^{-1} dieselbe Größenordnung hat wie der k_l -Wert beim ehemaligen DIN-Verfahren. Eine andere Methode und ein dazugehöriges, kommerziell erwerbbares Gerät beschreiben UGT (1999). Die Methode arbeitet nach Gleichung (2), verwendet aber als Druckeinheit eine Wasserstandsdifferenz (cm Wassersäule). Der Koeffizient wird ebenfalls als PI bezeichnet und hat eine Größen-

ordnung um 1 cm s^{-1} . Dieser Koeffizient ist laut Gerätehersteller direkt über das Viskositätsverhältnis von Wasser und Luft in einen Wasserleitfähigkeitskoeffizienten umrechenbar. Diese Zusammenstellung zeigt, dass es für die Bestimmung der Luftleitfähigkeit kein Standardverfahren gibt. Eine Aufnahme des Parameters in die Methodenbücher der Bodenkunde und des VDLUFA erfolgte bisher nicht.

Indikatorqualität

Grundsätzlich ist die Luftleitfähigkeit ein sehr sensibler Parameter zur Beschreibung von funktionalen Veränderungen der Bodenstruktur, insbesondere des für die Durchlüftung wichtigen Makroporensystems. Das wurde im Pflanzenbau schon früh erkannt, die ersten Berichte über Messmethoden der Luftleitfähigkeit stammen aus dem 19. Jahrhundert (Wollny, 1893). Hartge (1967) nennt die Indikatorqualität der Luftleitfähigkeit für die Kontinuität des Porensystems als gleichwertig zur gesättigten Wasserleitfähigkeit. Lebert (1989) beschreibt eine Abnahme der Luftleitfähigkeit mit steigender Verdichtung von Laborproben, die sehr exakt dem Verlauf der entsprechenden Verdichtungskurve folgt. In zahlreichen, weiteren Publikationen ist der hohe Wert der Luftleitfähigkeit zur Charakterisierung des bodenfunktionalen Verdichtungszustandes belegt (Gupta et al., 1989; Burger et al., 1988; Gätke, 1989; Petelkau, 1985; Gullich und Werner, 1984).

Klassifizierung

Da für den Parameter eine einheitliche Definition und Analytik fehlen, kann es auch keine einheitliche Klassifizierung geben. Eine Klassifizierung des intrinsischen Permeabilitätskoeffizienten k_{oo} geben Knoch und Hanus (1965) auf der Basis von Untersuchungen an einer gut durchlüfteten Parabraunerde aus Löss und einem schlecht durchlüfteten Pseudogley aus Löss. Nach Zuordnungen von anderen bodenphysikalischen Kenngrößen, wie gesättigte Wasserleitfähigkeit, Luftkapazität und Lagerungsdichte und dem Wurzelbild, ordnen sie k_{oo} -Werte unter 10 Mikron ($= 10^{-8} \text{ cm}^2$) als sehr geringe und k_{oo} -Werte über 100 Mikron als sehr hohe Luftleitfähigkeit ein. Dazwischen wurden drei weitere Klassen (gering, mittel und hoch) eingestuft. Harrach et al. (1999) stufen diese Klassifizierung für sandige und schluffige Kippsubstrate um eine Zehnerpotenz tiefer ein.

Rogasik (1990) nennt für Ackerkrumen sandiger Moränenböden eine minimal zu fordernde Luftleitfähigkeit nach dem Verfahren von Gätke (1989) von $1,0 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$. Petelkau et al. (2000) geben für Unterböden der gleichen Bodentypen einen Wert von $1,0 \text{ cm s}^{-1}$ nach dem UGT-Verfahren an, bei dessen Unterschreitung eine Schadverdichtung vorliegt.

Fazit

Der Parameter Luftleitfähigkeit ist grundsätzlich geeignet, sehr genaue Aussagen über den funktionalen Zustand der Leitfähigkeitssysteme für Luft im Boden zu machen. Er charakterisiert die Kontinuität der leitenden Poren und stellt somit die ideale Ergänzung zur Luftkapazität für die Bewertung der Durchlüftbarkeit von Böden

dar. Klassifizierungsansätze sind ebenfalls vorhanden. Probleme für die Verwendung des Parameters im Bodenschutzvollzug stellen jedoch die nicht standardisierte Analytik und die verschiedenen Berechnungsweisen dar. Die verschiedenen Messmethoden und Größenordnungen des Leitfähigkeitskoeffizienten könnten in einem Vollzugssystem zu Verwirrungen und Fehlern führen. Vor einer Verwendung dieses Parameters wären unbedingt Normierungen von Analytik und Berechnung erforderlich. Hilfreich wäre eine Neuauflage der alten DIN 19682-9.

2.1.8 Sauerstoff-Diffusion

Definition

Die O₂-Diffusion wird als der O₂-Teilchenstrom eines Stoffes in einem umgebenden Medium bezeichnet (Flühler, 1973). Antrieb des Teilchenstroms ist eine von Ort zu Ort unterschiedliche Teilchenzahldichte. Umgebende Medien für die O₂-Diffusion im Boden sind Luft, Wasser und Festsubstanz. Zur Charakterisierung der O₂-Diffusion im Boden werden drei verschiedene Kenngrößen verwendet:

- 1) Der relative, scheinbare Diffusionskoeffizient (Ds/Do)

Die Diffusion wird beschrieben durch das 1. Fick'sche Gesetz:

$$V_o = -D_s \times dc/dx \quad (4)$$

mit

V_o = Volumenstrom O₂ pro Flächeneinheit und Zeit (cm³ cm⁻² s⁻¹)

D_s = Diffusionskoeffizient (cm² s⁻¹)

dc = Konzentrationsgefälle (cm³ x cm⁻³)

dx = Diffusionsweg (cm)

dc/dx = Konzentrationsgradient (cm⁻¹)

Die O₂-Diffusionskoeffizienten sind in den Medien Luft, Wasser und Festsubstanz sehr verschieden. Die O₂-Diffusion in Wasser ist 10⁴-mal kleiner als in Luft und diejenige in der mineralischen Festsubstanz etwa 10⁶-mal kleiner als die in Wasser. Ein effektiver Diffusionskoeffizient für das gesamte Bodenvolumen wäre daher schwer zu bestimmen und auch wenig anschaulich. Infolge der Dominanz der O₂-Diffusion in Luft wird zur Charakterisierung der Diffusionseigenschaften des Makroporensystems das Wasser in seinen Diffusionseigenschaften zur Festsubstanz dazugerechnet und gemeinsam mit dieser als praktisch impermeabel betrachtet. Der Diffusionsstrom wird dann nur durch das luftgefüllte Porensystem gesteuert. Der Diffusionskoeffizient heißt deshalb „scheinbarer O₂-Diffusionskoeffizient“ (Ds). Üblicherweise wird bei der Messung die Geometrie der Bodenprobe als Diffusionsweg eingesetzt, wodurch der scheinbare Diffusionskoeffizient sowohl die Einflüsse des luftgefüllten Porenvolumens als auch der Tortuosität der luftgefüllten Poren enthält.

Zur weiteren Verbesserung der Anschaulichkeit des Parameters wird der scheinbare Diffusionskoeffizient (Ds) auf den Diffusionskoeffizienten von O₂ in reiner Luft (Do) bezogen und heißt dann „relativer, scheinbarer Diffusionskoeffizient“ (Ds/Do).

D_0 ist eine temperaturabhängige Konstante und beträgt z.B. bei 0 °C $0,178 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Flühler, 1973). Der relative, scheinbare Diffusionskoeffizient ist dimensionslos und charakterisiert die relative Veränderung der O_2 -Diffusion im Porensystem eines Bodenvolumens gegenüber derjenigen der freien Atmosphäre.

2) Die Diffusionskonstante (K)

Will man Aussagen zur unmittelbaren O_2 -Versorgung der Pflanzenwurzel machen, so reicht der relative, scheinbare Diffusionskoeffizient D_s/D_0 nicht aus. Die Pflanze nimmt nur in Wasser gelösten Sauerstoff auf, so dass die Betrachtung des O_2 -Diffusionsstroms in diesem Fall um die flüssige Phase erweitert werden muss. Steuergröße des Diffusionstransports ist jetzt nicht mehr ein Konzentrationsgefälle, sondern ein Partialdruckgefälle, welches den unterschiedlichen Löslichkeiten von O_2 in Wasser und Luft Rechnung trägt.

Der scheinbare Diffusionskoeffizient D_s verändert sich zur Diffusionskonstanten K:

$$V_0 = - K \times dp/dx \quad (5)$$

mit:

K = Diffusionskonstante ($\text{Mol s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$) = $\alpha b \times D_s$

αb = Löslichkeitsverhältnis von O_2 in Wasser und Luft (-)
(auch Bunsenkoeffizient genannt)

D_s = scheinbarer Diffusionskoeffizient

dp = Partialdruckdifferenz (Pa)

dx = Diffusionsweg (cm)

dp/dx = Konzentrationsgradient (Pa cm^{-1})

3) Die Sauerstoffdiffusionsrate (Oxygen diffusion rate, ODR)

Die dritte Möglichkeit, die O_2 -Diffusion im Boden zu beschreiben, ist die direkte Berechnung einer Sauerstoffmenge, die zur Wurzel oder einer Elektrode hin diffundiert, ohne Berücksichtigung des Konzentrations- oder Partialdruckgefälles. Die Größe wird Sauerstoffdiffusionsrate genannt und hat die Dimension: $\mu\text{g O}_2 \times \text{s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

Analytik

Die Messung der O_2 -Diffusion im Boden ist nicht Gegenstand der bodenphysikalischen Standardanalytik. Beschreibungen in Lehrbüchern und Regelwerken fehlen deshalb weitgehend. Messgeräte zur O_2 -Bestimmung wurden in der Physik für die Gasanalytik entwickelt und in der Medizin zur Bestimmung des O_2 -Gehaltes im Blut. Der bodenkundliche Anwender muss die bodenphysikalische Komponente der Messapparatur im Eigenbau erstellen oder erstellen lassen.

zu 1):

Die Bestimmung des relativen, scheinbaren O_2 -Diffusionskoeffizienten D_s/D_0 beschreiben u.a. Frede et al. (1979), Flühler (1973), Taylor (1949), Kleinstäuber und Haupt (1989). Im Prinzip trennt eine Bodenprobe eine Diffusionskammer von der Raumluft ab. In der Diffusionskammer wird die O_2 -Konzentration durch Spülung mit

Stickstoffgas abgesenkt. Über einen Diffusionsstrom durch die Bodenprobe wird das Konzentrationsgefälle wieder ausgeglichen. Durch Entnahme von Gasproben in einer Zeitreihe und deren O_2 -Konzentrationsanalyse im Gaschromatographen kann der scheinbare Diffusionskoeffizient berechnet werden.

zu 2 und 3):

Für die Berechnung der O_2 -Diffusionskonstanten und der Sauerstoffdiffusionsrate wird die Reduktion von gelöstem O_2 an einer Platinelektrode durch Anlegen einer Spannung gemessen. Bei vorliegendem Diffusionsgleichgewicht kann die Diffusionsrate (Methode 3) aus der Stromstärke und der Elektrodenoberfläche berechnet werden (Schlichting et al., 1995). Zur Ermittlung des O_2 -Partialdruckes, der für die Bestimmung der Diffusionskonstanten (Methode 2) erforderlich ist, muss eine zusätzliche Eichung des O_2 -Partialdruckes am Reduktionsstrom vorgenommen werden. Platinelektroden werden kommerziell angeboten. Allerdings können die speziellen Erfordernisse der Bodenstruktur je nach Fragestellung auch den Eigenbau einer solchen Elektrode notwendig machen (Zausig, 1994).

Indikatorqualität

Laut Lehrbuchangaben beträgt der Massenfluss am O_2 -Austausch des Bodens nur wenige %, so dass der überwiegende O_2 -Transport durch Diffusion erfolgt (u. a. Scheffer-Schachtschabel, 1998). Dies ist einsichtig, denn für den konvektiven Gasstrom im Boden ist ein Druckgradient für die gesamte Gasphase erforderlich, der entweder durch Änderungen des atmosphärischen Druckes, der Temperatur oder durch Verdrängung der Gasphase durch Wasser entsteht. Konzentrationsgradienten innerhalb der Gasphase entstehen hingegen ständig überall dort im Boden, wo O_2 verbraucht oder CO_2 abgegeben werden. Kenngrößen für die O_2 -Diffusion beschreiben daher die Leitfähigkeitseigenschaften des Bodens für den Gasaustausch wirklichkeitsnäher als die Luftleitfähigkeit.

Der relative, scheinbare Diffusionskoeffizient D_s/D_o quantifiziert die Reduktion der O_2 -Diffusion gegenüber der freien Atmosphäre in Abhängigkeit von der Geometrie des luftgefüllten Porensystems. Da Engpässe in der O_2 -Versorgung besonders dann zu erwarten sind, wenn der Boden feucht ist, d.h. wenn die Feldkapazität zu 100 % mit Wasser gefüllt ist, lassen sich die Diffusionseigenschaften des Grobporensystems durch D_s/D_o beschreiben. Da sich nutzungsbedingte Bodenverdichtungen zunächst am stärksten auf das Makroporengefüge auswirken, ist D_s/D_o ein idealer Indikator für das Anzeigen von schädlichen Bodengefügeveränderungen.

Die O_2 -Diffusionsrate und die O_2 -Diffusionskonstante, die den Diffusionsstrom durch zwei Medien direkt zur Wurzel hin beschreiben, erweitern die Indikatorqualität der O_2 -Diffusion für die Regelungsfunktion des Gashaushaltes noch. Allerdings werden diese Kenngrößen auch sehr stark durch das Makrofeingefüge des Bodens in der Rhizosphäre bestimmt. Sie sind daher stark durch bodengenetische Gegebenheiten beeinflusst und beinhalten auch die Einflüsse der Porengeometrie im Mittel- und Feinporenbereich auf die Diffusion. Da dieser Porenbereich durch die nutzungsbedingte Bodenverdichtung nicht so stark beeinflusst wird, eignen sich diese Größen

weniger als Anzeiger einer Bodenschadverdichtung und werden unter dem nächsten Punkt „Klassifizierung“ nicht weiter behandelt.

Klassifizierung

Für die erarbeiteten Bewertungsmaßstäbe des relativen, scheinbaren Diffusionskoeffizienten D_s/D_o war der minimale Wert von Interesse, ab dem das Wurzelwachstum einschränkt ist. In der Literatur wird eine pflanzenspezifische Spannweite von D_s/D_o von 0,005 bis 0,02 als kritischer Bereich angegeben. Diese Zahlen gehen auf Gefäßversuche von Lemon und Erickson (1952), Bertrand und Krohnke (1957), Gradwell (1965) und Graddle und Siemer (1968) zurück. Flühler (1973) bestätigte den Wert von 0,02 an ungestörten Bodenproben als kritischen Bereich, der sich häufig bei Luftvolumina von 5-10 Vol.-% einstellt.

Er kritisierte allerdings, dass die zugrunde liegenden o.g. Untersuchungen überwiegend bei geringem Wassersättigungsgrad und hoher Respirationsfähigkeit der Böden durchgeführt worden sind. Stepniewski (1981) übernahm auch die Spanne von 0,02-0,005 als kritischen Bereich und ermittelte zugehörige Lagerungsdichten und Luftvolumina an gestörten Oberbodenproben von Schwarzerden und Pararendzinen aus Löß, Auenböden und Rendzinen. Er stellte fest, dass bereits ab geringen Dichten von z.B. $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ für Löss bei einer relativ starken Entwässerung auf pF 3 der kritische Bereich erreicht wurde. Dieser Befund lässt Zweifel daran aufkommen, ob der genannte kritische Bereich auch für die Bewertung von dicht gelagerten, kontinuierliche Poren enthaltende und respirationsarme Unterböden übertragen werden kann.

Frede et al. (1979) diskutierten den Wert von 0,02 anhand von Messungen an Lößböden und stellten fest, dass dieser Wert bei verkrusteten, strukturgeschädigten Böden bereits ab Luftvolumina von unter 16 Vol.-% unterschritten wird. Übertragen auf einen gewachsenen Ackerboden mit einer Schlepperradsohle im Unterboden, die auf den wenigsten Böden 10 Vol.-% Luftkapazität überschreitet, würde dieser Befund bedeuten, dass bei 100 % Feldkapazität flächendeckend eine gestörte Gasdiffusion vorliegen würde.

Paul und Werner (1986) und Paul (1990) übernahmen ebenfalls $D_s/D_o = 0,02$ als kritischen Wert und stellten fest, dass dieser bei einem Wassergehalt von 100 % Feldkapazität häufig schon bei Luftkapazitäten von ≤ 10 Vol.-% überschritten wird. Als Luftkapazitätsmaß für eine eingeschränkte Unterbodendurchlüftung gelten aber 5 Vol.-%. Die Autoren stellten bei diskontinuierlichen Porensystemen einen engen Zusammenhang zwischen Luftkapazität und Gas-Diffusion fest, bei kommunizierenden Porensystemen war der Zusammenhang deutlich geringer.

Zausig (1994) befasste sich mit der Diffusionsmessung an stark wassergesättigten, ungestörten Bodenproben. Er konnte in Einzelaggregaten von Ah- und M-Horizonten erst ab Luftvolumina von 8-11 Vol.-% D_s/D_o -Werte von größer 0,001 bestimmen. Er zitiert Literaturangaben von Curie (1984) und Wesseling (1974), nach denen in stark wassergesättigten Böden erst ab mittleren Luftvolumina von >10 Vol.-% ein Gasdiffusionsstrom in der Bodenluft überhaupt messbar wird.

Auch dieser Befund lässt die Übertragbarkeit der Schadensschwellen auf den Unterboden anzweifeln.

Fazit

Der relative, scheinbare O_2 -Diffusionskoeffizient ist ein sensibler, zuverlässiger Anzeiger von Bodengefügeveränderungen und kann prinzipiell auch als Indikator einer Bodenschadverdichtung verwendet werden. Für einen Einsatz im Bodenschutzvollzug scheidet der Parameter aber aus zwei Gründen aus:

1. Die Analytik ist nicht standardisiert und erfordert aufwendigen Eigenbau.
2. Es bestehen Zweifel, ob das Klassifizierungsschema, das aus Topfversuchen stammt und den kritischen Bereich als $0,005 \leq D_s/D_o \leq 0,02$ definiert, für eine Unterbodenbewertung angewendet werden kann.

2.1.9 Nutzbare Feldkapazität

Definition

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) beschreibt die im Boden potenziell speicherbare, pflanzenverfügbare Wassermenge (Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4), 1994). Sie wird berechnet, indem der Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt von dem Wassergehalt bei Feldkapazität subtrahiert wird. Der Anteil der nutzbaren Feldkapazität am Gesamtbodenvolumen ist identisch mit dem Anteil der Summe der engen Grobporen und Mittelporen. Die nFK wird entweder relativ in Vol.-% zum Gesamtvolumen der betrachteten Bodenschicht oder absolut in Liter pro m^2 (= mm) bezogen auf die Schichtdicke (dm) des betrachteten Bodenbereichs angegeben. Wird sie auf das gesamte, zur Wasserversorgung der Pflanze beitragende Bodenvolumen bezogen, dann entspricht die betrachtete Schichtmächtigkeit der effektiven Durchwurzelungstiefe in dm. In diesem Fall spricht man von der nutzbaren Feldkapazität der effektiven Durchwurzelungstiefe (nFKWe).

Analytik

Zur Berechnung der nFK sind zwei Größen erforderlich: die Wassergehalte bei Feldkapazität und beim Permanenten Welkepunkt. Beide Größen werden im Laborversuch mittels der Wasserspannungs-Wassergehaltskurve (= pF-Kurve) über das Wasserrückhaltevermögen des Bodens gegenüber wasseraustreibendem Kapillardruck bestimmt. Die Bestimmung der pF-Kurve ist eine bodenphysikalische Standardmethode über die ja auch die Luftkapazität ermittelt wird. Sie ist in der bodenphysikalischen Fachliteratur und in technischen Anleitungen beschrieben (Hartge und Horn, 1992; Schlichting et al., 1995; VDLUFA, 1991; DIN ISO 11274, 2001).

Indikatorqualität

Die nutzbare Feldkapazität ist ein direkter Anzeiger der Bodenfunktion „Wasserspeicherung“. Sie wird vom Aggregatgefüge und vom Grundgefüge des Bodens

bestimmt. Der Anteil der Mittelporenfraktion am Bodenvolumen wird stark vom Einfluss des Grundgefüges dominiert, wodurch die nutzbare Feldkapazität eine starke Abhängigkeit von der Bodenart erhält. Die Dichtlagerung des Gefüges spielt aber auch eine Rolle für die nFK. Verdichtung verringert zunächst den Anteil an weiten Grobporen und verringert damit zuerst die Luftkapazität. Der Gehalt an engen Grobporen und Mittelporen kann im Verdichtungsexperiment mit steigender Verdichtung zunächst ansteigen, da sich ja die ehemalige Fraktion der weiten Grobporen zu einer Fraktion engerer Poren verändert hat.

Eine Verdichtung kann sich also zunächst erhöhend auf die nFK auswirken (Lebert, 1989; Gätke, 1969; Larson und Gupta, 1980). Allerdings ist einsichtig, dass mit fortschreitender Verdichtung auch die engen Grobporen und die Mittelporen irgendwann reduziert werden und die nutzbare Feldkapazität abnimmt. Dies ist auch der Regelfall, denn die oben beschriebene Zunahme der nFK durch Verdichtung ist wohl eher eine Besonderheit von Kompressionsversuchen im Labor. An in natürlicher Lagerung entnommenen Bodenproben kann dieser Sachverhalt kaum nachvollzogen werden, da dort ja in der Regel insbesondere im Unterboden der Belastungspfad unbekannt ist.

Die Zusammenhänge zwischen nFK, Bodenart und Lagerungsdichte sind in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4, 1994) als Ergebnis einer Auswertung von umfangreichen Datensätzen der geologischen Landesdienste wiedergegeben. Dort nimmt die nFK bei allen Bodenarten mit zunehmender Lagerungsdichte ab. Allerdings ist auch im Bereich von hohen Lagerungsdichten in den LD-Stufen 4 und 5 die Spannweite zwischen den Bodenarten sehr groß. Die nFK schwankt dort von 11-21,5 Vol.-%. Die Indikation einer Schadverdichtung durch die nutzbare Feldkapazität ist daher nur bodenartspezifisch möglich.

Die nutzbare Feldkapazität der effektiven Durchwurzelungstiefe (nFKWe) wird durch die Dichtlagerung zweifach beeinflusst, da neben der nFK auch die effektive Durchwurzelungstiefe durch die zunehmende Lagerungsdichte verringert wird. Die Bodenkundliche Kartieranleitung (1994) nennt Abnahmen dieser Größe von bis zu 6 dm in einem Bodenprofil bei einer Veränderung der effektiven Lagerungsdichte (LD) von Stufe 1 nach Stufe 5.

Klassifizierung

Die vorhandenen Klassifizierungen der nFK sind an der Bewertung der Wasserversorgung der Kulturpflanzen orientiert. Eine allgemein anerkannte Zusammenstellung dieser Bewertung gibt die Bodenkundliche Kartieranleitung (1994). Werte für die nutzbare Feldkapazität der effektiven Durchwurzelungstiefe von <60 mm werden als sehr gering, von 60-140 mm als gering, von 140-220 als mittel, von 220-300 als hoch und von >300 mm als sehr hoch eingestuft. Dominiert werden diese Werte aber durch den Einfluss der Bodenart, so dass es eine direkte Klassifizierung der nutzbaren Feldkapazität im Hinblick auf eine Schadverdichtung nicht gibt.

Fazit

Infolge des dominierenden Einflusses der Bodenart auf die nutzbare Feldkapazität und der fehlenden Klassifizierungsmöglichkeiten der nFK im Hinblick auf eine Schadverdichtung, ist der Parameter für den Vollzug im Sinne einer Schadverdichtungsindikation nicht geeignet.

2.1.10 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Definition

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit beschreibt den Volumenstrom einer Wassermenge pro Zeiteinheit durch einen Fließquerschnitt des gesättigten Bodens unter dem Antrieb eines hydraulischen Druckgefälles (Hartge, 1966).

Charakterisiert wird sie über die Darcy-Gleichung durch den gesättigten Wasserleitfähigkeitskoeffizienten k_f :

$$V_w = k_f \times dh/l \quad (6)$$

V_w = Wassermenge pro Fließquerschnitt und Zeit ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

k_f = gesättigter Wasserleitfähigkeitskoeffizient (cm s^{-1} , $\times 86400 = \text{cm d}^{-1}$)

dh = hydraulische Druckdifferenz (cm Wassersäule)

l = Fließlänge (= Länge der Probe, cm)

dh/l = hydraulischer Druckgradient (-)

Der k_f -Wert enthält die Einflüsse sowohl der Porengeometrie als auch der Viskosität, der Dichte des Wassers und der Schwerkraft auf den Wasserdurchfluss.

Analytik

Die Bestimmung der in der Darcy-Gleichung aufgeführten Größen ist einfach und mit wenig Aufwand möglich, so dass jeder Anwender sich ein entsprechendes Gerät selbst herstellen kann. Anleitungen dazu geben Hartge und Horn (1992). Käuflich zu erwerbende Geräte sind das Haubenpermeameter nach Hartge (1966), das den k_f -Wert unter instationären Strömungsbedingungen bestimmt, und Geräte, die unter stationären Fließbedingungen nach dem Heber-Prinzip arbeiten. Die genannten Verfahren sind Laborverfahren. Grundsätzlich ist auch eine Bestimmung des k_f -Wertes in situ möglich, z.B. mit der Bohrloch-Methode (Eggelsmann, 1981). Im Vollzug des Bundesbodenschutzgesetzes sollten aber aus Gründen der Vergleichbarkeit der Messergebnisse nur Laborverfahren zur k_f -Bestimmung zur Anwendung kommen. Die Labor-Bestimmung des k_f -Wertes ist beschrieben bei Hartge und Horn (1992), Schlichting et al. (1994), DIN 19683-9 (1998) und VDLUFA (1991).

Indikatorqualität

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit beschreibt direkt die Funktionalität des Porensystems hinsichtlich der Wasserleitung im Boden. Sie ist zwar nur im wasserge-

sättigten Bodenzustand wirksam, beschreibt aber infolge der geringen Viskosität des Wassers sehr sensibel die Kontinuität des Porensystems und zwar insbesondere der weiten Grobporen. Aus diesem Grund können die Messergebnisse einer Stichprobe allerdings um Zehnerpotenzen streuen. Es ist einsichtig, dass ein einzelner Wurmgang in einer Bodenprobe die gesättigte Wasserleitfähigkeit einer sonst dichten Bodenmatrix enorm erhöhen kann. Deshalb muss bei nicht normalverteilten Grundgesamtheiten ein geometrischer Mittelwert gebildet und eine asymmetrische, geometrische Standardabweichung berechnet werden.

Klassifizierung

Klassifizierungen des k_f -Wertes auf der Basis von bodenkundlichen Untersuchungen geben die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4, 1994) und ATV-DVWK-Regel 136 (1999). Die Klassengrenzen sind bei beiden Quellen identisch. Die Klassifizierung orientiert sich an Bodenbildungsmerkmalen. Reinen Stau-(Sd)-Horizonten von Pseudogleyen werden sehr geringe k_f -Werte von $<1 \text{ cm d}^{-1}$ zugeordnet. Geringe Werte von $1\text{-}10 \text{ cm d}^{-1}$ treten in Sd-Übergangshorizonten und Sg-Horizonten auf, die ebenfalls wasserstauenden Charakter haben und die begleitenden redoximorphen Erscheinungen des O_2 -Mangels im Boden aufweisen. Diese Zusammenstellung deckt sich mit Ergebnissen von Blume (1968) und Zakosek (1960) zur Wasserleitfähigkeit wasserstauender Böden. Mittlere k_f -Werte von $10\text{-}40 \text{ cm d}^{-1}$ treten häufig in schluff- und mittelporenreichen Horizonten auf. Hohe k_f -Werte von $40\text{-}100 \text{ cm d}^{-1}$ weisen generell alle Böden mit einer intensiven sekundären Gefügebildung auf. Die höchsten k_f -Werte $>100 \text{ cm d}^{-1}$ haben überwiegend Sande und Torfe.

Das Erkennen eines dichten, wasserstauenden Bodenhorizontes folgt in dieser Klassifikation einer Zuordnung von bodengenetischen Merkmalen und k_f -Werten. Es macht Sinn, diese Klassifikation auch auf das Erkennen von nutzungsbedingten Verdichtungen nicht hydromorpher Böden zu übertragen. Werner und Thämer (1989) konnten auf Löß-, Verwitterungslehm- und Auenlehmstandorten verdichtungsbedingte Ertragsdepressionen nach k_f -Werten klassifizieren. Mindererträge traten bereits bei k_f -Werten unter 50 cm d^{-1} auf, verstärkten sich aber besonders im Bereich unter 10 cm d^{-1} . Paul (1999) und Werner und Paul (1998) fordern ebenfalls eine minimale gesättigte Wasserleitfähigkeit von 10 cm d^{-1} für eine volle Funktionsfähigkeit der Wasserleitung von landwirtschaftlich genutzten Böden.

Fazit

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit erfüllt als Parameter zur Erkennung von Schadverdichtungen die Anforderungen eines Vollzugssystems: sie hat direkten bodenfunktionalen Bezug, es existiert eine Standardanalytik und es sind Klassifizierungsschemata vorhanden. Etwas nachteilig ist die große Streubreite von k_f -Messungen, die aber über die geometrische Mittelwertbildung gehandhabt werden kann.

2.1.11 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit

Definition

Die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) beschreibt genauso den Wasserdurchfluss durch das Porensystem wie die gesättigte Wasserleitfähigkeit nur eben im wasserungesättigten Bodenzustand. Da es unzählige verschiedene Porenfüllungsgrade gibt, wird die ungesättigte Wasserleitfähigkeit in Form einer kontinuierlichen Kurve in Abhängigkeit von der Wasserspannung dargestellt (Becher, 1971).

Analytik

Zur Berechnung des k_u -Wertes müssen Wasserspannungsänderung und Wassergehaltsänderung über die Zeit parallel erfasst werden. Für die Realisierung sind verschiedene Verfahren entwickelt worden. Becher (1971) beschreibt ein Verfahren, bei dem ungestörte Bodensäulen auf einer keramischen Platte nach unten hin entwässern. Die Wasserspannungsänderung im Verlauf der Entwässerung wird mit Tensiometern erfasst und die dazugehörige Wassergehaltsänderung wird über pF-Kurven ermittelt, die an Parallelproben gewonnen wurden. Schindler (1980) beschreibt einen Weg, bei dem die Entwässerung nicht über eine keramische Platte, sondern durch Verdunstung an der Probenoberfläche realisiert wird. Die Wassergehaltsänderung wird durch Wägung ermittelt. Plagge (1991) setzt zusätzlich zur Tensiometrie die TDR-Technik zur Erfassung der Wassergehaltsänderung ein. Grundsätzlich gilt auch für die ungesättigte Wasserleitfähigkeit, dass man die Geräte selbst bauen kann (Hartge und Horn, 1992). Mittlerweile sind aber auch Geräte auf dem Markt verfügbar, die mit Tensiometrie und TDR-Technik ausgerüstet sind.

Indikatorqualität

Mit der ungesättigten Wasserleitfähigkeit kann die Leitfähigkeit bestimmter Porengrößenklassen bewertet werden. Sie gibt im Gegensatz zur gesättigten Wasserleitfähigkeit eine wirksame Leitfähigkeit an und bildet damit die bodenfunktionalen Leitfähigkeitseigenschaften noch exakter ab. Die Betrachtungen des potentiellen Bodenverdichtungsverhaltens beziehen sich häufig auf den Wassergehalt bei 100 % Feldkapazität. Mit dem k_u -Wert kann die Bodenfunktion „Wasserleitung“ bei diesem Wassergehalt direkt bewertet werden.

Klassifizierung

Die Kurven der ungesättigten Wasserleitfähigkeit wurden und werden wissenschaftlich vorrangig dazu genutzt, Wasserbewegungen im Rahmen von Wasserhaushaltsmodellen zu berechnen. Für die funktionale Bewertung des Bodengefüges wurden bisher keine Klassifizierungsschemata für die ungesättigte Wasserleitfähigkeit erarbeitet. Es werden lediglich vereinzelt Angaben zur Bewertung des k_u -Wertes gemacht. ATV-DVWK-Regel 117 (1986) gibt eine minimale ungesättigte Wasserleitfähigkeit von $0,1 \text{ cm d}^{-1}$ für ideale Ackerböden bei einer Entwässerung auf -3 kPa an.

Wie diese Zahl zustande kam, ist aber nicht nachzuvollziehen. Wendroth (1990) setzte sich intensiv mit der Bestimmung und Bewertung von k_u -Messungen in Ackerböden auseinander, nahm aber keine quantitativen Einstufungen vor.

Fazit

Die ungesättigte Wasserleitfähigkeit ist ein sensibler Anzeiger von bodenfunktionalen Leitfähigkeitseigenschaften. Ihre Verwendung im Vollzug wäre grundsätzlich möglich, da eine standardisierte Analytik mittlerweile realisiert ist. Solange aber Klassifizierungsschemata fehlen, ist der Parameter für den Vollzug nicht verwendbar.

2.1.12 Wurzellängendichte

Definition

Von zahlreichen Untersuchungsmethoden zur Durchwurzelung hat sich in der Bodenkunde die Bestimmung der Wurzellängendichte durchgesetzt, da sie enger mit der Wasser- und Nährstoffaufnahme der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen korreliert als die Wurzelmasse (Böhm, 1978). Die Wurzellängendichte gibt die Wurzellänge an, die in einem Bodenvolumen enthalten ist und hat die Dimension cm cm^{-3} .

Analytik

Die Wurzellängendichte wird direkt im Freiland an einer Profilwand bestimmt (Böhm, 1976). Die Profilwand wird lotrecht abgestochen und geglättet. Danach wird mit einer Hochdruckspritze eine dünne Schicht von 5 mm Dicke von der Profilwand abgespült. Die in dieser Schicht befindlichen Wurzeln stehen jetzt frei ab und sind vollständig sichtbar. Auf einer gerasterten Folie oder Plexiglasscheibe wird jede Wurzellänge von 5 mm registriert. Die so gewonnene Wurzellänge pro 5-mm-Schicht kann dann auf das Bodenvolumen umgerechnet werden. Die erforderliche Größe der Profilgrube beträgt etwa 1 m^3 .

Indikatorqualität

Es ist allgemein bekannt, dass die Pflanze auf Bodenverdichtungen mit einem veränderten Wurzelbild reagiert. Wenn Bodenbereiche in Folge von Bodenverdichtungen nicht oder nur eingeschränkt durchwurzelt werden, dann sind im Wesentlichen zwei Faktoren ursächlich: ein erhöhter Eindringwiderstand in das Bodenkompartment im Vergleich zum umliegenden Boden und/oder ein zu geringer O_2 -Partialdruck. Mit der Profilwandmethode können nicht nur durchschnittliche Wurzellängendichten eines Bodenhorizontes oder einer Bodenschicht, sondern auch die räumliche Verteilung der Wurzeln bestimmt werden. Bereiche, die von den Wurzeln gemieden werden, können direkt angezeigt werden. Betrachtete man die Bodenverdichtung allein von der pflanzenphysiologischen Seite her, dann wäre die Bestimmung der Wurzellängendichte mit der Profilwandmethode der ideale, qualitative Indikator von Schadverdichtungen.

Klassifizierung

Allerdings existiert eine Klassifizierung der Werte für die Wurzellängendichte nicht. Die Gründe dafür sind vielfältig, da die Intensität der Wurzel- ausprägung auch von anderen Parametern bestimmt wird, wie z.B. Temperatur, zeitlicher Bodenfeuchteverlauf, Nährstoffhaushalt oder Vorfruchtwirkung. So sind z.B. die Wurzellängendichten einer Kultur unter gleichen Bodenbedingungen in verschiedenen Jahren kaum miteinander vergleichbar (Böhm, 1979). Intensive Analysen der Wurzellängendichten mit der Profilwandmethode wurden in den letzten Jahren bei der Bewertung von Kippenböden der Braunkohlenrekultivierung durchgeführt (Vorderbrügge, 1989; Harrach et al., 1999; Tenholtern, 2000; Stahl und Lebert, 2000). Diese Böden weisen teilweise extreme Schadverdichtungen auf, so dass sie sich für eine Klassifizierung der Wurzellängendichte in Abhängigkeit von der Bodenverdichtung anbieten. Die genannten Arbeiten weisen zwar die Wurzellängendichte als Indikator für die Durchwurzelbarkeit aus, klassifizieren den Parameter aber aus den o.g. Gründen nur relativ zu einer jeweiligen Vergleichsmessung. Es gibt zwar Schemata zur Klassifizierung der Durchwurzelungsintensität (z.B. Bodenkundliche Kartieranleitung, 1994). Diese bezeichnen aber nicht die Wurzellängendichte und sind auch nicht auf die Erkennung von Schadverdichtungen ausgerichtet.

Fazit

Die Wurzellängendichte ist grundsätzlich ein geeigneter Indikator für Bodenschadverdichtungen. Wegen eines fehlenden Klassifizierungsschemas scheidet der Parameter aber für den Bodenschutzvollzug zur Gefahrenabwehr von Schadverdichtungen aus.

2.1.13 Eindringwiderstand

Definition

Als Eindringwiderstand wird der Widerstand bezeichnet, den der Boden einer Eindringsonde entgegensetzt (Sommer und Ziemer, 1978). Die Eindringsonde wird auch als Penetrometer und der Widerstand auch als Penetrometerwiderstand bezeichnet. Er hat die Dimension eines Druckes (MPa).

Analytik

Eindringsonden sind für verschiedene Fragestellungen entwickelt worden. Man unterscheidet im Wesentlichen drei Kategorien: kleine Systeme für den Einsatz an Laborproben, Handpenetrometer für den Feldeinsatz und große Geräte für den Anbau am Schlepper.

Ein Labormessverfahren beschreibt Becher (1978). Solche Geräte werden im Eigenbau konstruiert. Ihr Einsatzbereich reicht von der Messung an Stechzylinderproben bis hin zur Einzelaggregatuntersuchung, was unterschiedliche Systemanforderungen stellt. Die an Stechzylindern verwendeten Sondenkegel haben einen Kopf-

durchmesser von 3-5 mm und einen Spitzenwinkel von 30-60°. Sonden mit kleinerem Durchmesser von unter 1 mm, die zur Wurzelsimulation verwendet werden, haben Kegel mit Spitzenwinkeln von 10-20°. Sonden für Laborversuche sind mit elektronischem Vorschub ausgestattet, wodurch sehr kleine Vorschubgeschwindigkeiten gefahren werden können (Becher, 1991).

Sonden mittlerer Größe für den Freilandeinsatz sind am weitesten standardisiert und werden auch kommerziell angeboten. Die Hersteller halten sich an den amerikanischen ASAE-Standard (ASAE, 1987), der einen Kegelwinkel von 30° und wahlweise zwei Kegelkopfdurchmesser von 12,83 oder 20,27 mm vorschreibt. Diese Sonden erfassen den vertikalen Eindringwiderstand im Boden bis in eine Tiefe von etwa 1 m und werden überwiegend manuell in den Boden gedrückt. Moderne Geräte zeichnen den Eindringwiderstand elektronisch auf. Den großflächigen Einsatz solcher Sonden beschreibt Borchert (1987, 1988). Eine für den gleichen Zweck einsetzbare Schlagsonde, die mit einem definierten Gewicht und einer entsprechenden Anzahl von Fallimpulsen bis in eine bestimmte Bodentiefe getrieben wird, beschreiben Hartge und Horn (1992). Diese Sonde hat einen Öffnungswinkel von 60°.

Penetrometerentwicklungen für den Einsatz am Schlepper stellten Lindner (1964), Petelkau (1989) und Hütl et al. (1990) vor. Diese Sonden arbeiten in horizontaler Richtung und wurden für die Erfassung von Fahrspur- und Bodenbearbeitungseffekten gebaut. Lüth (1993) verfolgte dieses Konzept weiter und entwickelte einen Längspenetrographen, der längs in Fahrtrichtung am Schlepper mit einer Vortriebsgeschwindigkeit von bis zu 1 m s^{-1} betrieben werden kann. Dieses Gerät ist für die schnelle Flächenbonitur konzipiert. Der Kegelwinkel der Horizontalsonde beträgt 60° und der Durchmesser 30 mm am Kegelkopf. Weißbach (1998) modifizierte dieses Gerät für den Einsatz bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 8 km h^{-1} .

Indikatorqualität

Nach Gill (1968) und Koolen und Kuipers (1983) ist der Eindringwiderstand näherungsweise von drei Größen abhängig: der Normalspannung im Boden (normal zur Querschnittsfläche des Sondenkegels), der Kegelgeometrie (Öffnungswinkel und Durchmesser) und der Reibung zwischen Sonde und Boden. Diese Theorie ist aber unvollständig, da sie den gesamten Spannungstensor im Boden und dessen Veränderung durch das Eindringen nicht berücksichtigt. Eine vollständige Theorie für die Erklärung eines gemessenen Eindringwiderstandes steht noch aus (Gudehus, 1981). Aus diesem Grund ist die Interpretierbarkeit von Messwerten häufig nicht eindeutig. Hinzu kommt noch der Effekt der Vorschubgeschwindigkeit auf den Eindringwiderstand, der in der Zähigkeit des Drei-Phasensystems Boden begründet ist.

Wenn die Sondengeometrie standardisiert ist, sind der Spannungszustand im Boden und die Materialreibung die verbleibenden, wesentlichen Einflussgrößen. Da die Bodenverdichtung Auswirkungen auf den Spannungszustand des Bodens hat, kann sie grundsätzlich auch über den Penetrometerwiderstand erfasst werden. Allerdings wirkt ein weiterer Faktor auf den Spannungszustand: der Bodenwassergehalt bzw. der daraus resultierende Porenwasserdruck. Dieser wirkt über den Porenradius,

wodurch die Korngrößenverteilung als weitere Einflussgröße hinzukommt. Beide Größen wirken sich zudem auf die Reibungseigenschaften zwischen Sonde und Boden aus.

Relative Dichteänderungen können mit dem Penetrometer also nur dann identifiziert werden, wenn die Einflüsse von Körnung und Bodenwasserspannung eliminiert bzw. gleich sind. Für die Indikation von Bodenschadverdichtungen ist zusätzlich eine bodenspezifische Eichung erforderlich. Eine solche Eichung ist sehr aufwendig und wird zumeist nicht vorgenommen, so dass der Parameter überwiegend zur relativen Flächenbonitur eingesetzt wird.

Klassifizierung

Die verschiedenskaligen Meßmethoden und die Schwierigkeiten bei der Interpretation von Penetrometerwerten lassen schon erwarten, dass es eine Klassifizierung des Eindringwiderstandes im Hinblick auf die Funktionalität des Bodengefüges nicht gibt. Es existiert zwar in der Literatur eine Fülle von Angaben über kritische Penetrometerwerte, die meist im Bereich von 1-5 MPa streuen (Dürr et al., 1995). Sehr viele Versuchsansteller haben für ihre Versuchsbedingungen kritische Werte für das Pflanzenwachstum ermitteln können und diese auch publiziert. Die Werte sind aber rein empirisch. Eine Allgemeingültigkeit für kritische Penetrometerwerte gibt es nicht.

Fazit

Der Penetrometerwiderstand ist eine Kenngröße, die leicht zu ermitteln ist. Um aber einen gemessenen Penetrometerwiderstand im Hinblick auf eine Schadverdichtung interpretieren zu können, müsste man mehr über die Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren wissen. Solange keine mechanische Theorie existiert, die die Einflussfaktoren auf den Eindringwiderstand vollständig auseinander hält, sind die Ergebnisse rein empirisch und immer nur für den Einzelfall gültig. Deshalb und weil Klassifizierungsschemata fehlen, scheidet der Parameter für den Bodenschutzvollzug als Kriterium zur Identifikation einer Schadverdichtung aus. Seine Verwendung ist allerdings als Hilfskriterium zur Eingrenzung möglicher Schadverdichtungsflächen denkbar.

2.2 Zusammenstellung eines Indikatorensystems für Bodenschadverdichtungen

Von den in Kapitel 2.1 beschriebenen Parametern werden die für ein Vollzugssystem geeigneten für ein Indikatorensystem zur Erkennung von Bodenschadverdichtungen zusammengestellt. Die Vollzugseignung wird zum einen über ein einfaches Punktesystem bewertet, und zum anderen werden Ausschlusskriterien für den Vollzug angewendet (**Tabelle 3**).

Tabelle 3: Bewertungsschema der Parameter für ein Indikatorssystem zur Identifikation von Bodenschadverdichtung.

Parameter	Eigenschaft		Bodenfunktionaler Bezug		Standardanalytik			Schadensschwelle Unterboden	
	elementar	aggregiert	direkt	indirekt	vorhanden, einfach	vorhanden, aufwendig	nicht vorhanden	vorhanden	nicht vorhanden
(Punkte)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)			
Lagerungsdichte	2			1	2				x
Effektive Lagerungsdichte		1		1	2			x	
Packungsdichte		1	2			1		x	
Spatendiagnose		1		1	2			x	
Strukturerkennungskombination		1		1	2				x
Luftkapazität	2		2		2			x	
Luftleitfähigkeit	2		2				x		x
O ₂ -Diffusion D _s /D _o	2		2				x	x	
Nutzbare Feldkapazität	2		2		2				x
Wasserleitfähigkeit (gesättigt)	2		2			1		x	
Wasserleitfähigkeit (ungesättigt)	2		2			1			x
Wurzellängendichte		1	2			1			x
Eindringwiderstand		1		1	2				x

Es werden jeweils zwei Punkte vergeben für elementare Eigenschaften, den direkten bodenfunktionalen Bezug und eine einfache Standardanalytik des Parame-

ters. Jeweils einen Punkt gibt es für aggregierte Eigenschaften, indirekten bodenfunktionalen Bezug und eine aufwendigere Standardanalytik zur Bestimmung des Parameters. Der bodenfunktionale Bezug wird aus Tabelle 1 abgeleitet. So ist z.B. die Luftkapazität eine direkte Beschreibung der Teilfunktion „Luftspeicherung“, da sie diese unmittelbar in Vol.-% quantifiziert. Die Lagerungsdichte hingegen quantifiziert mit ihrer Dimension gcm^{-3} diese Teilfunktion nur indirekt dadurch, dass sie unter bestimmten Voraussetzungen mit dieser korreliert.

Indirekten bodenfunktionalen Bezug haben auch der Eindringwiderstand und die aggregierten Parameter der Feldgefügeansprache, die integrative Maßstäbe für das Bodengefüge darstellen. Lediglich der Packungsdichte wurde ein direkter Bezug zu den Bodenfunktionen zugeordnet, da sie stärker als die beiden anderen Methoden an den Bodenfunktionen ausgerichtet ist. Dafür erfordert ihre Bestimmung aber spezifischere Kenntnisse bei der Gefügeansprache, so dass sie in der Analytik als komplizierter eingestuft werden muss. Die Ausschlusskriterien für ein Vollzugssystem sind das Vorhandensein von Standardanalytik und Schadensschwellenwerten für eine Bodenverdichtung im Unterboden. Beide Kriterien müssen erfüllt sein, sonst kann ein Parameter für ein Vollzugssystem nicht in Frage kommen. Die Schadensschwellen leiten sich aus vorhandenen Klassifizierungsschemata ab.

Nach Anwendung der genannten Ausschlusskriterien scheiden folgende Parameter derzeit für ein Vollzugssystem aus:

- Lagerungsdichte,
- Strukturmerkmalskombination,
- Luftleitfähigkeit,
- O_2 -Diffusion,
- nutzbare Feldkapazität,
- ungesättigte Wasserleitfähigkeit,
- Wurzellängendichte,
- Eindringwiderstand.

Für ein Indikatorensystem zur Erkennung von Bodenschadverdichtungen bleiben noch 5 Parameter übrig (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: Nach Anwendung der Ausschlusskriterien übrig gebliebene Indikatoren für eine Bodenschadverdichtung in der Reihenfolge ihrer Eignung (= Punktezahl).

Reihenfolge	Parameter	Eigenschaft		BodenfunktionalerBezug		Standardanalytik		Gesamtpunktzahl
		elementar	aggregiert	direkt	indirekt	vorhanden, einfach	vorhanden, aufwendig	
	(Punkte)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	
1.	Luftkapazität	2		2		2		6
2.	gesättigte Wasserleitfähigkeit	2		2			1	5
3.	effektive Lagerungsdichte		1		1	2		4
	Packungsdichte		1	2			1	4
	Spatendiagnose		1		1	2		4

Die höchste Punktzahl (6 Punkte) erhält der Parameter „Luftkapazität“. Er ist eine elementare Bodeneigenschaft, hat direkten bodenfunktionalen Bezug und die Standardanalytik ist einfach. Die zweithöchste Punktzahl (5 Punkte) erhält die gesättigte Wasserleitfähigkeit, die im Vergleich zur Luftkapazität eine etwas kompliziertere Bestimmung und Berechnung erfordert. Gleichrangig mit jeweils vier Punkten stehen die drei Methoden der Feldgefügeansprache.

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 2 gelten als Schadensschwellenwerte für die genannten Indikatoren die in **Tabelle 5** aufgeführten Werte.

Tabelle 5: Indikatorensystem und Schadensschwellenwerte zur Erkennung einer Bodenschadverdichtung.

Parameter	Schadensschwelle	Quellen
Luftkapazität	5 Vol.-%	Flühler, 1973; Blume, 1968; Dumbeck, 1986; Werner und Paul, 1999
gesättigte Wasserleitfähigkeit	10 cm d ⁻¹	ATV-DVWK-R-136, 1999; Blume, 1968; Zakosek, 1960; Werner und Paul, 1999
effektive Lagerungsdichte	Stufen 4 und 5	Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4), 1994
Packungsdichte	Stufen 4 und 5	DIN 19682-10, 1998
Spatendiagnose	Stufen 4 und 5	Diez und Weigelt, 1997

Anhand eines Indikatorensystems aus diesen Parametern und deren Schadensschwellenwerten kann die Identifikation einer Bodenschadverdichtung durch bodenkundlich geschulte Fachleute erfolgen.

2.3 Fazit: Identifikation einer Bodenschadverdichtung

Eine Bodenschadverdichtung kann grundsätzlich anhand eines Indikatorsystems, bestehend aus den Parametern in **Tabelle 5**, durch bodenkundliche Fachleute identifiziert werden. Die Identifikation erfolgt aus der Kombination der Parameter, über die im Einzelfall unter Berücksichtigung der bodengenetischen Verhältnisse zu entscheiden ist. Grundsätzlich muss gelten, dass alle drei Kriterien für die Identifizierung einer anthropogen entstandenen Schadverdichtung erfüllt sein müssen. So ist z.B. eine Luftkapazität von unter 5 Vol.-% allein noch kein sicheres Indiz für einen Gefügeschaden, da solche Werte entweder substratspezifisch oder bodengenetisch bedingt auch als Hintergrundwerte vorkommen können, z.B. in Gleyen, Pseudogleyen oder Bt-Horizonten von Parabraunerden. Erst die Anwendung aller drei Kriterien für Durchlüftung, Leitfähigkeit und morphologische Bodenbeschaffenheit bringt Klarheit über den Bodengefügezustand.

Auch aus pflanzenbaulicher Sicht kann anhand der bodenphysikalischen Kenngrößen Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit alleine noch nicht sicher bewertet werden, ob die Pflanzenwurzel durch mechanischen Bodenwiderstand oder Sauerstoffmangel am Wachstum oder der Verbreitung gehindert wird. Eine hohe Porenkontinuität oder eine hohe ungesättigte Wasserleitfähigkeit können die negativen Effekte einer geringen Luftkapazität oder gesättigten Wasserleitfähigkeit teilweise kompensieren. Ein entscheidendes Indiz im Sinne einer pflanzenbaulichen Bewertung des Bodengefüges ist deshalb das Kriterium der Durchwurzelung im Rahmen der Feldgefügeansprache.

Problemfälle für das Indikatorsystem können stark sandige Böden darstellen, die auch bei sehr starker Verdichtung noch Luftkapazitäten über 5 Vol.-% und gesättigte Wasserleitfähigkeiten von über 10 cm d^{-1} aufweisen, demnach für die Pflanzenwurzel nur noch schwer zu durchdringen sind. Für solche Fälle wären Sonderregelungen entweder durch alleinige Bewertung anhand der Feldgefügeansprache oder eine substratspezifische Grenzwermittlung anzustreben. Das vorgestellte Instrument zur Identifikation einer Schadverdichtung bezieht sich also auf einen Normalboden unter landwirtschaftlicher Nutzung. Für Sonderfälle müssten gegebenenfalls Ergänzungslösungen erarbeitet werden.

Was bei einer Schadensermittlung zusätzlich zu berücksichtigen wäre, ist die Erheblichkeit des Bodengefügeschadens im konkreten Fall. Hier wären Fragen nach der Bedeutung der Mächtigkeit und Tiefenlage einer verdichteten Schicht ebenso wie deren Anteil an der Gesamtfläche zu bewerten.

3 Erheblichkeit von Schäden durch Bodenverdichtungen

Schädliche Bodenveränderungen im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes sind „Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen“, (BBodSchG, 1998). Von einem Schaden an den Bodenfunktionen muss also dann ausgegangen werden, wenn schädliche negative Bodenveränderungen erheblich und dauerhaft sind. In diesem Kapitel wird versucht, die Erheblichkeit von Schäden durch Bodenverdichtungen im Allgemeinen zu bewerten, also ohne die Berücksichtigung des Einzelfalls.

Im Kapitel 2 waren negative Bodenveränderungen und Schadensschwellen für die direkten, von Bodenverdichtungen betroffenen Teilfunktionen des Wasser- und Lufthaushaltes und der Durchwurzelbarkeit zusammengestellt worden. Die zugrunde gelegten Maßstäbe in Tabelle 5 stammen ausschließlich aus bodenkundlichen Untersuchungen im Zusammenhang mit der standortkundlichen Bewertung der Böden. Prioritäres Anliegen der Bodenkundler war eine Bewertung des Bodens im Hinblick auf die Bodenentwicklung einerseits und das Pflanzenwachstum andererseits. Eine Luftkapazität von <5 Vol.-% wird deshalb als negativ bewertet, weil sie möglichen O₂-Mangel induziert, der einerseits zur Degradation des Bodens z.B. zum Pseudogley und andererseits zur Behinderung des Wurzelwachstums führen kann. Ähnlich verhält es sich mit der Bewertung der gesättigten Wasserleitfähigkeit und den genannten Feldgefügeansprachen. Die Einstufungen basieren also auf einer produktionsorientierten Nutzbarkeit des Bodens.

Bei einer naturschutzfachlichen Bewertung würden die genannten Bodeneigenschaften nicht als negativ oder als Schäden eingestuft. Im vorliegenden Kapitel soll eine Bewertung der Erheblichkeit von Schäden durch Bodenverdichtungen anhand aller möglicher Auswirkungen vorgenommen werden. Maßstäbe sollen gesellschaftlich bedeutsame, hochrangige Anzeiger möglicher Schäden sein. Im Falle der Produktionsfunktionen wäre ein solcher hochrangiger Anzeiger nicht das Wurzelwachstum, sondern der Ertrag oder im Falle der Ausgleichs- und Regelungsfunktionen wäre nicht die gesättigte Wasserleitfähigkeit oder die Luftkapazität ein hochrangiger Anzeiger von Schäden, sondern die Funktionsfähigkeit des Landschaftswasserhaushaltes oder die Emission klimarelevanter Gase.

Um die Frage nach der Erheblichkeit von Schäden durch Bodenverdichtungen zu behandeln, sind fünf wichtige Teilfragen zu klären:

1. Welche Bodenfunktionen sind insgesamt betroffen?
2. Welche Auswirkungen haben die Schäden?
3. Welches ist der ranghöchste Anzeiger eines Schadens?
4. Welche Veränderungen und Schäden an den Bodenfunktionen sind vorhanden?
5. Welche Schäden sind in Zukunft zu erwarten?

Im Folgenden werden diese Fragen nacheinander abgehandelt.

3.1 Betroffene Bodenfunktionen, Folgen und deren Anzeiger

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die von Bodenschadverdichtung betroffenen Bodenfunktionen, deren Folgen und deren jeweilige, ranghöchste Anzeiger. Es sind die Prozesse und deren Folgen dargestellt, die vom Bodengefüge gesteuert und durch Veränderungen des Bodengefüges beeinflusst werden. Es ist zu erkennen, dass Bodenverdichtungen sehr vielfältige Auswirkungen haben können.

Die unmittelbar durch Bodenschadverdichtung betroffenen Bodenfunktionen sind die Ausgleichs- und Regelungsfunktionen des Gas- und Wasserhaushaltes (s. Kapitel 2). Die direkten Folgen sind Abnahme des Porenvolumens, Zunahme der Bodendichte und Porenverteilungen. Die erweiterten Auswirkungen O₂-Mangel, Verhältnisse und Wasserstau, Infiltrationshemmung und Oberflächenabfluss sowie die mechanischen Veränderungen können neben den direkt betroffenen Ausgleichs- und Regelungsfunktionen auch zu möglichen Schäden an den Lebensraum- und Produktionsfunktionen führen. Funktionale Folgen von Schäden an den Produktions- und Lebensraumfunktionen sind Behinderungen des Wurzelwachstums und Veränderungen des Bodenlebens und der bodenbiologischen Aktivität, die in der Folge von Stoffumsetzungsprozessen auch Auswaschungen und Ausgasungen klimarelevanter Gase bewirken können.

Veränderungen der mechanischen Beschaffenheit des Bodens durch Bodenverdichtungen können sowohl Verfestigungen im trockeneren Bodenzustand als auch Festigkeitsverluste im feuchteren Bodenzustand nach sich ziehen. Verfestigungen behindern das Wurzelwachstum ebenso wie Sauerstoffmangel, und Festigkeitsverluste verringern die mechanische Belastbarkeit. In beiden Fällen sind die Produktionsfunktionen betroffen.

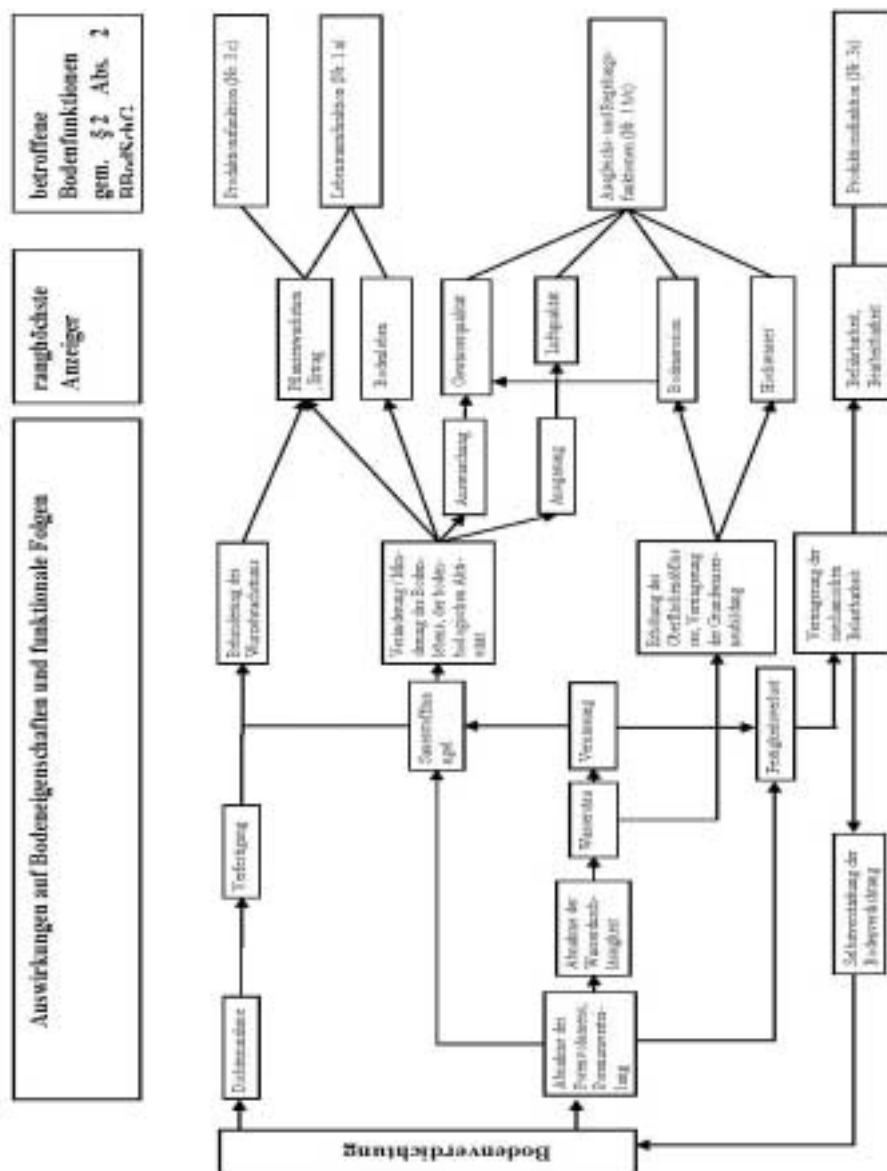


Abbildung 1: Übersicht der durch Bodenverdichtung betroffenen Bodeneigenschaften, Prozesse und Bodenfunktionen sowie deren ranghöchste Anzeiger.

Ranghöchster Anzeiger für Schäden an den Produktionsfunktionen ist der Ertrag bzw. das Pflanzenwachstum. Schäden durch Unterbodenverdichtungen an den Lebensraumfunktionen und der mechanischen Beschaffenheit des Bodens als Produktionsstandort können am ranghöchsten durch die entsprechende bodenbiologische und -mechanische Fachanalytik zum Bodenleben und zur Befahrbarkeit und Bearbeitbarkeit von Böden ermittelt werden. Schäden an den Ausgleichs- und Regelfunktionen können sich vielfältig an Kenngrößen des Landschaftswasserhaushaltes wie

Grundwasserneubildung, Erosion und Hochwasser sowie der Gewässer- und Luftqualität äußern.

3.2 Aktuelle Schäden oder Veränderungen an den Bodenfunktionen

Im Folgenden werden Schäden bzw. Veränderungen an den Bodenfunktionen an deren jeweils ranghöchsten Anzeigern dokumentiert. Diese Dokumentation erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es geht darum für deutsche Standorte zu zeigen, ob Schäden bzw. Veränderungen bekannt und dokumentiert sind oder nicht.

Eine umfassende Zusammenstellung von Literatur zur Frage der Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf den Ertrag findet man bei Dürr et al. (1995). Die übliche Vorgehensweise bei derartigen Untersuchungen ist es, ein Flächenteilstück mit einer zusätzlichen Belastung über den aktuellen Bodenverdichtungszustand hinaus zu verdichten, um danach die Auswirkungen auf den Ertrag mit einem Kontrollstück zu vergleichen. Es ist allgemeiner Literaturkonsens, dass eine solche Zusatzverdichtung in eine Ertragsdepression führt. Am ausgeprägtesten sind die Direktwirkungen der Zusatzverdichtung, d.h. bei der Kultur, die unmittelbar auf die Verdichtung folgt. In den Folgejahren nimmt die Verdichtungswirkung einer einmaligen Zusatzverdichtung auf den Ertrag wieder ab, vereinzelt kann es sogar zu Ertragssteigerungen kommen (Sommer et al., 1981).

Die Gründe für das Abklingen der Effekte liegen in der Regenerationsfähigkeit des Bodengefüges durch Wurzelwachstum und biologische Aktivität. Die Gründe für ein uneinheitliches Reagieren der Folgekulturen sind in den Wechselwirkungen zwischen dem Bodengefüge und den Witterungsbedingungen auf den Ertrag zu suchen. So kann eine günstige Niederschlags- und Temperaturverteilung während der Vegetationsperiode den ungünstigen Einfluss eines verdichteten Bodengefüges umkehren.

Tabelle 6 gibt einen Auszug aus den vorhandenen Literaturquellen zu Ertragseinbußen durch Bodenverdichtungen. Die überwiegende Zahl von Ergebnissen liegt aus Belastungsversuchen vor. Die Ergebnisse sind miteinander aber meist nicht vergleichbar, da die Studien verschiedener Autoren auch auf verschiedenen Böden und unter ganz unterschiedlichen Belastungsbedingungen durchgeführt wurden.

Oft weichen die Belastungsbedingungen, mit denen Zusatzverdichtungen absichtlich hergestellt werden, von den Bedingungen durch üblichen Maschineneinsatz weit ab, da es im Versuch ja darum geht, schnell eine erhebliche Verdichtung zu produzieren. Um diesen Effekt vor allem im Unterboden zu erzielen, müssen die Belastungen erheblich über das übliche Maß hinausgehen. So verwendeten Sommer et al. (1981) ein 40 t schweres Kettenfahrzeug, während Ehlers et al. (2000) einen Radlader mit 5 t Radlast und typischer Baufahrzeugbereifung benutzten. Petelkau und Koautoren verwendeten in ihren Versuchen Fahrzeuge mit Bereifungen, wie sie heute in der Landwirtschaft nicht mehr üblich sind. Ergebnisse aus Belastungsversuchen sind

also zumeist schon wegen der Belastungsbedingungen nicht ohne Einschränkung auf die übliche Produktionsfläche übertragbar.

Tabelle 6: Ertragsschäden durch Bodenverdichtungen.

Flächentypen	Ertragsdepressionen	Autoren
Belastungsversuche	Winterweizen: bis 12 %	Sommer et al. (1981)
	Wintergerste: bis 26 %	„
	Zuckerrübe: bis 11 %	„
	Sommergerste: bis 50 %	Ehlers et al. (2000, DFG-Forschung)
	Winterweizen: bis 12 %	„
	Wintergerste: bis 22 %	„
	Winterweizen: bis 18 %	Sommer et al. (1995, BMBF-Forschung)
	Zuckerrübe: bis 23 %	„
	Winterroggen: bis 18 %	Petelkau et al. (1988)
	Zuckerrübe: bis 30 %	Petelkau (1984)
	Hafer: bis 28 %	Petelkau und Dannowski (1990)
Vorgewende	Winterweizen: bis 17 %	Brunotte et al. (2000)
	Winterweizen: bis 9 %	„
Kippen	Winterweizen: bis 10 %	Stahl (2000, BMBF-Forschung)
	Wintergerste: bis 13 %	„
	Winterraps: bis 25 %	„
	Winterroggen: bis 42 %	Tenholtern (2000)
	Wintergerste: bis 30 %	„
Übliche Produktionsflächen ohne Besonderheiten	keine dokumentiert	

Berichte über geringe Ertragsleistungen verdichteter Böden liegen auch aus Forschungen zur Rekultivierung von Kippen des Braunkohlenbergbaus vor. Das Bodengefüge verkippter Böden ist allerdings mit demjenigen von gewachsenen Böden nicht vergleichbar, da die Bodenbelastungen bei der technischen Herstellung der Flächen nicht typisch sind für eine natürliche Boden- und Gefügebildung (Dumbeck, 1986). Die Gefügeschäden sind nach einer Flächenherstellung oft so groß, dass eine mechanische Tieflockerung oft Voraussetzung für eine landwirtschaftliche Verwendbarkeit ist (Schröder et al., 1985). Allerdings ist auch hier durch pflanzenbauliche Maßnahmen oder durch konservierende Bodenbearbeitung eine Gefügeregeneration und damit verbunden eine Ertragssteigerung zu erreichen (Lebert und Stahl, 2001).

Produktionsflächen, auf denen übliche Technik zum Einsatz kommt, sind die Vorgewende. Allerdings liegen hier gegenüber den Kernbereichen der Flächen eine erheblich höhere Überrollhäufigkeit und ein stärkerer dynamischer Lasteintrag durch Anfahren und Bremsen vor. Außerdem findet hier bei der Zuckerrübenenernte die Anlage von Mieten statt, was zu einer relativ häufigeren Überrollung dieser Fläche mit

maximaler Radlast führt. Brunotte et al. (2000) haben auf Vorgewenden Ertragseinbußen (bis zu 17 %) gegenüber den Kernflächen festgestellt.

Keine Untersuchungen liegen vor für die Ertragsleistung der Kernbereiche üblicher Produktionsflächen mit dem dort vorhandenen Verdichtungszustand im Vergleich zu einer nicht verdichteten Kontrolle, d.h. einem Boden mit natürlichem Bodengefügezustand. Solche Kontrollflächen sind nicht vorhanden. Eine Versuchsanstellung kann immer nur den zukünftigen Zustand mit einem Jetzt- oder einem früheren Zustand vergleichen, insofern dieser dokumentiert ist. Stellt z.B. ein Landwirt einer Region auf eine neue Technik um, die mit anderen Belastungsbedingungen verbunden ist, so können die Gefügeeinflüsse auf den Ertrag solange verfolgt werden, wie Flächen anderer Landwirte der gleichen Region als Kontrolle zur Verfügung stehen, die noch nicht auf die neue Technik umgestellt haben.

So konnten Sommer et al. (2001) bei einem Vergleich zwischen einer Fläche, die seit 1995 mit einem 6-reihigen, selbstfahrenden Rübenroder beerntet wird, mit einer Kontrolle, die weiterhin 2-reihig beerntet wird, keine Unterschiede im Weizenertrag als Rübenfolgefrucht feststellen. Solche Versuche sind jedoch langatmig und aufwendig und sie beinhalten hinsichtlich der Ertragsbewertung auch Restunsicherheiten, da zu unterschiedlichen Flächen häufig auch unterschiedliche Betriebsleiter und deren Betriebsführung gehören, was ebenfalls einen Ertragseinfluss haben kann.

Ertragsschäden durch Bodenschadverdichtungen können auf üblichen Produktionsflächen anhand der Erkenntnisse aus Bodenbelastungsversuchen zwar angenommen werden, nachgewiesen sind sie aber nicht, da der Vergleich mit der nicht- oder anders verdichteten Kontrolle äußerst schwierig ist. Absolute Ertragsrückgänge, die auch auf eventuelle Schäden des Bodengefüges zurückzuführen wären, sind ebenfalls nicht bekannt. Möglicherweise vorhandene Schadverdichtungen verursachen also derzeit keine erkennbaren Schäden an den Erträgen.

Für diesen Sachverhalt kann es zwei Gründe geben:

1. Es sind auf unseren Kernproduktionsflächen keine Schadverdichtungen vorhanden, die so gravierend wären, dass davon akute, messbare Ertragsdepressionen auslöst würden und/oder,
2. vorhandene Ertragsdepressionen durch Schadverdichtungen werden durch Fortschritte an anderen, ertragssteigernden Faktoren, wie Züchtung, Bestandesführung und Technologie, überkompensiert.

Ein weiteres Problem, Bodenschadverdichtungen an der Ertragsstatistik zu erkennen, liegt darin, dass in üblichen Ertragsstatistiken ein durchschnittliches Schlagergebnis des Naturalendertrages ermittelt wird. Eine teilschlagspezifische Ertragsbonitur erfolgt in der Regel nicht, so dass mögliche Ertragseinbußen auf schadverdichteten Arealen nicht erfasst werden und im Durchschnittsertrag nicht erkannt werden können. Eine Bonitur des Pflanzenwachstums, das vielleicht noch mehr Auskunft über die Beschaffenheit des Bodengefüges geben würde als der Endertrag, findet üblicherweise auch nicht statt. Erst wenn sich in den Durchschnittserträgen rückläufige Ergebnisse oder im Vergleich signifikant geringere Zunahmen zeigten, könnten Schäden durch Bodenverdichtungen am Ertrag erkannt werden.

Demgegenüber steht jedoch eine jährliche Ertragssteigerungsrate von etwa 1,5 %, die auf Fortschritte in der Züchtung, der Bestandesführung und der Bodenbearbeitung zurückzuführen sind (Brunotte, 2002, mündl. Mitteilung). Hinzu kommt die bereits erwähnte, saisonbedingte Variation anderer Faktoren, wie z.B. Temperatur- und Niederschlagsverlauf während der Vegetationsperiode, die den Ertrag mit beeinflussen. Der Ertrag eines Jahres ist also ohnehin kein zweifelsfreier Anzeiger von Bodenschadverdichtungen. Bevor anhand der üblichen Ertragsstatistik Schäden erkannt würden, müssten sicher erst sehr starke Schädigungen am Bodengefüge verursacht worden sein. Es ist also durchaus denkbar, dass die Erträge ohne bereits vorhandene Bodenschadverdichtungen höher wären, als sie derzeit sind. Ein entsprechender Beweis ist aber kaum zu führen.

Ähnlich wie bei der Ertragsermittlung, ist die Frage nach dem Ausmaß von bodenbiologischen und – mechanischen Schäden durch nutzungsbedingte Bodenverdichtungen auf üblichen Produktionsflächen wenig Gegenstand von Forschungen (**Tabelle 7**). Lediglich in Belastungsversuchen und bei Untersuchungen auf Kippen wird von bodenbiologischen und bodenmechanischen Schäden berichtet, wobei bodenbiologische Untersuchungen häufiger sind als bodenmechanische. Eine umfangreiche Literaturübersicht zu Ergebnissen aus Belastungsversuchen geben Dürr et al. (1995).

Tabelle 7: Berichte über Schäden an den Bodenfunktionen durch Schadverdichtungen, die durch bodenbiologische und -mechanische Analytik angezeigt werden.

Flächentypen	Bodenbiologische Analysen	Bodenmechanische Analysen
Belastungsversuche	Larink et al., 1995 Langmaack et al., 1996	Wiermann, 1998
Kippen	Thum et al., 1990 Schneider, 1994 Emmerling und Wermber, 1999	Lebert, 1991 Schneider, 1994
Übliche Produktionsflächen	-	-

Die hochrangigsten Anzeiger von Schäden an den Ausgleichs- und Regelungsfunktionen sind Hochwasser, Erosion, Luft- und Gewässerqualität (s. Abbildung 1). Schäden durch Bodenverdichtungen sind anhand dieser Anzeiger bisher nicht belegt. Die in der Einführung (Kapitel 1) erwähnten Literaturberichte zu Veränderungen an den Bodenfunktionen beziehen sich auf die direkteren Auswirkungen der Bodenverdichtung unter Versuchsbedingungen, z.B. auf elementarere Bodeneigenschaften, wie die Wasserdurchlässigkeit oder das Porenvolumen. Dass durch Schäden an den elementareren Bodeneigenschaften auch höherrangige Schäden entstehen können, kann zwar kausal hergeleitet und in Modellversuchen auch bestätigt werden, wie z.B. die verstärkte Emission gasförmiger N-Verbindungen (Kaiser et al., 1995). Schäden,

die von verdichteten Flächen ausgehen, konnten aber bisher nicht gemessen oder quantifiziert werden.

Es ist zwar kaum strittig, dass eine verminderte Wasserdurchlässigkeit zu einer reduzierten Grundwasserneubildung oder einem erhöhten Oberflächenabfluss führen kann und damit Prozesse wie Hochwasserbildung oder Erosion begünstigt. Eine Quantifizierung oder Abschätzung der Bedeutung der Bodenschadverdichtung für diese Prozesse konnte aber bislang nicht erfolgen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Bodenverdichtung für Schäden anhand dieser Anzeiger oft weniger ursächlich ist, sondern eher einen verstärkenden Effekt auf den durch andere Sachverhalte initiierten Prozess ausübt, wie z.B. beim Auftreten von Hochwasser durch starke Niederschläge. Dieser Umstand macht Quantifizierungen des Schadverdichtungseinflusses äußerst schwierig.

Fazit

Bodenschadverdichtung kommt auf Teilbereichen landwirtschaftlicher Nutzflächen mit besonders intensiver mechanischer Bodenbelastung, wie Fahrgassen von Belastungsversuchen, Vorgewenden und Rekultivierungsflächen anhand hochrangiger Anzeiger, wie Ertrag oder bodenbiologische Aktivität, zum Ausdruck. Auf üblichen Kernproduktionsflächen sind in Deutschland bisher keine Schäden anhand dieser Anzeiger dokumentiert. Die Fachliteratur berichtet über negative Veränderungen an elementarerer Bodeneigenschaften, wie der Wasserdurchlässigkeit oder dem Porenvolumen.

3.3 Zukünftige Prognosen

Von großer Bedeutung für die Einstufung der Erheblichkeit von Bodenverdichtungsschäden ist die Frage: „Was für Schäden sind in Zukunft zu erwarten?“ Sollten zukünftig Schäden oder negative Veränderungen an den Bodeneigenschaften zu erwarten sein, dann würde auch die Gefahr von Schäden an den Bodenfunktionen wahrscheinlicher, die durch hochrangige Anzeiger zum Ausdruck kommen könnten. Zur Bewertung der zukünftigen Entwicklung stehen derzeit zwei Instrumentarien zur Verfügung: das Bodenmonitoring und die bodenmechanische Prognose.

3.3.1 Bodenmonitoring

Das Bodenmonitoring erfolgt entweder im Rahmen der Länderprogramme zur Bodendauerbeobachtung (BDF) oder in Form von Langzeituntersuchungen auf Initiative von Forschungseinrichtungen. Untersuchungen zur Bodenphysik sind im Rahmen der Bodendauerbeobachtung der Länder noch immer die Ausnahme. Lediglich die Länder Bayern und Thüringen haben bisher systematische Erhebungen zur Bodengefügeentwicklung durchgeführt. Die dort bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die im ersten Teil dieses Berichts festgelegten, bodenphysikalischen Schadensschwellen für die Bodenverdichtung auf normalen Produktionsflächen überwie-

gend nicht erreicht werden (Werner und Paul, 1999; Brandhuber et al., 2001). Nur vereinzelt werden sie überschritten, vor allem im Bereich der Krümmenbasis oder Schlepperradsohle.

In dieser Bodentiefe berichten auch Sommer et al. (1985) und Ehlers et al. (2003) von negativen Veränderungen der Bodeneigenschaften. Sommer et al. (2001) berichten über verringertes Porenvolumen von Vorgewenden bis in 40 cm Tiefe gegenüber den entsprechenden Kernflächen. Ein Vergleich zwischen den Porenvolumina von 6-reihig und 2-reihig beernteten Rübenstandorten seit 1995 brachte keinen signifikanten Unterschied. Fenner (1997) hingegen berichtet beim Vergleich einer 20-jährigen Zuckerrübenanbaufolge mit einer Silomaisfruchtfolge zweier benachbarter Betriebe von einem bis in 70 cm Bodentiefe reichenden geringeren Porenvolumen der Zuckerrübenfruchtfolge. Er führt diesen Unterschied auf die höheren Radlasten bei der Zuckerrübenernte und deren Einsatzzeitpunkt zurück.

Eine grundlegende Problematik von Langzeitmessungen zeigen die Ruhmschen Untersuchungen, die 1952 und 1982 von der FAL durchgeführt wurden (**Abbildung 2**). In einem Zeitraum von 30 Jahren hat die mittlere Lagerungsdichte in der Schlepperradsohle von 144 Ackerstandorten in Niedersachsen um $0,07 \text{ g/cm}^3$ zugenommen. Unterstellt man eine lineare Steigerungsrate, dann lag die jährliche Zunahme im Durchschnitt bei $0,002 \text{ g/cm}^3$. Eine solch geringe Veränderung dieser bodenphysikalischen Eigenschaft ist analytisch von einem Jahr zum nächsten gar nicht nachweisbar. Das Bodenmonitoring lässt also erst nach langen Zeiträumen eine Bodengefügeveränderung erkennen. Dieser Sachverhalt erschwert die Gefährdungsabschätzung.

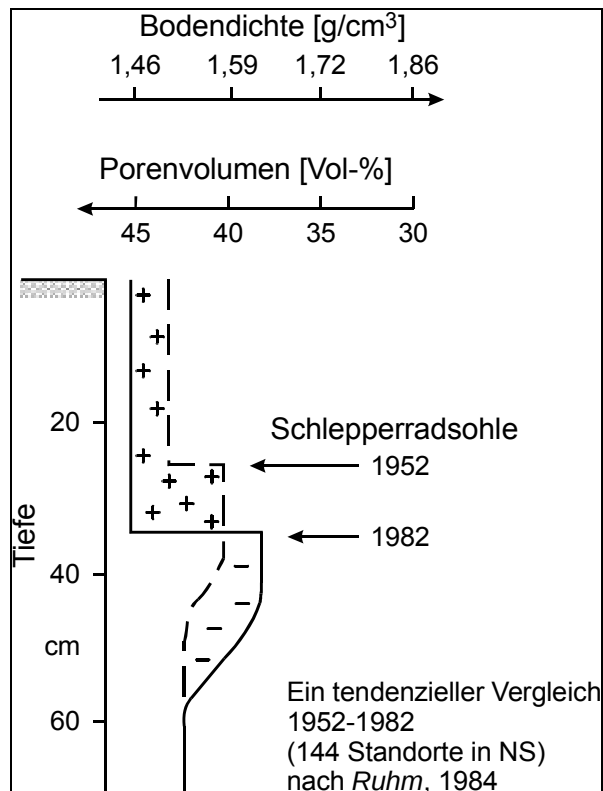


Abbildung 2: Zunahme der Lagerungsdichte und Abnahme des Gesamtporenvolumens von 144 niedersächsischen Ackerstandorten von 1952 bis 1982 (nach Ruhm, 1984) .

Fazit

1. Länderprogramme zur Bodendauerbeobachtung und andere gezielte, langjährige Erhebungsuntersuchungen sollten mehr bodenphysikalische und -biologische Untersuchungen enthalten. Die zu erhebenden Parameter sollten zukünftig zwischen den Behörden und Institutionen abgestimmt werden. Das in Kapitel 1 zusammengestellte Indikatorsystem könnte dafür eine Grundlage sein.
2. Die wenigen vorhandenen Daten aus der Bodendauerbeobachtung zeigen, dass bodenphysikalische Schadensschwellen für die Verdichtung nur vereinzelt überschritten werden und dort überwiegend auf Vorgewenden und in Pflugsohlentiefe. Allerdings muss zur Bewertung des durch Nutzung bedingten Verdichtungsanteils auch die Pedogenese mit berücksichtigt werden.
3. Von einer Zunahme der Bodenverdichtung durch landwirtschaftliche Nutzung kann anhand der Ruhm'schen Untersuchungen ausgegangen werden. Sie kann aber bodenphysikalisch nur langfristig erfasst und auch nicht einfach extrapoliert werden.
4. Das Erreichen von bodenphysikalischen Schadensschwellen durch schwere Erntetechnik konnte bislang anhand von systematischen Untersuchungen nicht nachgewiesen werden.

5. Das Entstehen von Schadverdichtung durch vorhandene Technik kann durch vorliegende Ergebnisse des Bodenmonitorings weder bestätigt noch ausgeschlossen werden.

3.3.2 Bodenmechanische Prognose

Schätzprognosen für die Bodengefügeentwicklung werden mit bodenmechanischen Methoden anhand der Gegenüberstellung von Druckbelastung und Druckbelastbarkeit durchgeführt. Als Maß für die Druckbelastbarkeit, bis zu der das Bodengefüge unter einer Druckbelastung stabil bleibt und nicht mit einer Zunahme der Dichtlagerung reagiert, wird in der Bodenmechanik die Vorbelastung nach Casagrande (1936) verwendet. Das Verfahren wurde ursprünglich für die Baugrundmechanik verwendet, später aber auch für die Bearbeitung bodenkundlich-ackerbaulicher Fragestellungen eingeführt (Gill und VandenBerg, 1966; Horn, 1981; Koolen und Kuipers, 1983; Hartge und Horn, 1992; Lebert und Horn, 1992).

Eine detaillierte Beschreibung des Vorbelastungskonzeptes und anderer Prüfkonzpte erfolgt in Kapitel 4. An dieser Stelle sollen bereits vorliegende Ergebnisse der Anwendung des Vorbelastungskonzeptes vorgestellt werden, um die derzeitige Datenlage zur Schadensprognose zu verdeutlichen. Es liegen nicht sehr viele Messergebnisse vor, die für eine solche Prognose verwendet werden können. Sie stammen auch z. T. von Untersuchungen an Sonderflächen, wie Kippen oder Bodenbelastungsversuchen (**Tabelle 8**).

Tabelle 8: Ermittelte Spannweiten für die Vorbelastung und die vertikale Druckbelastung (gemessen oder berechnet) für Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung.

Vertikaler Druck (σ_z) in 40 cm Tiefe		Vorbelastung (P_v) im Unterboden (p_F 1.8)	
Spanne (kPa)	Autoren	Spanne (kPa)	Autoren
30-130	Lebert und Springob (1994: Bodenbearbeitung auf Kippen)	45-151	Lebert (1989: bayerische Ackerböden)
32-180	Semmel (1993: BMBF-Belastungsversuch auf Löß)	60-230	Nissen (1999: Ackerböden BRD)
10-140	Stahl und Gierke (2001: Ernte und Transportfahrzeuge in Sachsen)	78-186	Schäfer-Landefeld und Brandhuber (2001: bayerische Ackerböden)

Vergleicht man die ermittelten Spannweiten für die Vorbelastung und den vertikalen Bodendruck, so überschneiden sich diese. Hieraus kann der Schluss gezogen werden, dass verdichtungsfördernde Spannungskonstellationen im Unterboden unter normaler Bewirtschaftung auftreten können und dadurch ein Verdichtungsprozess grundsätzlich stattfinden kann. Allerdings liegen dort, wo intensive, flächendeckende

Untersuchungen zur Vorbelastung durchgeführt wurden, oft nicht im gleichen Umfang Daten für die Druckbelastung mit aktueller Technik vor.

Stahl und Gierke (2001) haben für einen lehmig-schluffigen Sand beides ermittelt: die Vorbelastung und die Druckbelastung durch übliche Technik (**Abbildung 3**). Es ist zu erkennen, dass es im vorliegenden Fall bei hohen Radlasten in Kombination mit Reifeninnendrücken über 2 bar zur Überschreitung der Vorbelastung in 40 cm Bodentiefe kommen kann. Mit einem, wenn auch langsam verlaufenden, Verdichtungsprozess kann in solchen Fällen gerechnet werden.

Allerdings müssen bei bodenmechanischen Prognosen zwei Dinge beachtet werden:

1. Der Ödometertest beschreibt den Verdichtungsprozess nur für den Teilprozess der Kompression. Die beiden anderen Teilprozesse Scherung und Knetung bleiben unberücksichtigt.
2. Der Ödometertest beschreibt die Kompression nach abgeschlossener Konsolidierung unter Langzeitbelastung (üblicherweise: 23 h). Eine solche Versuchsanstellung ist erforderlich, um die Gefügestabilität unter nachvollziehbarer, wirksamer Spannung zu beschreiben. Die unter Praxisbedingungen auftretenden Belastungsimpulse sind aber nur sehr kurz. Dadurch ergibt sich unter Praxisbedingungen bei gleicher externer Belastung im Boden ein anderer Belastungspfad, der auch in einer anderen Gefügeänderung resultieren kann, verglichen mit dem Ödometertest.

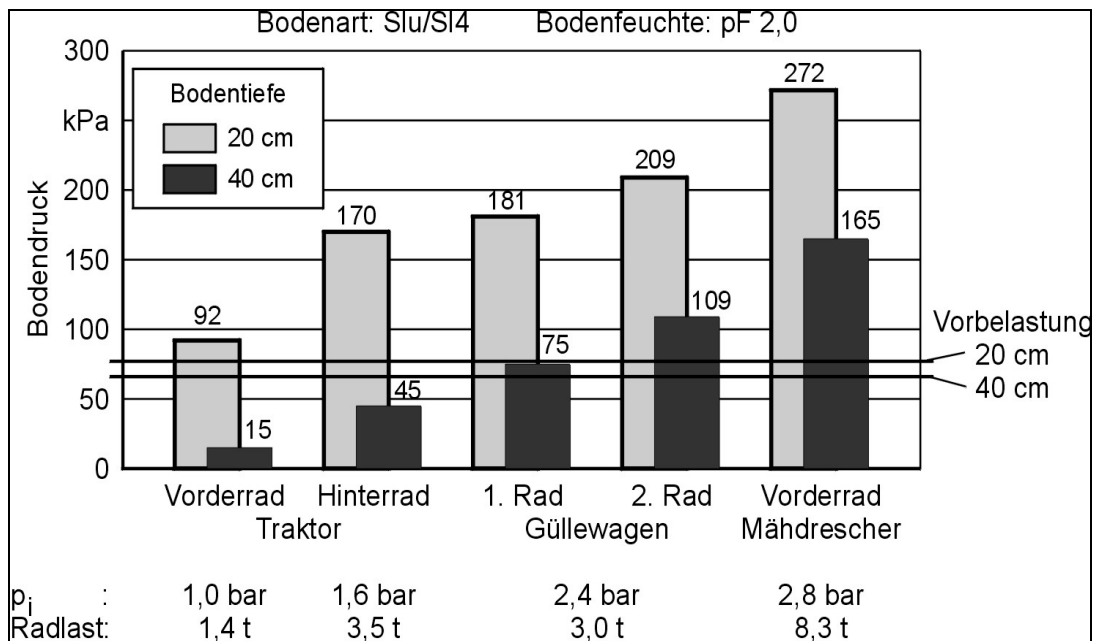


Abbildung 3: Vertikaler Bodendruck (gemessen) und Vorbelastung in einem konventionell bestellten, lehmig-schluffigen Sand bei Überfahrt eines Traktor-Gülewagen-Gespans und eines Mähdreschers (P_i = Reifeninnendruck, nach Stahl und Gierke, 2001).

Fazit

Vorliegende, bodenmechanische Untersuchungen zur Vorbelastung zeigen mögliche Verdichtungserscheinungen qualitativ an. Ob sich daraus auf üblichen Produktionsflächen Schäden ergeben, kann anhand des geringen Datenbestandes derzeit nicht abgesehen werden.

3.4 Fazit: Erheblichkeit von Bodenverdichtungsschäden

Anhand der vorhandenen Datenlage zur Schadenserfassung lässt sich die Erheblichkeit von Bodenschadverdichtungen nicht umfassend bewerten. Es ist zwar möglich, Bodengefügeschäden zu identifizieren, aber es bleibt unklar, welches Ausmaß diese haben oder möglicherweise erreichen werden. Es bleibt auch unklar, inwieweit aus Bodenschadverdichtungen Schäden an weiteren Schutzgütern entstehen, die durch hochrangige Anzeiger zum Ausdruck kommen, wie z.B. Pflanzenertrag, Erosion oder Störungen im Landschaftswasserhaushalt. Kausale Zusammenhänge zwischen elementaren Bodengefügeschäden und Schäden an anderen Schutzgütern sind zwar denkbar, aber nicht belegt.

Die Kenntnislage könnte durch gezielte Erhebungsuntersuchungen zur Bodenphysik und den möglichen Folgen der Bodenschadverdichtung verbessert werden. Solche Untersuchungen sollten koordiniert und auf eine bundesweite Bewertung der Schadenslage hin ausgewertet werden.

4 Prüfkonzeppte zur Gefahrenerkennung

Die Gefahr des Eintritts einer schädlichen Bodenveränderung durch Verdichtung ist anhand des Bodenmonitorings allein nicht zu bewerten. Einerseits liegen für eine Bewertung nicht genügend Daten vor; aber auch, wenn anhand von Erhebungsuntersuchungen Bodenschadverdichtungen festgestellt würden, wären diese ja bereits vorhanden und nicht vorher erkannt und durch ein Gefahrenabwehrkonzept verhindert worden. Die Gefahrenabwehr von Bodenschadverdichtungen braucht also noch eine weitere Komponente in Form einer Prognose, die es erlaubt, das Entstehen von Schadverdichtungen bereits vor deren Eintritt zu erkennen, um den Pflichten des Bundes-Bodenschutzgesetzes nachkommen zu können.

Eine Möglichkeit, schädliche Bodenveränderungen durch Verdichtung bzw. deren wahrscheinlichen Eintritt zu erkennen, ist die Prognose der Bodengefügeentwicklung über Indikatoren für die Bodenbelastung und die Bodenbelastbarkeit. Grundsätzlich gilt, dass eine Bodenverdichtung nur dann eintreten kann, wenn die Bodenbelastung die vorhandene Bodenbelastbarkeit übersteigt.

Für die Kriterien „Bodenbelastung“ und „Bodenbelastbarkeit“ sind die zu verwendenden Indikatoren aus der Bodengefügeforschung bekannt. Sie spiegeln sich in den Prüfkonzepthen wider, die bereits für die Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen entwickelt worden sind bzw. entwickelt werden: den Konzepten „Vorbelastung“ nach DVWK, „Belastungsquotient“ nach KUL (heute: USL), „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ nach ZALF und „Befahrbarkeit“ nach FAL (**Tabelle 9**).

Tabelle 9: Indikatoren für die Kriterien „Bodenbelastung“ und „Bodenbelastbarkeit“ aus vorhandenen Prüfkonzepthen zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen.

Kriterien	Indikatoren	Prüfkonzephte
Bodenbelastung	Fahrzeugdaten	• „Vorbelastung“ nach DVWK • „Belastungsquotient“ nach KUL • „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ nach ZALF • „Befahrbarkeit“ nach FAL
	Bodendruck	
Bodenbelastbarkeit	Bodentypische Druckbelastbarkeit	
	feuchteabhängige Druckbelastbarkeit	

Im Gegensatz zu Vorsorgekonzepthen, mit denen Strategien gegenüber potenziellen Gefährdungen entwickelt werden, ist in einem Prüfkonzepth zur Gefahrenerkennung die tatsächliche Gefahr zu bewerten. Es muss so aufgebaut sein, dass, bei gegebener Technik und Fruchtfolge, die Bodenbelastung quantifiziert und in Abhängigkeit von den bodentypischen und feuchteabhängigen Druckstabilitäten des Bo-

dens eine Aussage über die zu erwartende Gefügeänderung im Unterboden getroffen werden kann.

Eine potentielle Gefährdung des Bodengefüges kann grundsätzlich durch jeden der vier in Tabelle 9 genannten Einzelindikatoren angezeigt werden. So stellt z.B. eine hohe Radlast grundsätzlich eine potenzielle Verdichtungsgefährdung dar, eine tatsächliche Verdichtung tritt aber nur ein, wenn zum Zeitpunkt der Befahrung auch bis in den Unterboden strukturell labile Bodenzustände vorliegen, sei es durch hohe Bodenfeuchte oder eine geringe bodentypische Druckbelastbarkeit, und über die Fahrwerke ein entsprechend hoher Bodendruck entsteht. Desgleichen zeigen hohe Bodenfeuchte oder geringe bodentypische Druckbelastbarkeit eine erhöhte, potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit an, eine Verdichtung tritt aber auch hier erst ein, wenn es bei diesen Bodenzuständen zu entsprechend hohen Bodenbelastungen kommt. Die Gefahr bzw. Besorgnis des Eintretens einer schädlichen Bodenveränderung liegt nur dann vor, wenn die Verknüpfung aller vier in **Tabelle 9** genannten Einzelindikatoren (Fahrzeugparameter, Bodendruck, bodentypische Druckbelastbarkeit und Bodenfeuchte) eine Konstellation ergeben, bei der die Bodenbelastung die Belastbarkeit übersteigt.

Die Verknüpfung aller Einzelindikatoren zur Ableitung einer Bewertung der Verdichtungsgefahr erfolgt in den Prüfkzepten durch unterschiedliche Schlüsselindikatoren. Im Folgenden werden die Prüfkzepte detailliert beschrieben und es wird geprüft, inwieweit sie in der vorliegenden Form den Anforderungen an die Gefahrenabwehr genügen. Es erfolgt zunächst eine Bewertung der Einzelindikatoren bevor auf die Schlüsselindikatoren der Konzepte eingegangen wird.

Neben den in Tabelle 9 aufgeführten Konzepten werden der Ansatz „Ermittlung der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit“ des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS), der einen Indikator allein für die Bodenbelastbarkeit beschreibt, ein Konzept zur Forstbefahrung der TU München und ein noch nicht veröffentlichter Vorschlag einer EU-Arbeitsgruppe (Chamen et al., 2003) beschrieben.

4.1 Einzelindikatoren der Verdichtungsgefährdung

4.1.1 Fahrzeugparameter

Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Boden ist die Kontaktfläche. In ihr wird das Gewicht der Maschine als Druck auf den Boden übertragen. Die entscheidende Kenngröße von Fahrzeugbelastungen für den Boden ist daher der Kontaktflächen-
druck (Söhne, 1953). Dieser hat eine statische Komponente, die als Gewichtskraft der Maschine auf die Aufstandsfläche bestimmt ist und in der Kontaktfläche eine Normalspannung erzeugt. Eine weitere, dynamische Komponente des Kontaktflächen-
druckes ergibt sich aus dem Abrollen der Räder und dem Antrieb. Diese Komponente lässt sich innerhalb der Kontaktfläche in Normal- und Scherspannungen zerlegen. Eine bekannte Folge von Scherspannungen innerhalb der Kontaktfläche ist der Schlupf. Die mechanischen Bodenbelastungen unter Landmaschinen sind also

gekennzeichnet durch eine differenzierte Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche Reifen/Boden.

Zur vollständigen Beschreibung der Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche sind folgende Größen erforderlich (Koolen und Kuipers, 1983):

- Kontaktfläche,
- Radlast und
- Reifenverformung/Reifeninnendruck.

Die Reifenverformung kennzeichnet das Druckverteilungsmuster innerhalb der Kontaktfläche. Meist ist die Reifenverformung jedoch unbekannt und rechnerisch schwer zu handhaben. Es gibt bisher kein Standardverfahren, um die reale Druckbelastung innerhalb der Kontaktfläche, bestehend aus Normal- und Scherspannungen und deren Verteilung, zu erfassen. Jaklinski (1999) entwickelte ein neues Rechenmodell zur Bestimmung der Bodenbelastung in der Kontaktfläche, indem die Reifenverformung als geometrische Messgröße integriert ist. Erste Validierungstests des Modells wurden unter Versuchsbedingungen durchgeführt (Jaklinski et al., 2001; Sommer et al., 2001).

Bislang wird mit Hilfsgrößen zur Beschreibung des Kontaktflächendruckes gerechnet. Die gebräuchlichste ist der mittlere Kontaktflächendruck aus Radlast dividiert durch Kontaktfläche (Söhne, 1953). Dabei wird in Kauf genommen, dass diese Größe nur die statische Komponente beschreibt und die gesamten Druckverhältnisse innerhalb der Kontaktfläche nur unvollständig berücksichtigt (**Tabelle 10**). Eine weitere Unschärfe dieser Kenngröße ergibt sich daraus, dass die Kontaktfläche in situ häufig nur geschätzt werden kann und bislang nicht exakt ermittelbar ist.

Tabelle 10: Kurzbewertung von Fahrzeugparametern für die Verwendung zur Charakterisierung der mechanischen Bodenbelastung in einem Prüfkonzent.

Parameter	Bewertung
Radlast	• Statisch mit vertretbarem Aufwand zu bestimmen als Gesamtmasse (leer bzw. voll) oder Achslast dividiert durch Anzahl der Räder; • Dynamisch in-situ nicht bestimmbar;
mittlerer Kontaktflächen- druck	• Unter statischen Bedingungen im Stand als Quotient aus Radlast und Kontaktfläche leicht zu bestimmen; • Unter In-situ-Bedingungen während der Fahrt schwer zu bestimmen, da die Kontaktfläche Reifen/Boden in-situ oft nicht bekannt ist; • Beschreibt als mittlerer Wert die effektiv wirksamen Bodenbelastungen nur unvollständig;
Projektionsdruck	• Bei gegebener Radlast einfach zu bestimmen (Quotient aus Radlast und Projektionsfläche des Reifens); • Korrelation zum Kontaktflächendruck nur auf fester Fahrbahn; • Vorteilhaft für Maschinenvergleiche, nicht jedoch hinsichtlich der Bodenbelastung;
Reifeninnendruck	• Sehr leicht kontrollierbar und mit technischem Aufwand auch regelbar; • Korrelation zum oberflächennahen Bodendruck ist gegeben;

Um das Kontaktflächenproblem zu umgehen, hat man den so genannten Projektionsdruck eingeführt, bei dem die Radlast durch die Projektionsfläche des Reifens dividiert wird (Olfe und Schön, 1986). Die Projektionsfläche ergibt sich als Fläche aus Reifenbreite und -durchmesser und kann der Reifenbezeichnung entnommen werden. Der Projektionsdruck ist allerdings eine starre Größe und reagiert z.B. nicht auf Senkungen des Reifeninnendrucks. Der Projektionsdruck ist deshalb nicht für die Verwendung in einem Prüfkonzent geeignet. Er entspricht auch zahlenmäßig nicht dem Kontaktflächendruck und eine Proportionalität ist nur unter ganz bestimmten Randbedingungen vorhanden. Er eignet sich eher für einen Maschinenvergleich, bei dem die Bodenbelastung nur relativ, und nicht absolut, eine Rolle spielt.

Eine Alternative zum Projektionsdruck ist bei unbekannter Kontaktfläche die Berechnung des Kontaktflächendrucks aus dem Reifeninnendruck und einer Pauschalen für die Karkassensteifigkeit (Bolling und Söhne, 1982). Eine Proportionalität zwischen dieser Berechnung und dem tatsächlichen Kontaktflächendruck besteht aber nur auf fester Fahrbahn. Es gibt Hinweise, dass der Reifeninnendruck bei gegebener Karkassensteifigkeit eine Proportionalität zum Bodendruck im oberflächenna-

hen Bereich aufweist (Weißbach, 2001). Der Reifeninnendruck ist sehr leicht und exakt messbar, mit technischem Aufwand auch regelbar (Reifeninnendruckregelanlage).

Eine weitere Kenngröße zur Klassifizierung der Bodenbelastung durch Fahrzeugparameter ist die Radlast. Sie ist statisch mit vertretbarem Aufwand zu bestimmen, z.B. als Gesamtmasse (leer oder voll) dividiert durch die Anzahl der Räder, wobei die Achslastverteilungen bekannt sein müssen. Allerdings ist die dynamische Komponente der Radlast in situ oft nicht bekannt. Bei Zugmaschinen sind die Zugkraftkomponente und die damit häufig verbundene Lastenumverteilung zwischen den Achsen schwer zu beziffern. Bei Erntemaschinen hängt die Radlast auch vom Bunkerfüllungsgrad ab, der derzeit noch nicht standardmäßig über eine Messvorrichtung erfasst wird. Auch spielt die Hangposition eine Rolle.

4.1.2 Bodendruck

Unter Bodendruck wird der Druck im Boden unterhalb der Kontaktfläche während des Fahrens verstanden. Dieser Druck wird in der bodenmechanischen Literatur auch als Spannung (engl.: stress) bezeichnet. Der Bodendruck unter einer externen Last wird bestimmt von Radlast, Kontaktflächendruck, der Größe der Kontaktfläche und von den bodenspezifischen Eigenschaften der Druckkompensation bzw. Druckfortpflanzung. Für die Druck- oder Spannungsausbreitung im Boden existiert eine Theorie nach Boussinesq (1889, zitiert bei Söhne, 1958), bei der die Haupt-, Normal- und Scherspannungen unter einer punktförmigen Last im elastischen, homogenen und isotropen Halbraum berechnet werden.

Das Verfahren wurde zunächst für Baugrundberechnungen verwendet und von Fröhlich (1934) für die Berechnung unter rechteckiger und von Newmark (1942) unter kreisrunden Belastungsflächen weiterentwickelt. Beide Autoren verwendeten in den Berechnungen so genannte Konzentrationsfaktoren, die der Modifikation der Druckausbreitung bei weichem, mittel festem und festem Boden Rechnung tragen sollten.

Söhne (1951) modifizierte das Verfahren für die Anwendung in der Landwirtschaft und berechnete die Druckausbreitung unter einer elliptischen Kontaktfläche. Übliche Darstellungen der Druckausbreitung als Funktion der Bodentiefe sind so genannte Druckzwiebeln, die Linien gleicher Spannungen im Boden anzeigen (**Abbildung 4**).

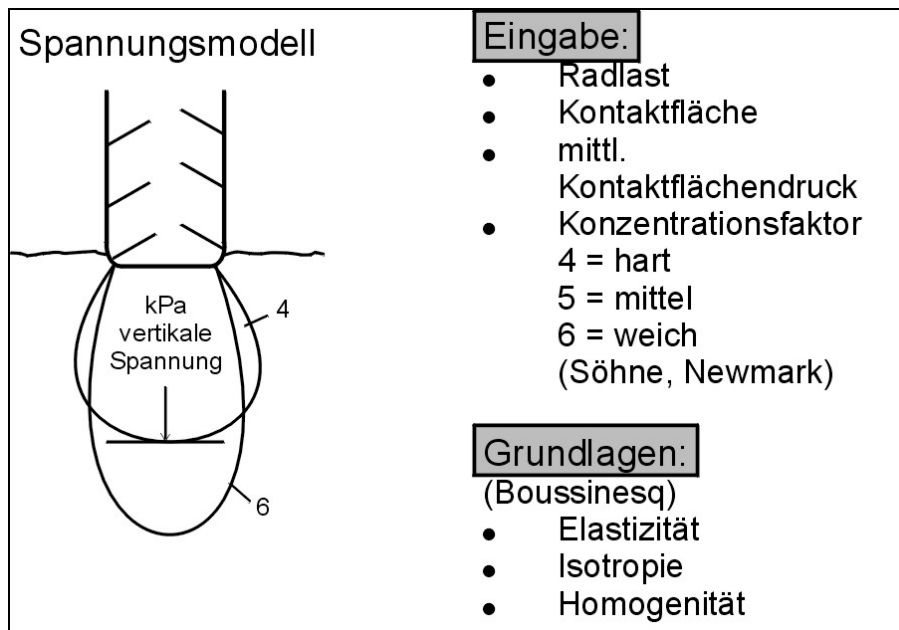


Abbildung 4: Spannungsmodell zur Berechnung des vertikalen Bodendruckes unter Annahme einer elliptischen (Söhne) oder kreisrunden Kontaktfläche (Newmark) auf der Grundlage der Theorien nach Boussinesq und Fröhlich.

Nachteil dieser Berechnungsmethode ist, dass der Boden nicht vollständig elastisch, isotrop oder homogen ist. Je mehr der Boden von diesen Idealen abweicht, desto ungenauer wird die Berechnung. Um die Berechnungsmodelle zu validieren, wurde deshalb versucht, die Druckausbreitung im Boden messtechnisch zu erfassen. Die entwickelten Sensoren lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: flexible, hydraulische Systeme, die einen durchschnittliche Normalspannung im Boden anzeigen (Bolling, 1986; Blackwell und Soane, 1978), und starre Systeme, die gerichtete Spannungen normal zur Ausrichtung der Sensorfläche messen können (Prange, 1960; Horn, 1980).

Nichols et al. (1987) beschreiben einen Sensor, der Spannungen aus 6 Richtungen misst, woraus über eine spezielle Sensoranordnung auch Scherspannungen im Boden gemessen werden können. Dieser Sensortyp wurde für den Einsatz in der Bodenrinne entwickelt, später aber auch von anderen Autoren in Freilandtests eingesetzt (Horn et al., 1992; Semmel, 1993; Lebert und Springob, 1994; Harris und Bakker, 1994; Pytka und Dabrowski, 2001).

Grundproblem bei der Spannungsmessung im Boden ist der Einbau der Sensoren. Flexible, hydraulische Sensoren können durch Bohrung relativ schnell in den Boden gebracht werden. Für starre Sensoren muss ein Kanal geschlagen oder gefräst werden. Um vertikale Spannungen zu messen, müssen diese Sensoren horizontal eingebaut werden, wodurch der Aushub einer Grube erforderlich ist. Durch die Störungen der Bodenstruktur beim Einbau wird der Spannungszustand rund um die Sensorposition grundsätzlich gestört. Bei flexiblen Sensoren kann der Bodenschluss über einen Vordruck reguliert werden. Starre Systeme müssen sehr passgenau eingebaut werden. Eine weitere Störgröße bei der Spannungsmessung ist das nicht

gleiche Verformungsverhalten von Sensor und Boden. Ist der Sensor weicher als der Boden, reduziert sich die Spannung am Sensor. Ist er härter, kommt es zur Konzentration von Spannungen auf den Sensor. Eine Validierung von Bodendruckberechnungen durch Bodendruckmessungen ist grundsätzlich problematisch, da weder die eine noch die andere Größe objektiv eindeutig zu bestimmen ist.

Ein weiterer, wichtiger Einflussfaktor auf den Bodendruck ist der Wassergehalt im Boden. Beim Zusammendrücken des Bodens durch Befahrung wird nicht nur der Druck auf die feste Phase sondern auch auf das Bodenwasser erhöht, als sogenannte Neutralspannung. Dies führt dazu, dass die effektive Spannung, die über die festen Bodenpartikel wirkt, reduziert wird. Bei einer Dauerbelastung kommt es dadurch zu einer verlangsamten Setzung, die auch als Konsolidierung bezeichnet wird (Terzaghi und Jelinek, 1954). Ein schweres Fahrzeug, das auf weichem Boden abgestellt ist, kann deshalb langsam einsinken. Bei Kurzzeitbelastung, d.h. bei schnellen Überrollungen, zeigt sich dieser Effekt in einer zunehmenden Spurtiefe mit steigender Überrollhäufigkeit (Brunotte et al., 2000). Bei wiederholten Druckmessungen in der gleichen Spur steigt zwar die gemessene vertikale Spannung nicht an, aber der Anteil an Porenwasserdruck nimmt mit steigender Überrollhäufigkeit ab, so dass die effektiven Spannungen im Boden höher werden (Sammel und Horn, 1995).

In den herkömmlichen Berechnungsmodellen nach Söhne oder Newmark kann der Effekt der Überrollhäufigkeit nur in einem um die Spurtiefe verkürzten Abstand zur betrachteten Bodenschicht und in einem gegebenenfalls modifizierten Konzentrationsfaktor berücksichtigt werden. Der Effekt neutraler Spannungen bei einer Erstüberrollung bleibt aber unberücksichtigt. Dieser komplexe Sachverhalt kann nur in Finite-Elemente-Modellen Berücksichtigung finden.

4.1.3 Bodentypische Druckbelastbarkeit

Unter bodentypischer Druckbelastbarkeit ist das Verdichtungsverhalten von Böden zu verstehen, wie es sich aus den bodengenetischen Einflüssen ohne Berücksichtigung von wechselnden Bodenfeuchten ergibt. Haupteinflussfaktoren auf die Bodenstabilität ohne Berücksichtigung der Feuchte sind die Bodenart und das Bodengefüge.

Die Einstufung bodentypischer Druckbelastbarkeit kann im Einzelfall analytisch oder flächendeckend über eine Auswertung von Bodenkarten erfolgen. Dort werden die notwendigen Basisinformationen in verschiedenen Maßstäben bereitgestellt. Für die Erstellung von Auswertungskarten sind spezielle Algorithmen erforderlich, welche die Grundinformationen der Bodenkarten so miteinander verrechnen und verknüpfen, dass eine Einstufung im Hinblick auf die Bewertung der Druckbelastbarkeit möglich wird.

Im Folgenden sind die Kenngrößen und Basisdaten für den Indikator der bodentypischen Druckbelastbarkeit der zu diskutierenden Konzepte dargestellt (**Tabelle 11**).

Tabelle 11: Übersicht der Indikatoren für die bodentypische Druckbelastbarkeit.

Indikator	Konzept	Quellen
Vorbelastung	Vorbelastung nach DVWK	Lebert, 1989; ATV-DVWK-M 234, 1995; DIN-V-19688, 2001; ATV-DVWK-M 901, 2002; Nissen, 1999
Druckbelastbarkeit in KUL	KUL (heute: USL)	Werner und Paul, 1999; Eckert et al., 1999, 2002; ATV-DVWK-M 235, 1997;
Schadverdichtungs-gefährdungsklassen	SVGK nach ZALF	Petelkau et al., 2000
Potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit	NIBIS	Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS); NlFB, 1997
Plastizität	Informationssystem Forstbefahrung der TU München	Matthies, 1998; Kremer et al., 2000

4.1.3.1 Vorbelastung

Ein Standardverfahren der Bodenmechanik zur Ermittlung der Druckstabilität unter konstanter Bodenfeuchte ist der Ödometertest (DIN 18139, 1996; Sommer, 1974). Aus der Drucksetzungskurve des Ödometertests wird die mechanische Vorbelastung abgeleitet. Sie wird als die im Boden vertikal gerichtete Druckstabilität ermittelt, bei deren Überschreitung eine zunehmende, irreversible Dichtlagerung im Boden erwartet wird. Um Effekte des Porenwasserdruckes auf die Setzung auszuschließen, wird die Vorbelastung erst nach erfolgter Konsolidierung im Drucksetzungsversuch bestimmt.

Um auch in weniger leitfähigen Böden die Konsolidierung sicher zu stellen, wird oft eine generelle Belastungsdauer von 23 Stunden eingestellt. Die Vorbelastung hat die Dimension eines Druckes (kPa). Sie ist ein Maß für die mechanische Belastbarkeit von Böden und, im Umkehrschluss, auch für die Verdichtungsempfindlichkeit. Im Vorbelastungskonzept zur Bewertung der Verdichtungsgefährdung von Ackerböden wird sie für den Bereich der Feldkapazität (pF 1,8 und 2,5) ermittelt.

Die Auswertung von Drucksetzungskurven zur Ermittlung der Vorbelastung geschieht nach dem grafischen Casagrande-Verfahren (Casagrande, 1936, Abbildung 5). Es steht auch ein alternatives Verfahren nach Ohde (1951) zur Verfügung, welches in jüngerer Zeit von Dias Junior und Pierce (1995) wieder aufgegriffen worden ist. Ein alternativer, mathematischer Ansatz zur Berechnung der Vorbelastung aus der Drucksetzungskurve wurde von Dawidowski und Koolen (1994) vorgeschlagen.

Für die Ableitung der Vorbelastung aus Bodenkarten wurden verschiedene regressionsanalytische Rechenansätze erarbeitet, die auf einem Algorithmus von Lebert (1989) basieren. Dort wurde die Vorbelastung horizontweise für Ackerböden typischer, bayerischer Bodenlandschaften nach dem Casagrande-Verfahren für die pF-Stufen 1,8 und 2,5 ermittelt (**Abbildung 5**). Für die Auswertung von Bodenkarten der

Maßstäbe 1:25.000 und 1:50.000 wurde dann ein regressionsanalytischer Ansatz zur Berechnung der Vorbelastung erarbeitet, bei dem als Variablen die bodenphysikalischen Originalmessdaten: Lagerungsdichte, Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität, Totwassergehalt, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Gehalt an organischer Substanz und die Scherparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung verwendet wurden. Die Scherparameter wurden im Kastenscherversuch ermittelt (DIN 18137-3, 1997). Sie können grundsätzlich auch im Triaxialtest ermittelt werden (DIN 18137-2, 1990). Dieser Test ist aufwendiger und weniger gebräuchlich.

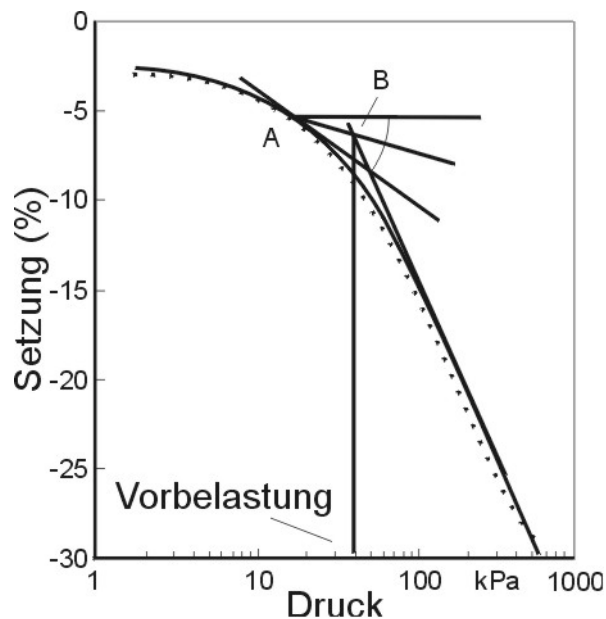


Abbildung 5: Schematische Ermittlung der Vorbelastung nach dem Casagrande-Verfahren.

Bei Schertests ist grundsätzlich zu beachten, dass die Schergeschwindigkeit auf den Scherwiderstand eine große Bedeutung hat. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, sind bei Tests Standards anzuwenden und die Belastungsbedingungen klar zu definieren (Drescher, 2001). Die Schertests wurden unter konsolidiert, undrainierten Bedingungen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 mm/min durchgeführt. Bei der Kartenauswertung sollte bei nicht vorliegenden Originalmessdaten eine Schätzung für die Leitprofile der Polygone vorgenommen werden.

Im ATV-DVWK-Merkblatt 234 (1995) wurden die Gleichungen von Lebert (1989) original übernommen. Damit wurde ein auf der Datenbasis bayerischer Böden erstellter Regressionsansatz für die Anwendung auf die gesamte Bundesrepublik empfohlen. Hennings (2001) stellte fest, dass dieser Ansatz nur sehr eingeschränkt auf Landschaften außerhalb Bayerns übertragen werden konnte. Der damalige DVWK ließ in einem Forschungsvorhaben die Datenbasis durch Beprobung und Analyse weiterer Böden aus typischen deutschen Bodenlandschaften erweitern. Nissen (1999) stellte daraufhin neue Regressionsgleichungen vor, die für die gesamte Bundesrepublik repräsentativer waren. Diese Gleichungen sind im ATV-DVWK-Merkblatt 901 (2002) original enthalten. Parallel zu den Arbeiten zu diesem Merkblatt wurde auf

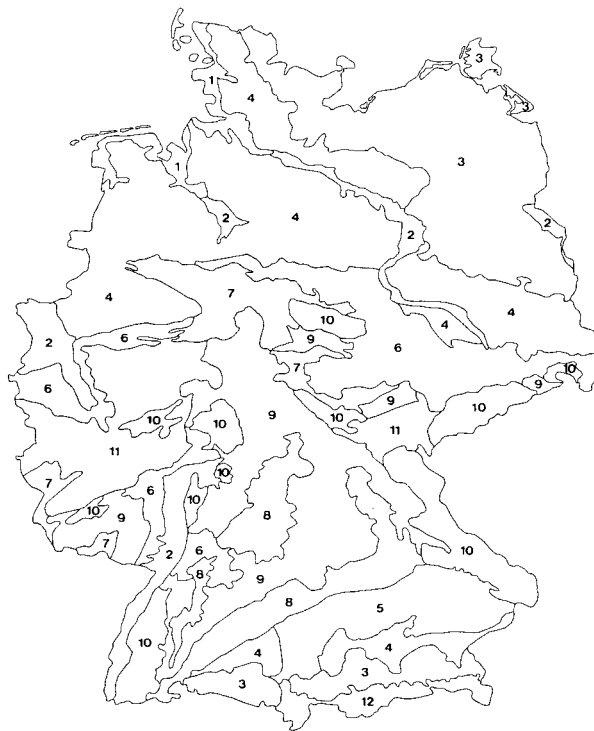
etwa der gleichen Datenbasis (Lebert 1989 und Nissen 1999) die DIN-Vornorm 19688 (2001) erarbeitet. Diese stützt sich im Wesentlichen auf Berechnungen von Hennings (2001), der im Gegensatz zu den Berechnungen von Lebert und Nissen auch Testrechnungen mit ländertypischen Datenbeständen durchführte. Die daraus entstandenen Gleichungen unterscheiden sich von denen aus ATV-DVWK-M-901 durch unterschiedliche Gruppierung von Bodenarten und unterschiedliche Auswahl von Variablen sowie deren Gewichtungen.

4.1.3.2 *Vergleichsberechnungen mit Regressionsansätzen*

Die Angebote drei verschiedener Berechnungsansätze für die Zielgröße „Vorbelastung“ durch den Fachverband ATV-DVWK und das Deutsche Institut für Normung lassen den Anwender fragen, welches Gleichungssystem für seine Fragestellung das geeignete ist. Zu diesem Zweck müssen die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsansätze miteinander verglichen und auf Plausibilität geprüft werden. Eine solche Prüfung wird im Folgenden aufgrund der Aktualität der Thematik sehr ausführlich demonstriert. Sie ist jedoch nur beispielhaft und kann dem Anwender die Prüfung für seine Böden nicht ersetzen.

Vergleichsrechnungen für die Vorbelastungsansätze wurden bisher u. a. von Feldwisch (2000) sowie Schäfer-Landefeld und Brandhuber (2001) durchgeführt. Bei beiden Arbeiten wurden z. T. starke Abweichungen innerhalb der verschiedenen Berechnungsansätze zur Vorbelastung festgestellt. Beide Arbeiten dokumentieren allerdings keine Eingabeparameter, so dass Abweichungen von den Messungen bzw. Differenzen zwischen den Ergebnissen verschiedener Berechnungsmethoden nicht interpretiert werden können. Sie bleiben deshalb für einen Methodenvergleich im Rahmen dieses Vorhabens unberücksichtigt. Darüber hinaus verwendeten Schäfer-Landefeld und Brandhuber als Zielgröße für ihre Berechnungen nicht die Vorbelastung nach Casagrande, sondern ein eigenes Auswerteverfahren.

Für den Vergleich im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine Datenmatrix für Unterbodenhorizonte von Böden aus den typischen deutschen Bodenlandschaften zusammengestellt (**Abbildung 6**).



Nr. Bodenregion

1. Küstenholozän
2. Flusslandschaften
3. Jungmoränenlandschaften
4. Altmoränenlandschaften
5. Deckenschotter und Tertiärhügelländer
6. Lößlandschaften
7. Berg- und Hügelländer/Löß
8. Berg- und Hügelländer/Carbonatgestein
9. Berg- und Hügelländer/Sand-, Schluff-, Ton- und Mergelstein
10. Berg- und Hügelländer/Magmatite, Metamorphite
11. Berg- und Hügelländer/Ton- und Schluffschiefer
12. Alpen

Abbildung 6: Bodenregionen der Bundesrepublik Deutschland (n. KA4, 1994).

Lediglich für Böden der Alpen wurde auf Berechnungen verzichtet. Neben den Originaldaten der Standorte, die von Lebert 1989 und Nissen 1999 übernommen sind, wurden die Daten idealisiert, d.h. nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4, 1994) wurden die Werte für Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität, Totwassergehalt, Gehalt an organischer Substanz und gesättigte Wasserleitfähigkeit und nach den in der DIN-V-19688 abgedruckten Schätztabelle die Werte für Kohäsion und Winkel der inneren Reibung zugeordnet (**Tabelle 12**). Es werden nur Vergleichsberechnungen für die pF-Stufe 1,8 durchgeführt, da der DIN-Ansatz nur diese enthält. Die Gleichungen der verschiedenen Ansätze sind in **Tabelle 13** zusammengefasst.

Die Vorbelastung des Bodens aus dem Küstenholozän wird von allen drei Ansätzen mit hinreichender Genauigkeit geschätzt (**Tabelle 14**). Der Ansatz ATV-DVWK-234 überschätzt bei der Verwendung des idealisierten Datensatzes etwas. Böden des Küstenholozäns kommen allerdings auch nicht in der Grundgesamtheit dieses bayerischen Ansatzes vor. Die DIN-Vornorm überschätzt mit etwa ähnlichem Ausmaß beim Originaldatensatz. Der Grund ist die mit 0 % eingehende Luftkapazität der Originaldaten, welche in der Schätztabelle der KA4 für diese Bodenart bei der entsprechenden Lagerungsdichte mit 7 % angegeben wird. Die Besonderheiten der Gefügebildung mariner Sedimente können in dieser Tabelle der KA 4 nicht vollständig berücksichtigt werden. Beim Auenregosol aus Flusssedimenten schätzt die DIN-Vornorm die Unterbodenstabilität (Cv-Horizont) sehr gut, gefolgt vom Ansatz ATV-DVWK-901.

Tabelle 12: Datenmatrix für Unterbodenhorizonte typischer deutscher Bodenregionen¹.

Bodentyp (Bodenregion)	Ausgangsgestein (Geogr. Lage)	Horizont original idealisiert	Bodenart, Gefüge	dB g/cm ³	LK Vol.-%	nFK Vol.-%	TW Vol.-%	kf cm/s *10 ³	Org Gew.-%	c kPa	phi °	S Gew.-%
Kleimarsch (1. Küstenholozän)	Marines Sediment (Dithmarschen)	SgGo, orig.	Uls, pol	1,54	0	24	17	0,01	0,8	19	30	35
		SgGo, ideal.	Uls, pol	1,54	7	22	12	0,2	0,5	18	35	35
Auenregosol (2. Flusslandschaften)	Flusssediment (Oderbruch)	C(v), orig.	Ss, ein	1,63	34	3	1	13,2	0,1	5	40	99
		C(v), ideal.		1,63	22	11	4	2,7	0,5	8	26	99
		Ap, orig.	SI4, pol	1,72	10	13	11	0,035	3,2	42	32	50
		Ap, ideal.	SI4, ein	1,72	6	15	13	0,14	3	8	26	50
Fahlerde (3. Jungmoräne)	Geschiebelehm/Weichsel (Brandenburg)	Ael, orig.	Su3, sub	1,7	17	12	6	0,75	0,4	6	41	60
		Ael, ideal.	Su3, ein	1,7	8	19	8	0,21	0,5	8	26	60
Braunerde-Pararendzina (3. Jungmoräne)	Geschiebemergel/Würm (Bayer. Alpenvorland)	BvCv, orig.	Lt3, pla-pol	1,59	0	10	29	0,0001	1,3	34	26	22
		BvCv, ideal.	Lt3, pol	1,59	3	11	25	0,08	1,5	30	36	22
Parabraunerde (4. Altmoräne)	Geschiebemergel/Saale (Sachsen-Anhalt)	Al, orig.	SI3, pol	1,9	7	14	6	0,1	0,2	24	41	70
		Al, ideal.	SI3, pol	1,9	7	16	4	0,2	0,5	8	30	70
		Bt, orig.	Lts, pol	1,68	2	7	26	0,06	0,4	33	30	43
		Bt, ideal.	Lts, pol	1,68	3	10	22	0,06	0,5	19	30	43
Braunerde (5. Tertiärhügelland)	Süßwassermolasse (Südlich der Donau)	Bv, orig.	SI2, ein	1,62	16	15	7	0,46	0,5	21	41	83
		Bv, ideal.	SI2, ein	1,62	15	17	6	0,76	0,5	8	30	83
		Bv, orig.	SI2, ein	1,49	20	12	9	0,83	0,4	13	40	81
		Bv, ideal.	SI2, ein	1,49	20	14	9	0,76	0,5	8	30	81
		Bv, ideal.	SI2, ein	1,49	20	14	9	0,76	0,5	8	30	81

¹ (dB = Lagerungsdichte, LK = Luftkapazität (Bezug: pF 1,8), nFK = nutzbare Feldkapazität (Bezug: pF 1,8), TW = Totwassergehalt, kf = gesättigte Wasserleitfähigkeit, Org = Gehalt an organischer Substanz, c = Kohäsion, phi = Winkel der inneren Reibung, S = Sandgehalt)

Bodentyp (Bodenregion)	Ausgangsgestein (Geogr. Lage)	Horizont original idealisiert	Bodenart, Gefüge	dB g/cm³	LK Vol.-%	nFK Vol.-%	TW Vol.-%	kf cm/s *10 ³	Org Gew.-%	c kPa	phi °	S Gew.-%
Pseudogley-Parabraunerde (6. Lößlandschaften)	Löß (Hildesheimer Börde)	SBt, orig. SBt, ideal.	Ut4, koh Ut4, koh	1,57 1,57	5 5	21 21	15 15	0,43 0,09	0,4 0,5	11 12	33 35	3 3
Tschernosem (6. Lößlandschaften)	Löß (Magdeburger Börde)	Ah, orig. Ah, ideal.	Ut4, pla-kru Ut4, pri	1,41 1,41	7 9	21 22	19 16	0,07 0,4	4 3	19 12	30 35	5 5
Tschernosemartige Pseudo- gley-Braunerde (6. Lößlandschaften)	Löß (Nördl. Erdinger Moos)	BvAh, orig. BvAh, ideal.	Tu4, sub Tu4, sub	1,62 1,62	3 3	13 15	22 20	0,79 0,2	1,6 1,5	28 45	36 36	9 9
Parabraunerde (7. Bergvorländer)	Löß (Harzvorland)	Al, orig. Al, ideal.	Ut3, koh Ut3, koh	1,56 1,56	5 5	17 24	19 12	2,4 0,09	0,8 0,5	12 12	30 35	12 12
Pararendzina (8. Berg- u. Hügelländer, länder, Carbonatgestein)	Juradecklehm/Hang- fließerde (Fränkische Alb)	eCv, orig. eCv, ideal. eCv, orig. eCv, ideal.	Tu3, pol-pla Tu3, pol Tu3, pol Tu3, pol	1,69 1,69 1,43 1,43	0 3 9 6	8 7 13 15	28 26 24 25	0,15 0,02 0,06 0,2	3,4 3 2,6 3	42 40 36 40	28 30 22 30	9 9 6 6
Braunerde (8. Berg- und Hügelländer, Carbonatgestein)	Juradecklehm (Fränkische Alb)	Bv, orig. Bv, ideal. Bv, orig. Bv, ideal.	Ut4, pol-pla Ut4, pri Ut3, pol Ut3, pri	1,66 1,66 1,49 1,49	2 2 20 5	11 17 19 24	25 19 4 15	0,05 0,03 1 0,09	1,3 1,5 23 0,5	37 12 32 12	34 35 4 35	3 3 4
Pelosol (9. Berg- u. Hügelländer, Sand-, Schluff-, Ton- u. Mergelsteine)	Opalinuston (Fränkisches Albvorland)	P, orig. P, ideal.	Tu3, pol-koh Tu3, pol	1,6 1,6	3 4	12 11	26 26	0,12 0,12	1,6 1,5	46 40	30 30	18 18
(9. Berg- u. Hügelländer, Sand-, Schluff-, Ton- u.	Lettenkeuper (Bayer. Schichtstufen-	Bv, orig. Bv, ideal.	Ls3, pri-pol Ls3, pri	1,53 1,53	13 9	15 15	14 18	1,6 0,08	0,7 0,5	21 10	37 25	54 54

Bodentyp (Bodenregion)	Ausgangsgestein (Geogr. Lage)	Horizont original idealisiert	Bodenart, Gefüge	dB g/cm³	LK Vol.-%	nFK Vol.-%	TW Vol.-%	kf cm/s *10 ³	Org Gew.-%	c kPa	phi °	S Gew.-%
Mergelsteine)	Land)											
Braunerde (10. Berg- u. Hügelländer, Magmatiten u. Metamor- phiten)	Silikatverwitterung (Bayerischer Wald)	Bv, orig. Bv, ideal.	Lt2, pol Lt2, pol	1,53 1,53	1 5	21 13	21 25	1,7 0,08	0,7 0,5	30 30	36 36	32 32
Braunerde (11. Berg- u. Hügelländer, Ton- u. Schluffschiefer)	Tonschiefer (Vogtland)	Bv, orig. Bv, ideal.	Lt2, sub-pol Lt2, sub-pol	1,15 1,15	16 11	15 17	24 28	1,7 0,1	2,1 3	38 37	38 37	29 29

Tabelle 13: Übersicht der Gleichungen zur Berechnung der Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 der drei Vergleichsansätze (Kürzel und Dimensionen s. Tabelle 12).

Modellansatz	Bodenarten (KA4)	Gleichungen Pv =
ATV-DVWK-M-234	Ss, Su, Slu, Sl, St2	$438,10 \text{ (dB)} - 0,0008 (\phi)^3 - 3,14 \text{ (TW)} - 0,11 (\text{nFK})^2 - 465,60$ (7)
	St3, Ls	$169,30 \text{ (dB)} - 29,03 (\text{org})^{0,5} + 6,45 \text{ kf} + 32,18 \log (c) - 9,44 (\phi) + 27,25 \sin (TW) + 119,74 \log (\text{nFK}) + 19,51$ (8)
	Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3	$374,15 \text{ (dB)} - 4,10 (\text{org}) + 3,38 \text{ (LK)} - 1,58 (\text{kf})^{-0,5} + 1,79 (c) + 1,09 \text{ (TW)} - 6,37 (\phi)^{0,67} + 0,088 (\text{nFK})^2 - 472,77$ (9)
	Lu, Ut4, Lt2, Ts4	$10^{(0,843 \text{ (dB)} - 0,544 (\text{kf})^{0,33} - 0,022 \text{ (TW)} + 7,03 (c)^{-1} + 0,024 (\phi) - 0,015 (\text{nFK}) + 0,725)}$ (10)
	Lt3, Tu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, Tt	$4,59 \text{ (dB)} - 1,02 (\text{org}) - 16,43 (\text{kf})^{0,33} + 0,31 \text{ (TW)} - 1,57 (\text{nFK}) + 3,55 (c) + 1,18 (\phi) - 18,03$ (11)
DIN-V-19688	Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Slu, Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3	$69,5 \text{ (dB)} - 13,3 (\text{org}) - 23,3 \text{ (LK)}^{0,5} + 1,45 (c) + 0,085 (\phi)^2 - 56,6$ (12)
	Ss, Sl4, St2, Ut4, Ls2, Ls3, Ls4, Lu, Tu4	$119,9 \text{ (dB)} - 10,1 (\text{org}) - 12,6 \text{ (TW)}^{0,5} + 11,1 (c)^{0,5} - 78,9$ (13)
	St3, Lt2, Lt3, Lts, Ts2, Ts3, Ts4, Tu2, Tu3, Tl, Tt	$-42,7 \text{ (dB)} - 20,7 (\text{org})^{0,5} - 14,2 (\text{nFK})^{0,5} - 20,8 \text{ (LK)}^{0,5} + 5,17 (\phi)^{0,5} + 1,23 (c)^{0,5} + 231$ (14)
ATV-DVWK-M-901	S und U	$68,0 \text{ (dB)} - 3,09 \text{ (TW)} - 32,2 (\text{org})^{0,67} - 0,64 (S) + 13,7 (c)^{0,5} + 35,0$ (15)
	L und T	$(6,20 \text{ (dB)} + 0,284 (\text{nFK}) + 0,260 \text{ (TW)} - 0,597 (\text{org}) + 0,049 (S) - 11,2)^2$ (16)

Der Ansatz ATV-DVWK-234 überschätzt hier die Vorbelastung sehr stark, da in der Gleichung für diese Bodenart die Lagerungsdichte sehr hoch gewichtet ist und die relativ hohe Lagerungsdichte dieses Standorts zu einer entsprechend hohen Vorbelastung führt. Standorte der Flusslandschaften sind allerdings in der Grundgesamtheit dieses Ansatzes auch nicht enthalten. Beim hier zusätzlich aufgeführten Oberboden-Horizont (Ap) schätzt die DIN-Vornorm mit den Originaldaten sehr gut, mit den idealisierten Daten unterschätzt sie jedoch stark.

Der Grund dafür ist die hohe Kohäsion des Standorts, die auch in einer polyedrischen Gefügebrausprägung zum Ausdruck kommt. Diese Gefügebrausprägung ist für die Bodenart Sl4 ungewöhnlich und kommt deshalb in den DIN-Schätztabellen nicht vor. Deshalb wird die gefügebrausprägungsbedingte Stabilität des Bodens im idealisierten Datensatz nicht erkannt.

Die Bodenregion der Jungmoränenlandschaften ist durch jeweils einen typischen Boden aus weichsel- und würmzeitlichen Geschieben vertreten. Die Vorbelastung des Ael-Horizontes der weichselzeitlichen Fahlerde wird von ATV-DVWK-234 infolge der hohen Lagerungsdichte weit überschätzt. Solche Böden gehen aber dort auch nicht in die Grundgesamtheit ein. Die beiden anderen Ansätze schätzen die Vorbelastung dieses Standortes erheblich genauer. Die Schätzungen für die Braunerde-Pararendzina aus Würmmoräne sind im ATV-DVWK-234 Ansatz sehr gut. Dieser Standort gehört auch zu dessen Grundgesamtheit.

Die DIN-Vornorm schätzt mit den Originaldaten ebenfalls sehr gut, beim idealisierten Datensatz wird allerdings etwas unterschätzt. Grund dafür ist die Luftkapazität, die im Originalboden 0 % beträgt und in den Tabellen der KA4 aber mit 3 % angegeben ist. Das Schätzergebnis ist aber auch beim idealisierten Standort noch akzeptabel. Der Ansatz ATV-DVWK-901 unterschätzt in beiden Fällen, original und idealisiert, sehr stark. In den Gleichungen für die vorliegende Bodenart kommen die Scherparameter nicht vor, so dass eine gefügebildungsbedingte, hohe Stabilität bei vergleichsweise geringer Lagerungsdichte nicht erfasst werden kann.

Tabelle 14: Gemessene und geschätzte Vorbelastungen (Pv) der Vergleichsstandorte (pF 1,8).

Bodentyp (Bodenregion)	Ausgangsgestein (Geogr. Lage)	Horizont	Pv Mess- wert (kPa)	Pv ATV- DVWK- 234 (kPa)	Pv DIN-V- 19688 (kPa)	Pv ATV- DVWK- 901 (kPa)
Kleimarsch (1. Küstenholozän)	Marines Sediment (Dithmarschen)	SgGo, orig. SgGo, ideal.	110 110	126 141	144 112	97 118
Auenregosol (2. Flußlandschaften)	Flußsediment (Oderbruch)	C(v), orig. C(v), ideal. Ap, orig. Ap, ideal.	120 120 80 80	193 209 209 208	126 116 95 35	103 89 105 52
Fahlerde (3. Jungmoräne)	Geschiebelehm/ Weichsel (Brandenburg)	Ael, orig. Ael, ideal.	90 90	189 200	112 78	110 106
Braunerde- Pararendzina (3. Jungmoräne)	Geschiebemergel/ Würm (Bayr. Alpenvorland)	BvCv, orig. BvCv, ideal.	125 125	132 120	128 92	87 72
Parabraunerde (4. Altmoräne)	Geschiebemergel/ Saale (Sachsen-Anhalt)	Al, orig. Al, ideal. Bt, orig. Bt, ideal.	100 100 60 60	271 304 132 77	189 95 115 97	157 126 97 92
Braunerde (5. Tertiärhügelland)	Süßwassermolasse (Südlich der Donau)	Bv, orig. Bv, ideal. Bv, orig. Bv, ideal.	170 170 80 80	142 172 92 116	129 47 92 24	113 92 89 75
Pseudogley-Parabraun- erde (6. Lößlandschaften)	Löß (Hildesheimer börde)	SBt, orig. SBt, ideal.	150 150	265 385	92 93	121 121
Tschernosem (6. Lößlandschaften)	Löß (Magdeb. Börde)	Ah, orig. Ah, ideal.	70 70	88 84	42 47	48 59
Tschernosemartige Pseudogley-Braunerde (6. Lößlandschaften)	Lößlehm (Erdinger Alt- Moräne)	BvAh, orig. BvAh, ideal.	140 140	101 163	97 117	60 62
Parabraunerde (7. Bergvorländer)	Löß (Harzvorland)	Al, orig. Al, ideal.	100 100	130 138	83 115	94 123
Pararendzina (8. Berg- und Hügel- länder, Carbonatge- stein)	Juradecklehm/ Hangfließerde (Fränk. Alb)	eCv, orig. eCv, ideal. eCv, orig. eCv, ideal.	160 160 135 135	156 157 120 137	116 85 55 64	52 45 40 48

Bodentyp (Bodenregion)	Ausgangsgestein (Geogr. Lage)	Horizont	Pv Mess- wert (kPa)	Pv ATV- DVWK- 234 (kPa)	Pv DIN-V- 19688 (kPa)	Pv ATV- DVWK- 901 (kPa)
Braunerde (8. Berg- und Hügelländer, Carbonatgestein)	Juradecklehm (Fränk. Alb)	Bv, orig.	190	180	160	114
		Bv, ideal.	190	139	127	93
		Bv, orig.	135	130	87	109
		Bv, ideal.	135	115	83	115
Pelosol (9. Berg- und Hügelländer, Sand-, Schluff-, Ton- und Mergelsteine)	Opalinuston (Fränk. Albvorland)	P, orig.	98	167	88	78
		P, ideal.	98	148	85	74
Braunerde (9. Berg- und Hügelländer, Sand-, Schluff-, Ton- und Mergelsteine)	Lettenkeuper (Bayr. Schichtstufenland)	Bv, orig.	125	105	100	71
		Bv, ideal.	125	204	80	92
Braunerde (10. Berg- und Hügelländer, Magmatiten und Metamorphiten)	Silikatverwitterung (Bayr. Wald)	Bv, orig.	95	49	100	118
		Bv, ideal.	95	136	91	95
Braunerde (11. Berg- und Hügelländer, Ton- und Schluff-schiefer)	Tonschiefer (Vogtland)	Bv, orig.	110	25	53	44
		Bv, ideal.	110	45	57	59

Bei der Parabraunerde aus saalezeitlichem Geschiebemergel der Altmoränenlandschaften überschätzt der Ansatz ATV-DVWK-234 erneut stark. Geschiebemergelstandorte aus Grundmoräne kommen dort ebenfalls nicht in der Grundgesamtheit vor. Die der Bodenart des AL-Horizontes zugrunde liegenden Gleichungen (SI) dieses Ansatzes basieren ausschließlich auf Standorten mit fluviatilen oder äolisch abgelagerten Sanden. Geschiebesande sind im Vergleich zu diesen viel dichter gelagert, so dass hier eine starke Überschätzung der Vorbelastung (Faktor 3) erfolgt. Ein ähnlicher Effekt ergibt sich für den Bt-Horizont, der die Bodenart Lts aufweist. Die Gleichungen für diese Körnungsgruppe wurden im genannten Ansatz nur für Verwitterungsböden, Böden aus Sedimentgesteinen oder Würmmoränen mit deutlich geringerer Dichtlagerung erstellt. Geschiebegrundmoränen der Saalezeit sind nicht enthalten.

Dadurch erfolgt auch hier zumindest für die Originaldaten eine deutliche Vorbelastungsüberschätzung. Die anderen beiden Ansätze schätzen für diesen Standort genauer, insbesondere bei den idealisierten Datensätzen. Dennoch ist auch hier ein Trend zur Überschätzung zu erkennen. Die Ursache dürfte wohl darin liegen, dass die Daten der dicht gelagerten Geschiebeböden mit denen lockerer gelagerter Sedimentböden gleicher Körnung gemeinsam in einer Regression verrechnet wurden.

Für den Standort aus dem Tertiärhügelland (Braunerde aus Oberer Süßwassermolasse) ist die Schätzung von ATV-DVWK-234 relativ genau. Dieser Standort ist dort auch in der Grundgesamtheit enthalten. Die DIN-Vornorm unterschätzt sehr stark beim idealisierten Datensatz. Ursache ist die gegenüber dem Originaldatensatz deutlich verringerte Scherfestigkeit, die in den Regressionsgleichungen relativ hoch gewichtet sind. Die DIN-Schätztabelle kann die Besonderheiten des schwach lösshaltigen und schwach kiesigen Molassebodens gegenüber den durchschnittlichen Böden dieser Körnungsgruppe nicht berücksichtigen. Der Ansatz ATV-DVWK-901 schätzt den locker gelagerten Horizont sehr exakt, unterschätzt aber die dichter gelagerte Pflugsohlenvariante mit beiden Datensätzen. Der Grund hierfür liegt möglicherweise in einer zu geringen Gewichtung der Lagerungsdichte dieser Körnungsgruppe, da für Sande und Schluffe eine gemeinsame Regressionsgleichung gebildet wurde.

In den anderen beiden Ansätzen sind Sande und Schluffe klarer voneinander getrennt, da Schluffe in der Regel einen stärkeren gefügebildungsbedingten Stabilitätsanteil haben, der die Bedeutung der Lagerungsdichte stärker in den Hintergrund treten lässt.

Die Lößlandschaften sind inklusive der lößlehmbedeckten Bergvorländer mit 4 Standorten im Vergleich vertreten. Bei der Pseudogley-Parabraunerde aus der Hildesheimer Börde kommt es durch ATV-DVWK-234 zu einer starken Überschätzung der Vorbelastung, während die anderen beiden Ansätze ein erheblich genaueres Ergebnis liefern. Die Überschätzung kommt dadurch zustande, dass die Bodenart Ut4 vom ATV-DVWK-234 in die ursprüngliche Gruppe der Tone und tonigen Lehme mit <35 % Ton nach Lebert (1989) eingestuft wurde. In der Originalarbeit von Lebert gehört diese Bodenart in die Gruppe der Schluffe und dort würde eine sehr genaue Schätzung von 137 bzw. 133 kPa vorgenommen werden.

Warum diese Umgruppierung vorgenommen wurde, ist nicht nachzuvollziehen. Offenbar wurde auch keine Vergleichsrechnung durchgeführt. Ein weiteres Problem bei der Verwendung der o. g. Gleichung tritt durch den Vergleich des originalen und idealisierten Datensatzes auf. Bis auf den k_f -Wert sind beide Datensätze fast identisch. Der große Unterschied von 125 kPa resultiert allein aus dem k_f -Unterschied, wodurch klar wird, dass diese Gleichung des ATV-DVWK-234-Ansatzes problematisch ist, denn derart genaue k_f -Wertschätzungen sind kaum möglich (s. Tabelle 13).

Beim Tschernosem aus Löß der Magdeburger Börde liegt ebenfalls die Bodenart Ut4 vor. DIN-Vornorm und ATV-DVWK-901 erkennen die relativ geringe Vorbelastung gut, während ATV-DVWK-234 erneut aus den o.g. Gründen stark überschätzt, insbesondere beim idealisierten Datensatz. Mit der originalen Einordnung dieser Bodenart zur Gleichung für Schluffe nach Lebert (1989) wäre das Schätzergebnis mit 88 bzw. 84 kPa sehr gut.

Die tschernosemartige Pseudogley-Braunerde der lößlehmbedeckten Erdinger Altmoräne wird von den Ansätzen nach ATV-DVWK-234 und DIN-Vornorm relativ gut geschätzt, während der Ansatz nach ATV-DVWK-901 stark unterschätzt. Diese Unterschätzung ist auf die bereits erwähnte Nicht-Berücksichtigung der Scherfestigkeit

in der entsprechenden Gleichung zurückzuführen. Die Vorbelastung der Löß-Parabraunerde aus dem Harzvorland wird schließlich von allen drei Ansätzen zufriedenstellend geschätzt.

Für die Pararendzina und die Braunerde aus Juradecklehm ergeben sich mit dem Ansatz von ATV-DVWK-234 sehr genaue Schätzungen. Beide Standorte stammen aber auch aus dessen Grundgesamtheit. Die beiden anderen Ansätze neigen bei diesen Standorten zum Unterschätzen der Vorbelastung, insbesondere im Falle der carbonathaltigen Pararendzina. Beim ATV-DVWK-Ansatz 901 liegen die Gründe dafür erneut in der Nicht-Berücksichtigung der Scherparameter. Beim DIN-Ansatz werden diese zwar berücksichtigt, aber die mechanischen Verhältnisse der carbonatischen Böden werden offenbar durch die Gleichung nicht exakt genug repräsentiert. Beim carbonatfreien Juradecklehm ist die Vorhersagegenauigkeit der DIN-Vornorm besser.

Beim Pelosol aus Tongestein (Opalinuston) ist die Vorhersagegenauigkeit der DIN-Vornorm sehr hoch. Auch ATV-DVWK-901 schätzt zufriedenstellend. ATV-DVWK-234 überschätzt, obwohl der Standort aus dessen Grundgesamtheit stammt. Der Grund dafür dürfte darin liegen, dass dieser Standort verglichen mit seiner sehr hohen Scherfestigkeit und für Böden dieser Körnungsgruppe relativ hohen Lagerungsdichte eine vergleichsweise niedrige Vorbelastung aufweist, so dass die üblichen Zusammenhänge zwischen den Parametern dieser Bodenartengruppe hier nicht zutreffen.

Die Vorbelastung der Braunerde aus Lettenkeuper wird mit dem Originaldatensatz von ATV-DVWK-234 und DIN-Vornorm sehr gut geschätzt, von ATV-DVWK 901 aber deutlich unterschätzt. Auch hier spielt wieder die Nicht-Berücksichtigung der Scherparameter bei der entsprechenden Gleichung eine Rolle. Beim idealisierten Datensatz ist das Schätzergebnis deutlich besser, trotz geringer Unterschiede bei den Eingangsgrößen. Infolge des Quadrierens der Variablen zur Vorbelastungsberechnung (s. Tabelle 13) werden mit dieser Gleichung geringe Parameterunterschiede erheblich verstärkt. Der Ansatz ATV-DVWK-901 liefert bei diesem Boden für den idealisierten Datensatz eine deutliche Überschätzung gegenüber den Originaldaten. Die Ursache dafür liegt in der negativen Gewichtung des Winkels der inneren Reibung der entsprechenden Gleichung, der im idealisierten Datensatz niedriger geschätzt ist, wodurch die Vorbelastung weniger stark reduziert wird. Die exaktere Schätzung für diesen Boden liefert insgesamt die DIN-Vornorm.

Gleiches gilt für die Braunerde aus Silikatverwitterung der magmatitischen Grundgebirge, wo durch die DIN-Vornorm sowohl mit dem originalen als auch mit dem idealisierten Datensatz die exaktesten Schätzungen erfolgen. ATV-DVWK-901 schätzt für diesen Standort ebenfalls recht exakt, wohingegen ATV-DVWK-234 mit dem originalen Datensatz stark unter- und mit den idealisierten Daten stark überschätzt. Grund für diesen Sachverhalt ist, dass Variationen bei der Variablenschätzung mit der 10-ten Potenz in diese Gleichung eingehen. Dadurch wird die Gleichung äußerst sensibel für eine exakte Parameterbestimmung.

Für den Standort aus verwittertem Tonschiefer unterschätzen alle Ansätze die Vorbelastung. Bei diesem Standort liegt allerdings eine außergewöhnlich niedrige Lagerungsdichte vor, so dass für Standorte dieser Art wohl gesonderte Gleichungen verwendet werden müssten.

Vorläufiges Fazit

Der durchgeführte Vergleich und die daraus abzuleitenden Folgerungen können nicht abschließend sein, da aus den ackerbaulich genutzten Bodenregionen Deutschlands in der Regel nur ein und im Ausnahmefall bis zu 4 Standorte für den Vergleich herangezogen wurden. Es deuten sich jedoch Trends an (**Abbildung 7 und Abbildung 8**), die zu einem vorläufigen Fazit zusammengefasst werden.

Der Ansatz von ATV-DVWK-234 neigt stark zum Überschätzen der Vorbelastung für diejenigen Regionen, die nicht der Grundgesamtheit der Böden dieses Ansatzes entsprechen. Böden des Küstenholzäns oder weichsel- und saalezeitliche Geschiebeböden kommen in dem bayerischen Ansatz auch nicht vor. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ausführungen von Hennings (2001).

Ein weiterer Grund für sehr ungenaue Schätzungen mit diesem Ansatz liegt darin, dass im Merkblatt ATV-DVWK-234 die Zuordnung der Bodenarten zu den Gleichungen gegenüber der Originalarbeit von Lebert (1989) verändert wurde. Man hätte bei veränderten Zuordnungen auch neue Regressionsgleichungen erstellen müssen, so wie es im DIN-Ansatz geschehen ist.

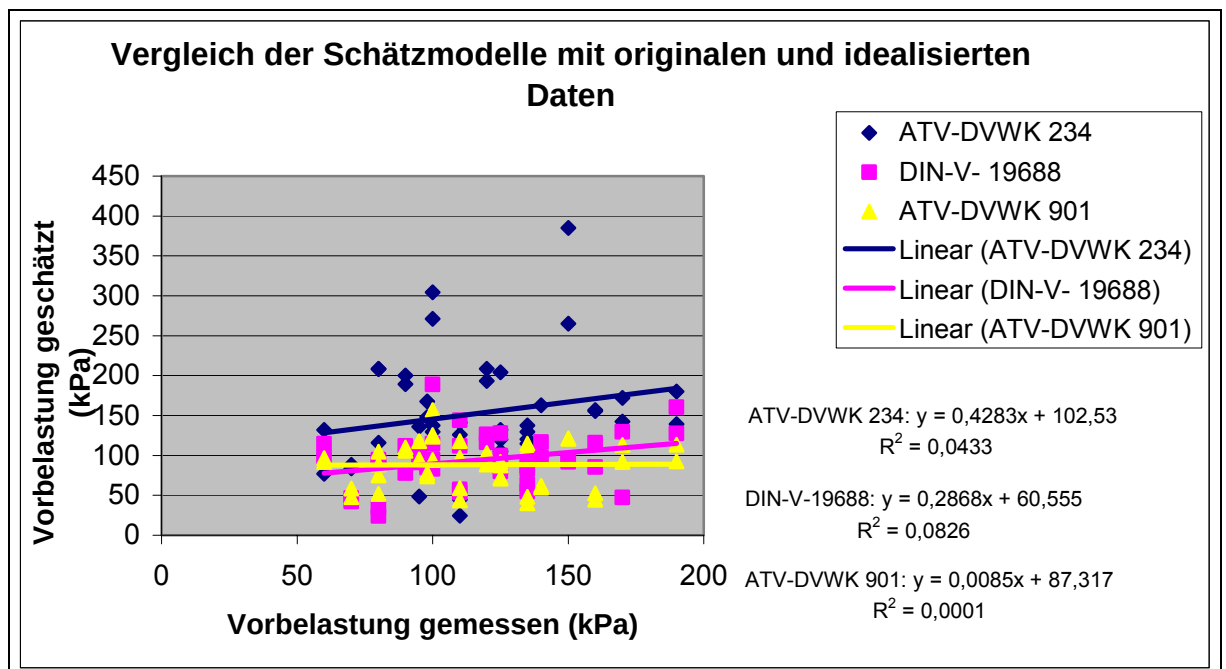


Abbildung 7: Vergleich der Schätzmodelle für die Vorbelastung mit originalen und idealisierten Variablen.

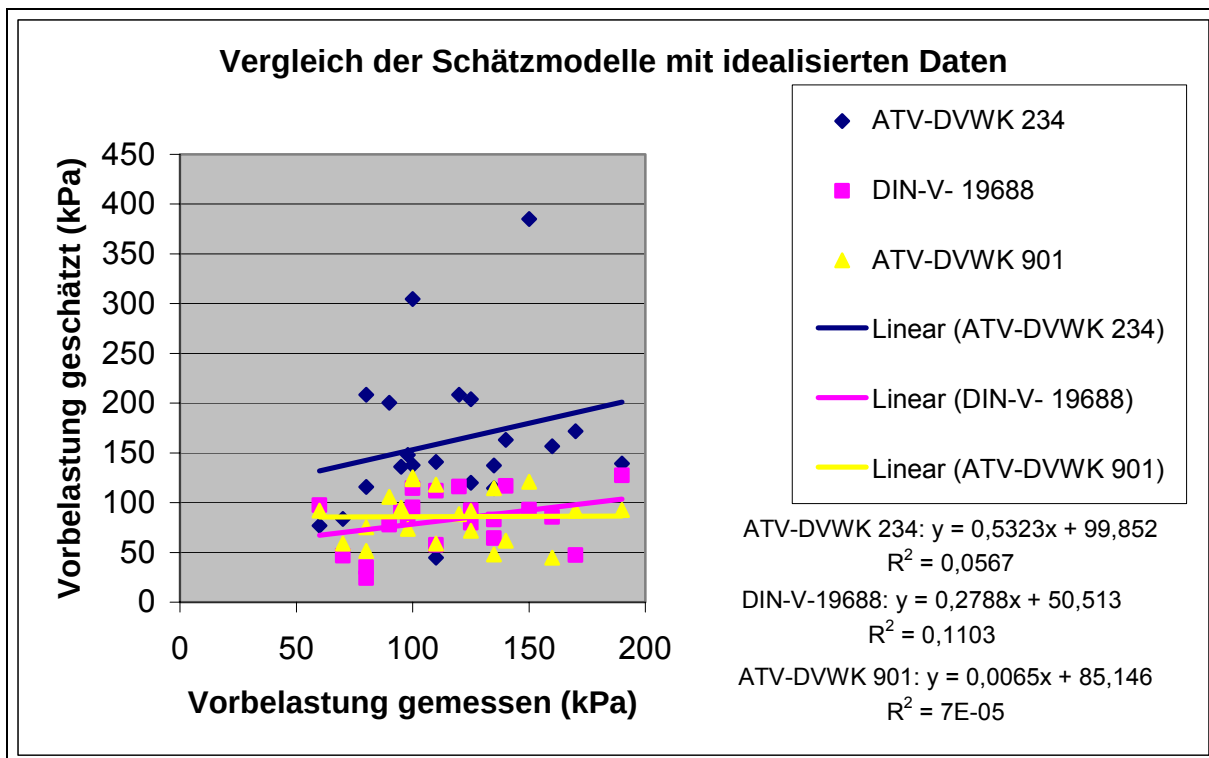


Abbildung 8: Vergleich der Schätzmodelle für die Vorbelastung nur mit idealisierten Variablen.

Bei der Verwendung des Ansatzes ATV-DVWK-234 für die gesamten Bodenregionen Deutschlands ist aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse größte Sorgfalt anzuwenden. Dieser Ansatz ist auch in das EU-Modell SIDASS integriert, welches dazu verwendet wird, die Vorbelastungen für Bodenregionen Deutschlands zu berechnen und, daraus abgeleitet, weitergehende bodenkundliche Rückschlüsse, z.B. auf die Luftleitfähigkeit, zu ziehen (Horn et al., 2002).

Die insgesamt höchsten Vorhersagegenauigkeiten und die geringsten Differenzen zwischen den Vorhersagen auf Basis der vorliegenden Originaldaten und idealisierten Daten ergeben sich bei Verwendung der DIN-Vornorm 19688. Dieses Ergebnis war auch zu erwarten, da die DIN-Vornorm als einziger Ansatz auf die Verwendung von bundesweit idealisierten Leitprofilen abgestimmt worden ist.

Zum starken Unterschätzen neigt bei den vorliegenden Datensätzen der Ansatz ATV-DVWK-901. Der Grund dafür liegt in der Nicht-Berücksichtigung der Scherparameter in der Gleichung für Tone und Lehme, also den Bodenarten, bei denen sich durch starke Aggregierungsprozesse eine hohe gefügebedingte Stabilität auch bei geringer Lagerungsdichte entwickeln kann. Dieser Sachverhalt wurde in zahlreichen Publikationen der Arbeitsgruppe Horn beschrieben und nachgewiesen (Horn, 1981; Lebert und Horn, 1992; Horn, 1990; Horn, 1993; Horn et al., 2002, u.v.m.). Auch im Ansatz ATV-DVWK-234 wird darauf hingewiesen, wie wichtig Gefügebildungsprozesse für die Vorbelastung sind. Die Verwendung von Gleichungen ohne Gefügebezug im neuen ATV-DVWK-Merkblatt 901 für diese Bodenarten ist deshalb überraschend.

Die höchste Vorhersagegenauigkeit sowohl für die originalen als auch für die idealisierten Datensätze liefert im vorliegenden Test die DIN-Vornorm. Das Bestimmtheitsmaß ist dennoch gering, die getestete Stichprobe ist aber auch nicht groß und deckt die Bandbreite der regional verschiedenen Böden auch innerhalb der gleichen Bodenregion bei weitem nicht ab. Trotz der Vorläufigkeit des Fazits, macht das Ergebnis deutlich, dass die Regressionsansätze vor einer Verwendung im Bodenschutzvollzug einer Validierung unterzogen werden müssen. Grundsätzlich ist für solche Prüfungen zu betonen, dass sie sich nicht auf den rein statistischen Vergleich beschränken sollten. Abweichungen zwischen den Prognosen sollten auch erklärt werden und die Vergleichsberechnungen transparent sein.

4.1.3.3 *Druckbelastbarkeit nach KUL*

Im Konzept „KUL“ (Kriterien für umweltverträgliche Landwirtschaft) der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Eckert et al., 1999) wird die bodentypische Druckbelastbarkeit ebenso wie im Vorbelastungskonzept in der Dimension (kPa) beschrieben (Werner und Paul, 1999). Sie gibt einen Grenzwert für den maximalen, vertikalen Bodendruck im Ödometertest an, bei dem sich an ungestörten Proben aus dem Oberboden eine Luftkapazität von 8 Vol.-% und aus dem Unterboden von 5 Vol.-% einstellt. Die Versuchsbedingungen im Ödometertest sind die gleichen, wie bei der Ermittlung der Vorbelastung. Bezugsfeuchte ist pF 2,5.

Die Druckbelastbarkeit nach KUL kann jedoch auch höher oder geringer sein als die Vorbelastung, da zu ihrer Bestimmung neben der Drucksetzungskurve auch die Luftkapazität und damit eine Bodenfunktion berücksichtigt wird. Grundlage für diese Bewertung sind zum einen Regressionsgleichungen oder Nomogramme für die Abnahme der Luftkapazität mit steigendem Ödometerdruck im Erstverdichtungsbereich (ATV-DVWK Merkblatt 235, 1995; Lebert, 1989, **Abbildung 9**). Zum anderen werden die Bewertungen aber auch mithilfe von eigens entwickelten Algorithmen durchgeführt (Paul, 2002, mündl. Mitteilung). Es werden nicht nur Ödometerkurven für verschiedene Bodenarten, sondern auch für verschiedene Gefügeformen bei gleicher Bodenart berücksichtigt.

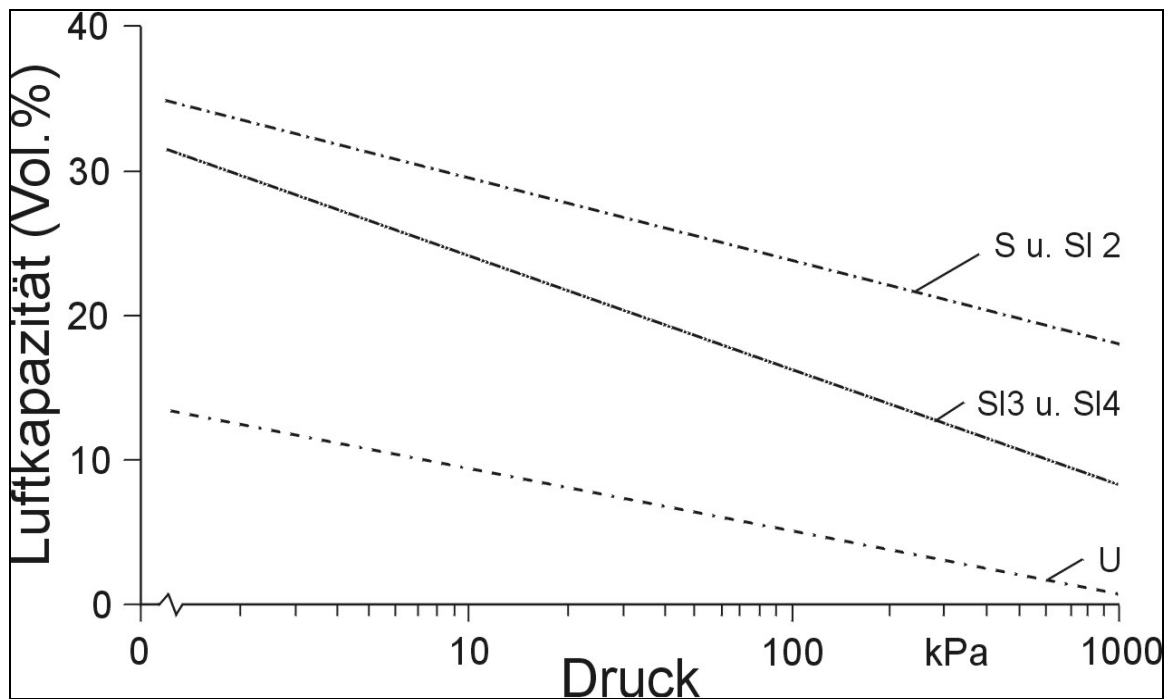


Abbildung 9: Beispiel für ein Nomogramm zur Abnahme der Luftkapazität ungestörter Bodenproben mit steigendem Druck im Ödometertest für den Erstverdichtungsbereich verschiedener Bodenartengruppen bei pF 2,5 (nach Lebert, 1989).

Die für den Unterboden angenommene Schadensschwelle von 5 Vol.-% Luftkapazität ist identisch mit der in diesem Vorhaben vorgeschlagenen Schadensschwelle für die Identifikation einer Bodenschadverdichtung. Mithilfe eines bodenkundlichen Fachinformationssystems ist die Druckbelastbarkeit in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Bodengefüge über die Auswertungsalgorithmen grundsätzlich auch kartografisch darstellbar.

4.1.3.4 Schadverdichtungsgefährdungsklassen nach ZALF

Im Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ (SVGK) nach Petelkau et al. (2000) wird die bodentypische Druckstabilität in Abhängigkeit von der Bodenart in 5 Klassen von gering = 1 bis sehr stark = 5 eingeteilt. Die Klasseneinteilung erfolgt in Anlehnung an eine Einteilung der Bodenarten in sogenannte technologische Vergleichsstufen nach Thiere et al. (1991). Grundlage für diese Einteilung ist die Bearbeitbarkeit bzw. die Bewirtschaftungseignung der Böden. Nach Kriterien wie Zugkraftbedarf, Bindigkeit, Festigkeit, Klebkraft und Zerfallsbereitschaft wird bei den technologischen Vergleichsstufen eine Klassifizierung der Bearbeitbarkeit erstellt, die von sehr leicht bis sehr schwer reicht.

Im Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ wird nun der Umkehrschluss geführt, nämlich dass sehr schwer bearbeitbare Böden einen hohen Verformungswiderstand und damit eine hohe mechanische Belastbarkeit haben. Sehr leicht bearbeitbare Böden haben dementsprechend eine geringe Belastbarkeit und sind verdichtungsanfälliger. Aus dieser Überlegung ergab sich die in **Abbildung 11** darge-

stellte Zuordnung der Bodenarten in Schadverdichtungsgefährdungsklassen. Bezugsbasis für die Bodenartengrenzen war zunächst TGL 24 300. Bei einer Übertragung auf die jetzt gültige Klassifikation der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4, 1994) werden die ursprünglichen Bodenartengruppen z. T. durchschnitten, wodurch im Zweifelsfall eine Zuordnung durch Schätzung oder Hinzunahme von Analysendaten erfolgen muss.

Überprüft wurde die Klasseneinteilung anhand von 2 Kriterien:

einem pflanzenbaulich ermittelten Lagerungsdichtegrenzwert und einer Drucksetzungskurve aus einem selbst entwickelten Kompressions-Schertest (Petelkau et al., 1988). Dieser Test ist dem Ödometertest ähnlich, er eignet sich aber auch zur schnellen Kurzzeitbelastung. Die Bewertungsgrundlage für einen Lagerungsdichtegrenzwert ist der Pflanzenertrag in Abhängigkeit von der Bodenart der Ackerkrume. In Freilandfeldversuchen wurden den Bodenarten Lagerungsdichtegrenzwerte zugeordnet, bei deren Überschreitung Ertragseinbußen gemessen wurden (**Abbildung 10**). Bis zu drei Lagerungsdichtegrenzwerte werden angegeben, gestaffelt nach Stärke der Ertragseinbuße.

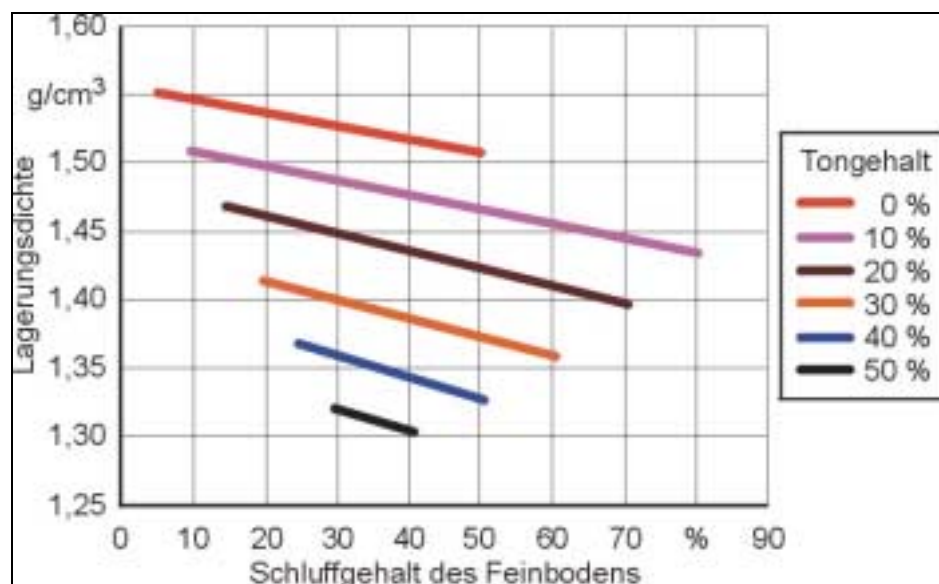


Abbildung 10: Obere Grenzwerte des optimalen Lagerungsdichtebereiches von Ap-Horizonten in Abhängigkeit von der Bodenart bei optimaler Humusversorgung (aus Petelkau et al., 2000).

Bewertungsgrundlage für die Schadverdichtungsgefährdung im Kompressions-Schertest ist derjenige vertikale Druck, ab welchem die für die jeweilige Bodenart ermittelten Lagerungsdichtegrenzwerte erreicht bzw. überschritten werden. Die Tests wurden bei verschiedenen Wassergehalten durchgeführt (**Abbildung 12**). Am verdichtungsempfindlichsten sind die Böden bzw. die Bodenarten, bei denen mit dem geringsten Drücken die Lagerungsdichtegrenzwerte erreicht werden.

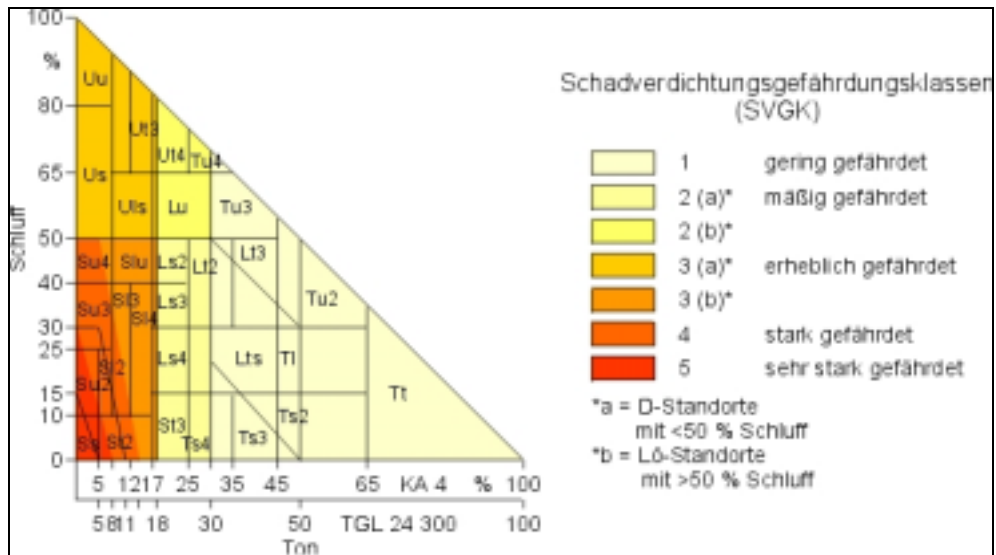


Abbildung 11: Gruppierung der Böden in Schadverdichtungsgefährdungsklassen in Abhängigkeit von der Bodenart (nach Petelkau et al., 2000).

Mit diesen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass das Verhalten der Böden im Kompressions-Schertest unter Berücksichtigung der Lagerungsdichtegrenzwerte der vorgenommenen Einteilung in Schadverdichtungsgefährdungsklassen entspricht (**Abbildung 13**).

Der Einstufung in Gefährdungsklassen in **Abbildung 11** ist zu entnehmen, dass die Schadverdichtungsgefährdung zunimmt, je grobkörniger ein Boden ist. Umgekehrt nimmt sie mit steigendem Feinmaterialanteil ab.

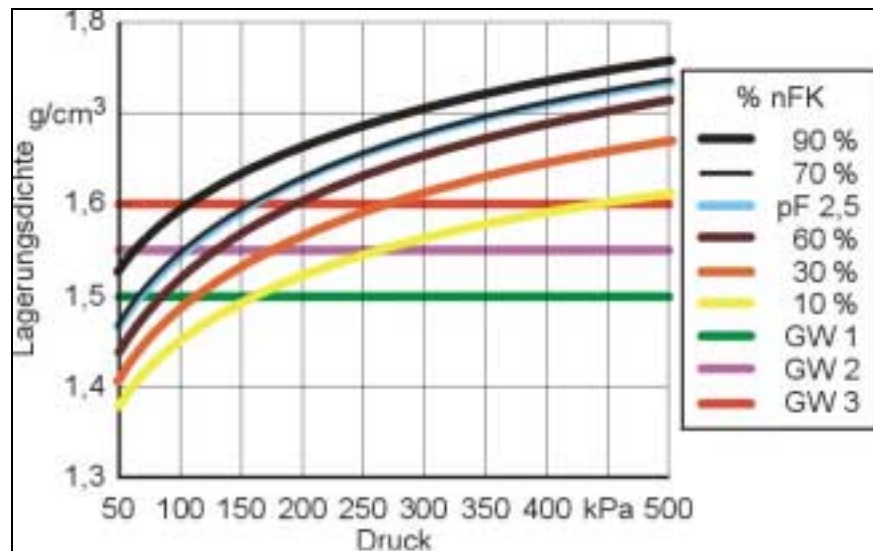


Abbildung 12: Druck-Verdichtungs-Kurven in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (% nFK) für die Bodenart SI3 in der Schadverdichtungsgefährdungsklasse 3 (GW 1–3 = Lagerungsdichtegrenzwert gestaffelt nach Stärke der Ertragseinbußen, aus Petelkau et al., 2000).

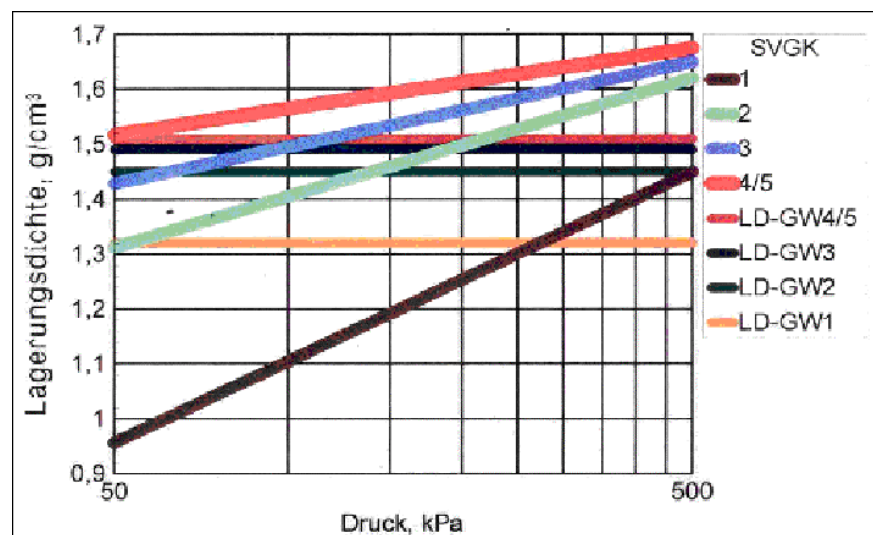


Abbildung 13: Erstverdichtungsgeraden von repräsentativen Bodenarten der Schadverdichtungsgefährdungsklassen (SVGK) unter Berücksichtigung der Lagerungsdichtegrenzwerte (LD-GW) (Bodenfeuchte 50 % nFK, aus Petelkau et al., 2000).

Dieses Ergebnis ist aus bodenkundlicher Sicht überraschend, denn die klassische bodenkundliche Vorstellung ist, dass sich Schäden am Bodengefüge umso gravierender negativ auf den Wasser- und Lufthaushalt auswirken, je feinkörniger und damit je weniger leitfähig der Boden ist. Dass dieser Befund dennoch im Kompressionsversuch bestätigt wird, ergibt Klärungsbedarf. Dazu müssen die Versuchsbedingungen näher betrachtet werden.

Im Kompressions-Schertest nach Petelkau et al. (1988) wird eine gesiebte Bodenprobe in eine Vorrichtung eingefüllt, in der sie schrittweise kurzzeitig komprimiert

und nach der letzten Komprimierung gesichert wird. Durch den Siebvorgang wird die natürliche, bodengenetisch gebildete Gefügestruktur gestört. Für sandige Böden bedeutet dies, dass bodenbildungsbedingte Stabilitätsbrücken an den Kornkontakten gestört werden, wodurch sich eine verminderte Druckstabilität gegenüber der natürlichen Lagerung ergeben kann. Für bindige Böden hat der Siebvorgang die Konsequenz, dass Aggregate auf Siebgröße zerkleinert werden. Dadurch werden zwar einerseits auch kohäsive Verbindungen gestört, die zu Festigkeitsverlusten führen. Andererseits verbleibt aber in den Aggregaten eine Reststabilität, da sie ja nicht völlig aufgelöst werden.

Die Einzelaggregatstabilität kann sehr hoch sein wenn man bedenkt, dass eine Aggregatbildung unter anderem durch Austrocknung und damit verbunden durch hohe Wasserspannungen zustande kommen kann, die den Aggregaten eine hohe Vorspannung (= hydrostatische Vorbelastung) verleiht (Hartge und Horn, 1991). Füllt man gesiebte Aggregate wieder in einen Bodenring ein, so haben diese eine unregelmäßige Anordnung mit außergewöhnlich großen Hohlräumen zwischen den Aggregaten. Komprimiert man diese Packung, dann müssen Aggregate zerschert werden, wozu aber enorm hohe Drücke notwendig sind. Die Arbeitsgruppe Horn hat die Stabilisierungsprozesse von Aggregaten ausführlich beschrieben (Horn et al. 1994).

Durch den Siebvorgang wird also ein künstlich gelockertes Gefüge geschaffen, dessen Rückkomprimierung im Druckversuch bei aggregierten Böden nur mit vergleichsweise sehr hohen Drücken möglich ist. Dadurch erhalten die feinkörnigen Böden im Kompressions-Schertest eine hohe Scheinstabilität, wodurch sie in die verdichtungsunempfindlichen Klassen eingestuft werden. Solche gestörten Gefügebildungen liegen im Freiland aber nur in der intensiv bearbeiteten, gepflügten Krume von Ackerböden vor. Die Einteilung der Böden in Schadverdichtungsgefährdungsklassen kann also für Unterböden mit natürlich gewachsenem Bodengefüge kaum Gültigkeit haben. Es müsste erst eine Korrektur durch Gefügemerkmale erfolgen.

4.1.3.5 Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit im NIBIS

Die Bewertung der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit (S_m) nach dem Konzept des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS (NLfB, 1997) geschieht zunächst auf der Basis einer Zuordnung nach Bodenarten (**Tabelle 15**). Die Einstufung erfolgt in S_m -Stufen von 0 (= keine) bis 6 (= äußerst hohe) Verdichtungsempfindlichkeit. In Abhängigkeit von der Bodenkundlichen Feuchtestufe, des Humusgehaltes, des Verfestigungsgrades von Podsol-B-Horizonten, des Carbonatgehaltes und des Grobbodenanteils erfolgen Zu- oder Abschläge in der Höhe von jeweils ganzen Klassenstufen zu der Grundeinordnung nach der Bodenart.

Tabelle 15: Potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit (Sm) in Abhängigkeit von der Bodenart nach NIBIS (NLfB, 1997).

Bodenart	Sm (Stufen)
Ss, Su2, Sl2	1
Su3, Sl3, St2, St3, Ts4	2
Ts3, Su4, Lts, Sl4, Slu, Lt3, Ls4, Lt2	3
Tu3, Tu4, Us, Ls3, Ut2, Uu	4
Ls2, Ut4, Lu	5
Tl, Ut3, Uls, Tu2, Tt, Ts2	6

Die Inputparameter und die Verknüpfungsregeln zur Berechnung der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit aus Informationen der Bodenkarte sind im Handbuch zu den Auswertungsmethoden im Bodenschutz des NLfB beschrieben (NLfB, 1997). Es fehlt allerdings eine Herleitung der Verknüpfungsregeln, insbesondere eine wissenschaftliche Beschreibung, warum und auf welcher Grundlage die Zuordnungen erfolgen. Das Konzept basiert auf einer nicht veröffentlichten Diplomarbeit (Strobel, 1989).

Die Vorgehensweise des Konzeptes, ausgehend von der Bodenart, Zu- oder Abschläge unter Berücksichtigung weiterer ökologisch-bodenkundlicher Kenngrößen, wie z.B. die Bodenkundliche Feuchtestufe, zu erheben, erinnert stark an naturschutzfachliche Konzepte zur Bewertung von Biotopen oder Standorten für natürliche, potenzielle Vegetation. Die Vorgehensweise scheint nicht explizit auf eine Bewertung der Gefügestabilität von Ackerböden im Hinblick auf die Befahrbarkeit gerichtet zu sein. Dieser Befund ergibt sich auch aus dem Ergebnis, dass für die Ermittlung der Sm-Klasse der in diesem Vorhaben aufgeführten Vergleichs-Ackerböden kaum eine Korrektur der durch die Bodenart festgelegten Verdichtungsempfindlichkeit erfolgt (**Tabelle 16**).

Tabelle 16: Ermittlung der Potenziellen Verdichtungsgefährdung (Sm) nach NIBIS (die Reihenfolge und Horizontierung der Standorte ist die gleiche wie in Tabelle 12).

Bodentyp	Ausgangs- stufe: Bodenart	Bodenk. Feuchte- stufe	Zu- oder Abschläge für:				Gesamt- stufe
			Humus	Verfesti- gung Podsol	Carbonat	Grob- boden	
Kleimarsch	6	0	0	0	0	0	6
(1. Küstenholozän)	6	0	0	0	0	0	6
Auenregosol	1	0	0	0	0	0	1
(2. Flusslandschaften)	1	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	0	0	0	3
	3	0	0	0	0	0	3
Fahlerde	2	0	0	0	0	0	2
(3. Jungmoräne)	2	0	0	0	0	0	2
Braunerde-Pararendzina	3	0	0	0	0	0	3
(3. Jungmoräne)	3	0	0	0	0	0	3
Parabraunerde	2	0	0	0	0	0	2
(4. Altmoräne)	2	0	0	0	0	0	2
	3	0	0	0	0	0	3
	3	0	0	0	0	0	3
Braunerde	1	0	0	0	0	0	1
(5. Tertiärhügelland)	1	0	0	0	0	0	1
	1	0	0	0	0	0	1
	1	0	0	0	0	0	1
Pseudogley-Parabraunerde	5	0	0	0	0	0	5
(6. Llandschaften)	5	0	0	0	0	0	5
Tschernosem	5	0	-1	0	0	0	4
(6. Llandschaften)	5	0	-1	0	0	0	4
Tschernosemartige Pseudogley-4		0	0	0	0	0	4
Braunerde	4	0	0	0	0	0	4
(6. Llandschaften)							
Parabraunerde	6	0	0	0	0	0	6
(7. Bergvorländer)	6	0	0	0	0	0	6
Pararendzina	4	0	0	0	-1	0	3
(8. Berg- u. Hgellnder, Carbo-4	0	0	0	0	-1	0	3
natgestein)	4	0	0	0	-1	0	3
	4	0	0	0	-1	0	3
Braunerde	5	0	0	0	0	0	5
(8. Berg- u. Hügelländer, Carbo-5	0	0	0	0	0	0	5
natgestein)	6	0	0	0	0	0	6
	6	0	0	0	0	0	6
Pelosol	4	0	0	0	0	0	4
(9. Berg- u. Hügelländer, Sand-, 4	0	0	0	0	0	0	4
Schluff-, Ton- u. Mergelsteine)							
Braunerde	4	0	0	0	0	0	4
(9. Berg- u. Hügelländer, Sand-, 4	0	0	0	0	0	0	4
Schluff-, Ton- u. Mergelsteine)							
Braunerde	3	0	0	0	0	0	3
(10. Berg- und Hügelländer, 3	0	0	0	0	0	0	3
Magmatiten u. Metamorphiten)							
Braunerde	3	0	-1	0	0	0	2
(11. Berg- u. Hügelländer, Ton- 3	0	0	-1	0	0	0	2
u. Schluffschiefer)							

Das heißt, die Einstufung der potentiellen Verdichtungsgefährdung erfolgt in diesem Konzept fast ausschließlich anhand der Bodenart, wie beim Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“.

Der Bodengefügezustand, der sich durch die Bodenentwicklung ergibt, wird - mit Ausnahme von Verfestigungen in B-Horizonten bei Podsolen - im Konzept nicht berücksichtigt. Deshalb könnte dieser Ansatz für die Verwirklichung der Ziele dieses Vorhabens zum Schutz des Unterbodens nur dann verwendet werden, wenn eine Ergänzung durch Gefügemerkmale erfolgt.

4.1.3.6 *Vergleichseinstufung in Klassen von Vorbelastung, Schadverdichtungsgefährdung und potenzieller Verdichtungsempfindlichkeit*

Im Folgenden werden die beschriebenen Konzepte noch einmal hinsichtlich ihrer Klasseneinteilung verglichen. Das Konzept „Druckbelastbarkeit nach KUL“ wird nicht mit bewertet, da es mit nur einer Schadensschwelle operiert und nicht mit einer Klasseneinteilung.

Zunächst müssen die Klassifizierungen der einzelnen Konzepte vereinheitlicht werden. Die Potenzielle Verdichtungsgefährdung wird für diesen Vergleich in fünf Klassen eingeteilt, in Anlehnung an die Einteilung der Vorbelastung nach DIN-V-19688. Die Beurteilung erfolgt jedoch in umgekehrter Weise, d.h. die Vorbelastungsklasse (Druckstabilitätsklasse) „sehr hoch“ wird in die Klasse „gering“ der potenziellen Verdichtungsgefährdung eingestuft (**Tabelle 17**). Sehr geringe Vorbelastung erhält respektive die Klasse „sehr stark“ potentiell verdichtungsgefährdet. Die Bewertungen der anderen Konzepte werden an diesen Maßstab angepasst.

Tabelle 17: Vereinheitlichung der Klassifizierung verschiedener Ansätze zur Bewertung der potenziellen Verdichtungsgefährdung.

Klasse	Potenzielle Verdichtungsgefährdung	Vorbelastung (kPa)	Klassenbezeichnungen nach	
			SVGK	NIBIS
1	sehr hoch	<70	sehr stark	sehr + äußerst hoch
2	hoch	70 - <90	stark	hoch
3	mittel	90 - <110	erheblich	mittel
4	gering	110 - <130	mäßig	gering
5	sehr gering	≥130	gering	sehr gering

Die verschiedenen Ansätze zur Vorbelastung wurden bereits verglichen und diskutiert. Der Vergleich soll sich deshalb auf die Ergebnisse von DIN-Vornorm, NIBIS und SVGK konzentrieren (**Tabelle 18**). Auf einen statistischen Vergleich dieser Ergebnisse wird allerdings angesichts des geringen Stichprobenumfangs innerhalb der gleichen Klassen verzichtet.

Ein grundsätzlicher Trend ist klar zu erkennen. Während beim Vorbelastungskonzept bei jeder Bodenart im Prinzip jede erdenkliche Klasse der Verdichtungsge-

fährdung - je nach Gefügeausprägung - vorkommen kann, ist bei den anderen Konzepten die Klasse der Verdichtungsgefährdung bereits durch die Bodenart festgelegt, völlig unabhängig von der Gefügeausprägung. Die Klassenvorhersagen durch die Konzepte NIBIS und SVGK weichen zwar nicht immer vom Ergebnis der Vorbelastungsvorhersage ab, Übereinstimmungen können jedoch zufällig sein.

Tabelle 18: Vergleich der Klassifizierung der potenziellen Verdichtungs-empfindlichkeit mit unterschiedlichen Ansätzen.

Bodentyp (Bodenregion)	Horizont original idealisiert	Pv 1.8 Messw.	Pv 1.8 DVWK 234	Pv 1.8 DVWK 901	Pv 1.8 DIN-V- 19688	Sm	SVGK
Kleimarsch (1. Küstenholozän)	SgGo, orig.	4	4	3	5	1	3
	SgGo, ideal.	4	5	4	4	1	3
Auenregosol (2. Flusslandschaften)	C(v), orig.	4	5	3	4	5	1
	C(v), ideal.	4	5	2	4	5	1
	Ap, orig.	2	5	3	3	3	3
	Ap, ideal.	2	5	1	1	3	3
Fahlerde (3. Jungmoräne)	Ael, orig.	3	5	4	4	4	2
	Ael, ideal.	3	5	3	2	4	2
Braunerde-Pararendzina (3. Jungmoräne)	BvCv, orig.	4	5	2	4	3	5
	BvCv, ideal.	4	4	2	3	3	5
Parabraunerde (4. Altmoräne)	Al, orig.	3	5	5	5	4	3
	Al, ideal.	3	5	4	3	4	3
	Bt, orig.	1	5	3	4	3	5
	Bt, ideal.	1	2	3	3	3	5
Braunerde (5. Tertiärhügelland)	Bv, orig.	5	5	4	4	5	2
	Bv, ideal.	5	5	3	1	5	2
	Bv, orig.	2	3	2	3	5	2
	Bv, ideal.	2	4	2	1	5	2
Pseudogley-Parabraunerde (6. Lößlandschaften)	SBt, orig.	5	5	4	3	1	4
	SBt, ideal.	5	5	4	3	1	4
Tschernosem (6. Lößlandschaften)	Ah, orig.	2	2	1	1	2	4
	Ah, ideal.	2	2	1	1	2	4
Tschernosemartige Pseudogley- Braunerde (6. Lößlandschaften)	BvAh, orig.	5	3	1	3	2	4
	BvAh, ideal.	5	5	1	4	2	4
Parabraunerde (7. Bergvorländer)	Al, orig.	3	5	3	2	1	3
	Al, ideal.	3	5	4	4	1	3
Pararendzina (8. Berg- u. Hügelländer, Carbo- natgestein)	eCv, orig.	5	5	1	4	3	5
	eCv, ideal.	5	5	1	2	3	5
	eCv, orig.	5	4	1	1	3	5
	eCv, ideal.	5	5	1	1	3	5
Braunerde (8. Berg- u. Hügelländer, Carbo- natgestein)	Bv, orig.	5	5	4	5	1	4
	Bv, ideal.	5	5	3	4	1	4
	Bv, orig.	5	5	3	2	1	3
	Bv, ideal.	5	4	4	2	1	3
Pelosol (9. Berg- u. Hügelländer, Sand-, Schluff-, Ton- u. Mergelsteine)	P, orig.	3	5	2	2	2	5
	P, ideal.	3	5	2	2	2	5
Braunerde (9. Berg- u. Hügelländer, Sand-, Schluff-, Ton- u. Mergelsteine)	Bv, orig.	4	3	2	3	2	4
	Bv, ideal.	4	5	3	2	2	4
Braunerde (10. Berg- u. Hügelländer, Mag- matiten u. Metamorphiten)	Bv, orig.	3	1	4	3	3	4
	Bv, ideal.	3	5	3	3	3	4
Braunerde (11. Berg- u. Hügelländer, Ton- Ton- u. Schluffschiefer)	Bv, orig.	4	1	1	1	4	5
	Bv, ideal.	4	1	1	1	4	5

Ein Kausalzusammenhang kann kaum bestehen, da die Konzepte von völlig unterschiedlichen Grundvoraussetzungen ausgehen. Auffällig ist auch, dass die Ansätze nach NIBIS (Sm) und SVGK innerhalb der Stichprobe fast gar keine identische Einstufung liefern, obwohl beide ja auf einer Einstufung nach Bodenarten beruhen. Der Grund dürfte darin liegen, dass die Bewertung im NIBIS wohl eher auf der klassischen bodenkundlichen Einstufung beruht und im SVGK-Konzept die künstlichen Gefügestrukturen gesiebter Proben und die Ertragsrelevanz der Lagerungsdichte zu anderen Bewertungen kommen lassen.

Der Vergleich in **Tabelle 18** macht grundsätzlich deutlich, dass für jeden Boden im Prinzip jede Klasse der potenziellen Verdichtungsgefährdung abgeleitet werden kann, je nachdem welches Konzept man anwendet. Die Ausführungen zeigen aber auch, dass nicht jeder Ansatz für jede Zielsetzung gleichermaßen geeignet ist. Es liegt in der Fachverantwortung des Anwenders, das geeignete Konzept auszuwählen.

4.1.3.7 *Plastizitätsgrenzen nach Atterberg*

Ein weiterer Klassifizierungsansatz für die Druckstabilität von Böden wurde im Rahmen eines Informationssystems „Forstbefahrung“ an der Technischen Universität München für die Bewertung von Forstböden entwickelt (Matthies, 1998). Bei dieser Bewertung geht man davon aus, dass sich die Stabilität eines Bodens aus seiner Plastizität ergibt, die vom Wassergehalt abhängig ist. Ein trockener Sand hat z.B. keine Plastizität, er verhält sich mechanisch zu 100 % spröde. Ein nasser Boden hingegen kann zu 100 % plastisch werden, er beginnt dann zu fließen. Die meisten Böden haben beide Eigenschaften, d.h. sie haben eine obere und untere Plastizitätsgrenze. Sie sind also ab einem bestimmten unteren Wassergehalt spröde und ab einem oberen Wassergehalt verlieren sie ihre Konsistenz. Die Wassergehaltsspanne wird als Plastizitätsindex bezeichnet, der von der Ausrollgrenze und der Fließgrenze nach Atterberg begrenzt wird.

Die Gruppierung der Böden erfolgt in einem 5-stufigen Klassensystem in Abhängigkeit von der Bodenart des Feinbodens und zusätzlichen Kriterien, wie Grobbodenanteil, Humusgehalt oder Bodennässemerkmalen (

Tabelle 19). Die Zuordnung der Bodenarten zu den Klassen erfolgt anhand der Plastizitätsindizes.

Tabelle 19: Einteilung von Böden in Gruppen zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit unter Zugrundelegung der Plastizitätsgrenzen nach Atterberg aus dem Informationssystem Forstbefahrung der TU München (nach Kremer et al., 2000).

Klasse	Bewertung	Bodengruppierung	Ausrollgrenze Vol.-%	Fließgrenze Vol.-%	Plastizitätsindex Vol.-%
1	nicht empfindlich nicht plastisch	Gruse; Kiese; podsolige Sande; humusreiche, podsolige Sande; Grobboden > 50 %			nicht plastisch
2	hoch plastisch	tonige Lehme; Tonlehme; Tone; extrem humusreiche (sandige) Lehme und Schlufflehme	30	50	20
3	mittel plastisch	Schlufflehme (Feinlehme); sandig (kiesige) Lehme; humusreiche, sandige Lehme	25	40	15
4	leicht plastisch	wechselfeuchte (degradierte) Schlufflehme; (kiesig), sandige Lehme; lehmige Sande	18	25	7
5	nicht befahrbar	nasse Böden	keine Befahrung		

In Gruppe 1 sind Böden zusammengefasst, die nicht plastisch sind und damit keine Empfindlichkeit gegenüber Verdichtung haben, wie z.B. Gruse, Kiese und podsolige Sande. Es folgen dann hoch, mittel und leicht plastische Böden, deren Verdichtungsempfindlichkeit in gleicher Reihenfolge zunimmt. Je geringer die Plastizität ist, d.h. je geringer der Abstand ist zwischen Ausroll- und Fließgrenze (ausgedrückt in Vol.-% Wassergehalt), desto empfindlicher ist der Boden gegenüber Befahrungen. In Gruppe 5 sind nasse Böden zusammengefasst, die grundsätzlich überhaupt nicht befahren werden sollten.

Klassifizierungsschlüssel der Verdichtungsempfindlichkeit oder der Druckstabilität ist der Plastizitätsindex, der an gestörten Bodenproben nach dem Atterberg'schen Verfahren ermittelt und zunächst in Masse-% Wassergehalt gemessen wird. Die Autoren gehen davon aus, dass dieser Wassergehalt auf locker lagernden Forstböden mit geringer Gefügedynamik auch dem Vol.-% Wassergehalt in natürlicher Lagerung entspricht.

Beim Atterberg-Test wird mechanisch gesehen an gestörten Bodenproben die Wechselwirkung der Oberflächenspannung des Wassers und der Scherfestigkeit eines Korngemisches gemessen. Aus dieser Wechselwirkung ergibt sich die Konsistenz des Bodens. Die Plastizitätsgrenzen nach Atterberg geben die Verformbarkeit des Bodens im Hinblick auf seine Bearbeitbarkeit, d.h. auf die Lockerungsfähigkeit wider. Sie können deshalb nicht direkt zur Bewertung der Druckbelastbarkeit im Zusammenhang mit der Verdichtung herangezogen werden, da bodenlockernde und bodenverdichtende Kräfte grundsätzlich andere Spannungscombinationen haben. Es

sind hier zusätzliche, empirische Zuordnungen nötig, die einen Zusammenhang zwischen der Plastizität, dem aktuellen Wassergehalt und dem Drucksetzungsverhalten herstellen. Solche Zusammenhänge wurden für Forstböden im Rahmen des Fachinformationssystems der Technischen Universität München erstellt.

Es konnte in den Critical-State-Soil-Mechanics (Roscoe et al., 1958) gezeigt werden, dass selbst gesättigte Tone in Abhängigkeit von Spannung und Vorspannung (= Vorbelastung) sich im Triaxialtest mechanisch spröde verhalten können. Der Plastizitätsindex aus dem Atterberg-Test ist also auch abhängig vom Test selbst, d.h. dem Belastungspfad, dem der Boden im Test ausgesetzt wird. Dieser Test berücksichtigt aber die Gefügeeinflüsse auf die Bodenfestigkeit nicht. Er kann deshalb nicht als Grundlage für die Bewertung der Druckstabilität von Unterböden landwirtschaftlich genutzter Flächen mit Gefügedynamik verwendet werden.

4.1.4 Bodenfeuchteabhängige Druckbelastbarkeit

Die Frage, ob ein Boden für Befahrungen zu nass oder zu feucht ist, wird in der Praxis anhand von subjektiven Erfahrungswerten beurteilt, wobei sich die Bewertung fast ausschließlich auf die Niederschlagsereignisse und die Bodenoberfläche bzw. die Oberkrume beziehen. Den Bodenfeuchtezustand in größerer Tiefe (z.B. 50 cm) kennt und bewertet man in der Regel nicht.

Für ein Schema zur feuchteabhängigen Bewertung der Druckstabilität des Unterbodens landwirtschaftlich genutzter Flächen müssen zwei Dinge vorhanden sein: Messtechniken zur Erfassung der Bodenfeuchte in situ und Auswertungsalgorithmen für die Beurteilung der Druckstabilität in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Das Informationssystem Forstbefahrung der TU München enthält solch einen Ansatz: auf der Basis von Befahrungsversuchen und begleitender bodenphysikalischer Analytik zum Wasser- und Lufthaushalt werden den Böden in Abhängigkeit von den Belastungsfahrzeugparametern, die in einem so genannten Impaktwert zusammengefasst sind, auch maximal tolerierbare Wassergehalte während des Befahrens empirisch zugeordnet (Kremer et al., 2000). Der Wassergehalt in situ wird mit TDR-Sonden bestimmt. Die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auf ungestörte Unterböden landwirtschaftlich genutzter Flächen ist jedoch wegen des besonderen Belastungspfad im Atterberg-Test nicht gegeben.

Algorithmen zur Bewertung der Befahrbarkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt finden sich in den Konzepten „Vorbelastung“ und „Druckbelastbarkeit nach KUL“ nicht. Die empirischen Grundlagen dieser Konzepte wurden aufgrund des hohen Messaufwandes nur für die pF-Stufen 1,8 und 2,5 erhoben. Eine wassergehaltsabhängige Kurve könnte für beide Kenngrößen grundsätzlich erstellt werden, allerdings wäre der messtechnische Aufwand immens. Eine Anpassung der Kenngrößen an verschiedene Wassergehalte durch Modellrechnungen ist ebenfalls denkbar, liegt aber nicht vor.

Das Konzept „Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit“ aus dem NIBIS enthält zwar die bodenkundliche Feuchtestufe, diese ist aber eine potenzielle Kenngröße und orientiert sich nicht am aktuellen Wassergehalt.

Das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ enthält eine Abstufung der Druckbelastbarkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt in 10-Vol.-%-Schritten. Die Gültigkeit dieses Konzept ist aber in der vorliegenden Form weitestgehend auf die Krume beschränkt.

Der Indikator Spurtiefe (Brunotte et al., 2000) des Konzeptes „Befahrbarkeit“ der FAL berücksichtigt integrativ die Einflüsse von Bodentyp und Bodenfeuchte. Ein Bewertungsschema für die Spurtiefe in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt existiert aber nicht.

Fazit: Einzelindikatoren der Verdichtungsgefährdung

Die vier Einzelindikatoren der Verdichtungsgefährdung unterscheiden sich in ihrer Quantifizierbarkeit.

Bei den **Fahrzeugparametern** sind die Radlast (statisch) und der Reifeninnendruck relativ einfach und exakt zu bestimmen. Der Kontaktflächendruck ist mit der gleichen Exaktheit mit vertretbarem Aufwand nicht zu ermitteln, so dass mit dem mittleren, statischen Kontaktflächendruck unter Verwendung einer geschätzten Reifenkontaktfläche eine ungenauere Hilfsgröße verwendet werden muss. Aus der Basis des Kontaktflächendrucks erfolgen aber die Berechnungen des **Bodendruckes**, wodurch sich die Unschärfen des Kontaktflächendrucks dort fortsetzen. Hinzu kommen bei der Bodendruckberechnung weitere Unschärfen durch Modellannahmen für die Beschaffenheit des Bodens. Validierungen von Bodendruckberechnungen durch Messungen sind im Modellsubstrat möglich, im Freiland aber äußerst aufwendig, so dass man sich in der Regel auf den berechneten Bodendruck verlässt. Diese Berechnung hat jedoch den Charakter einer Schätzung unter Einbeziehung der Gesetzmäßigkeiten der Kontinuum-Mechanik.

Die **bodentypische Druckbelastbarkeit** ist für den Unterboden heute nur anhand von Drucksetzungstests an ungestörten Bodenproben quantifizierbar. Diese Voraussetzung erfüllen nur die Indikatoren „Vorbelastung“ und „Druckbelastbarkeit nach KUL“. Andere Ansätze, die Verdichtungsgefährdung aus der Bodenart (NIBIS-Ansatz) und auf der Basis von Tests an gesiebten Bodenproben (SVGK-Ansatz) abzuleiten, können deshalb nur Gültigkeit für die Krume haben. Unterbodenrelevant sind diese nur in Ausnahmefällen oder nach einer Korrektur um Bodengefügemerkmale.

Die Regionalisierbarkeit der bodentypischen Druckbelastbarkeit durch die Auswertung von Bodenkarten mithilfe von Regressionsgleichungen für die Vorbelastung ist durch Validierungen zu überprüfen. Alternativen sind die Ableitung der Vorbelastung aus Tabellen für typische Standorte in Anlehnung an die DIN-Vornorm 19688 oder die Analytik.

Die Indikatoren „Vorbelastung“ und „Druckbelastbarkeit nach KUL“, die aus dem konsolidierten Ödometer test abgeleitet werden, können das Ergebnis von Einzelereignissen im Freiland nicht abbilden. Sie geben ein Maß für das Ergebnis von sich langfristig aufsummierenden Einzelereignissen.

Die wechselnde **bodenfeuchteabhängige Druckbelastbarkeit** im Jahresgang ist bei der Bewertung der Verdichtungsgefährdung des Unterbodens derzeit nicht quantifizierbar. Algorithmen zur Bewertung der bodentypischen Druckbelastbarkeit bei wechselnder Bodenfeuchte fehlen. Die Indikatoren „Vorbelastung“ und „Druckbelastbarkeit nach KUL“ beziehen sich auf den feuchtebereich der Feldkapazität von pF 1,8 bis 2,5.

4.2 Prüfkonzpte und ihre Schlüsselindikatoren

Die beschriebenen Einzelindikatoren für bodenbelastende Fahrzeugparameter, den Bodendruck, die bodentypische und die feuchteabhängige Druckbelastbarkeit stellen für sich alleine genommen Anzeiger einer potenziellen Verdichtungsgefährdung dar. Die Schlüsselindikatoren sollen die Informationen der Einzelindikatoren so miteinander verknüpfen, dass eine verlässlichere Aussage über die Verdichtungssituation möglich wird.

Im Folgenden werden die vorliegenden Prüfkonzpte und deren Indikatorgewichtung beschrieben. Es werden nur die Konzepte behandelt, die für eine landwirtschaftliche Anwendung in Frage kommen und mehr als einen der genannten Einzelindikatoren enthalten. Es sind die Konzepte „Vorbelastung“, „Belastungsquotient“, „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ und „Befahrbarkeit/Spurtiefe“ sowie der Vorschlag einer EU-Arbeitsgruppe. Doppelte Bezeichnungen für die Einzelindikatoren und Prüfkonzpte „Vorbelastung“ und „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ sind dadurch zu erklären, dass für die Gesamtkonzpte die Namen der Einzelindikatoren beibehalten wurden.

4.2.1 Konzept „Vorbelastung“ (ATV-DVWK)

Das Vorbelastungskonzept ist Gegenstand der zwei ATV-DVWK-Merkblätter 234 (1995) und 901 (2002) zur Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Es basiert auf Vorarbeiten von Horn (1981), Lebert (1989) und Horn et al. (1991) sowie Nissen (1999).

Für das Konzept ist es zunächst unbedeutend, ob die Vorbelastung analytisch oder über Regressionsgleichungen bestimmt worden ist. Wenn die analytische Bestimmung nicht durchgeführt werden kann, ist alternativ eine Kartenauswertung über Regressionsberechnungen zu prüfen.

Das Vorbelastungskonzept ist vom Grundsatz her bereits im ATV-DVWK-Merkblatt 234 (1995) beschrieben. In diesem Merkblatt geht es zunächst um die Ermittlung der Druckbelastbarkeit (Vorbelastung) und des vertikalen Bodendruckes (Druckbelastung) sowie deren grundsätzliche Eignung als Indikatoren für Bewertungen und Prognosen der Bodengefügeentwicklung (**Abbildung 14**).

Im neuen ATV-DVWK-Merkblatt 901 (2002) wird die Vorgehensweise auch als Prüfkonzpt im Sinne der Gefahrenabwehr und damit auch im Sinne dieses Vorhabens vorgestellt. Aus der Gegenüberstellung von vertikalem Bodendruck und Vorbe-

lastung wird ein maximal tolerierbarer Kontaktflächendruck berechnet, und daraus folgen Ableitungen für maximal tolerierbare Radlasten.

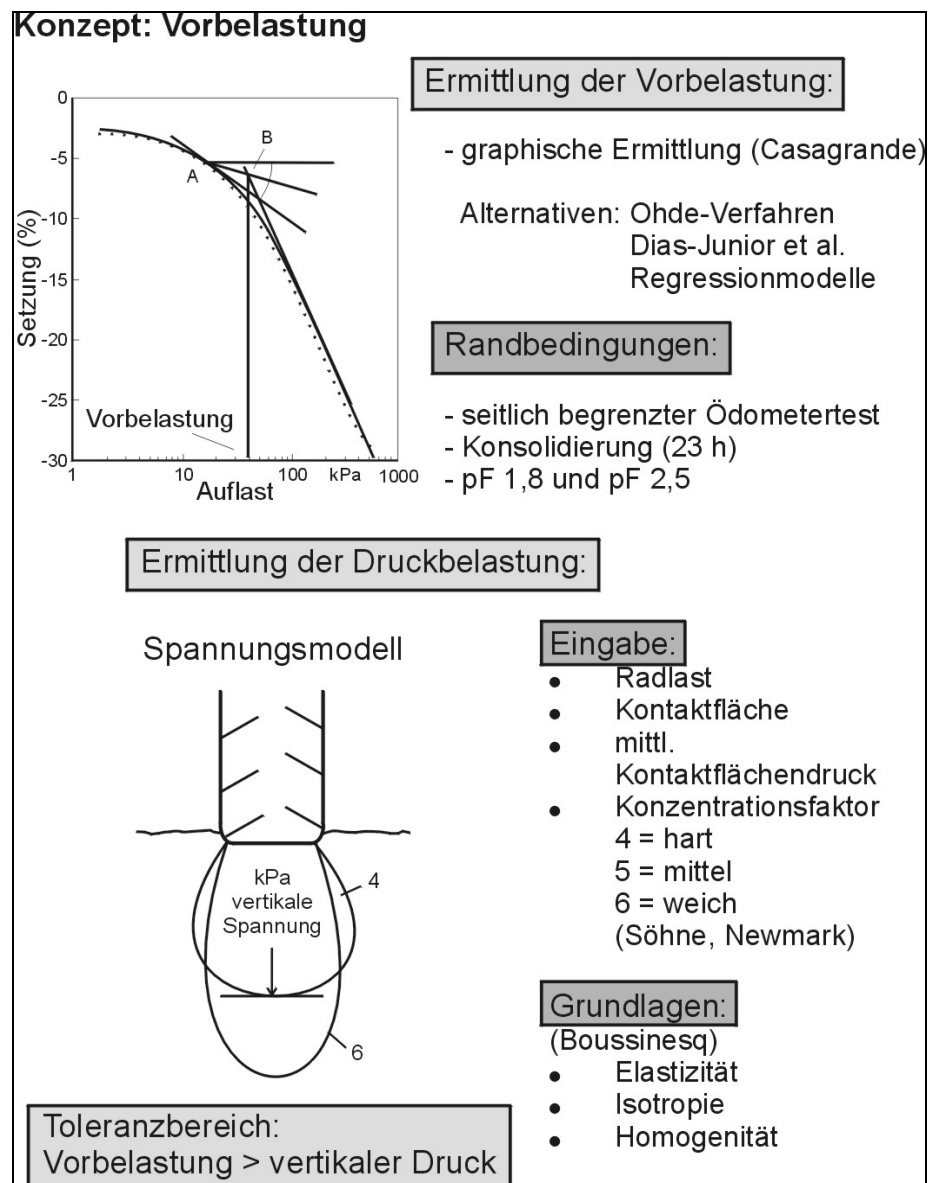


Abbildung 14: Gesamtübersicht der Ermittlung von Druckbelastbarkeit und Druckbelastung des Bodens mit dem Vorbelastungskonzept.

Die Berechnung des maximal tolerierbaren Kontaktflächendruckes an der Bodenoberfläche erfolgt durch eine Umkehr des Berechnungsverfahrens des vertikalen Druckes nach Newmark (1942). Nach Newmark gilt folgendes:

$$P_z = P_o \left[1 - \left(\frac{z^2}{r^2 + z^2} \right)^{v_k/2} \right] \quad (17)$$

mit:

- P_z = vertikaler Bodendruck in Tiefe z (kPa)
- P_o = mittlerer Kontaktflächendruck (vertikal gerichtet, kPa)
- r = Radius einer kreisrunden Kontaktfläche (cm)
- z = Bodentiefe (cm)
- v_k = Konzentrationsfaktor

Unter einer kreisrunden Kontaktfläche wird ein mittlerer Kontaktflächendruck (P_o) entlang der Lotrechten unter dem Kreismittelpunkt bis in die Tiefe z als vertikaler Bodendruck P_z fortgepflanzt (Abbildung 15).

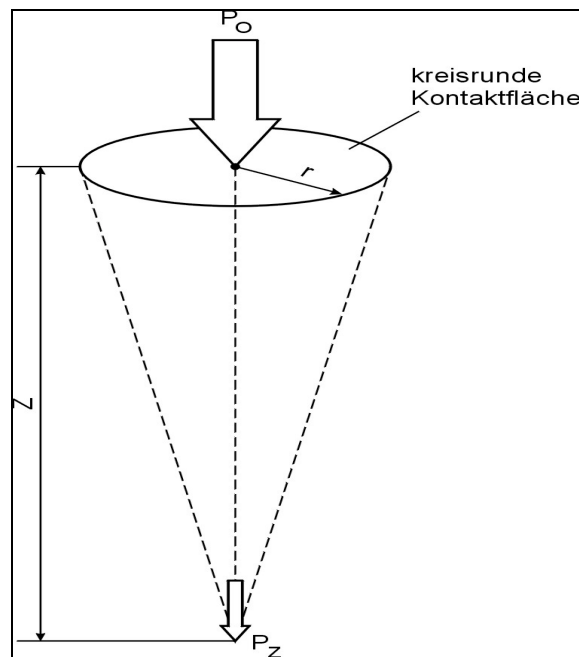


Abbildung 15: Druckfortpflanzung unter einer kreisrunden Kontaktfläche nach Newmark (1942).

Setzt man als P_z die Vorbelastung P_v ein, die nach dem Vorbelastungskonzept den maximal tolerierbaren Wert für P_z darstellt und löst man die Gleichung nach dem Kontaktflächendruck P_o auf, so erhält man:

$$P_o = P_v / \left[1 - \left(z^2 / (r^2 + z^2) \right)^{v_k / 2} \right] \quad (18)$$

Dieser Kontaktflächendruck entspricht als mittlerer Wert dem maximal tolerierbaren Kontaktflächendruck des Standortes unter den zuvor definierten Randbedingungen für die Bodenfeuchte und die bodenbelastenden Fahrzeugparameter. Unter bestimmten Annahmen für Reifenbreite und -typ folgen Ableitungen für maximal tolerierbare Radlasten.

Die Vorgehensweise, anhand von mechanischer Bodeninformation, modellmäßigen Druckberechnungen und Fahrzeugparametern eine Bewertung der Befahrbarkeit vorzunehmen, enthält als Folge von idealisierten Modellannahmen und Versuchsbedingungen Fehlermöglichkeiten, die in der Summe zu Unschärfen der Prognose führen können.

Die wichtigsten möglichen Fehlerquellen des Vorbelastungskonzeptes seien hier noch einmal aufgelistet:

- Berechnungen des Bodendruckes sind nur exakt für ein elastisches, homogenes und isotropes Medium,
- ein Konzentrationsfaktor muss angenommen werden,

- es wird mit einem durchschnittlichen, mittlerer Kontaktflächendruck gerechnet,
- wechselnde Bodenfeuchte wird nicht berücksichtigt,
- die Vorbelastung wird im seitlich begrenzten Druckversuch unter konsolidierten Bedingungen ermittelt,
- bei der Berechnung der Vorbelastung mit Regressionsgleichungen ergeben sich weitere Unschärfen.

Vor einer Anwendung des Vorbelastungskonzeptes als Prüfkonzept im Sinne des ATV-DVWK-Merkblattes 901 sind daher unbedingt Untersuchungen erforderlich, die die Vorhersagen des Modells einer bundesweiten Validierung unterziehen.

4.2.2 Konzept „Belastungsquotient“ (KUL)

Das Konzept „Belastungsquotient“ ist Bestandteil des Bewertungssystems für Umweltqualität in der Landwirtschaft KUL (Kriterien für umweltverträgliche Landwirtschaft, Eckert et al., 1999) der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft und wurde in das Umweltsicherungssystem Landwirtschaft des VDLUFA aufgenommen. Der Belastungsquotient wurde als Prüfkriterium von Werner und Paul (1999) entwickelt.

Der Belastungsquotient ist der Quotient aus Druckbelastung (kPa) und Druckbelastbarkeit (kPa) (**Abbildung 16**). Die Druckbelastung wird, wie im Vorbelastungskonzept, über ein Rechenmodell (nach Söhne/Newmark) ermittelt. Die Druckbelastbarkeit gibt den Grenzwert für den maximalen, vertikalen Bodendruck an, bei dem sich im Ödometertest für den Oberboden eine Luftkapazität von 8 Vol.-% und im Unterboden von 5 Vol.-% einstellt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung wurde in Kapitel 4.1.3.3 beschrieben.

Die Druckbelastbarkeit orientiert sich nicht an der Vorbelastung, sondern an einer definierten, ökologischen Schadensschwelle für den Lufthaushalt des Bodens. Belastungen, die über die Vorbelastung hinausgehen, werden nach diesem Konzept solange toleriert, wie diese Schadensschwelle nicht überschritten ist. Umgekehrt soll bei einer sehr hohen Vorbelastung und gleichzeitig geschädigter Bodenstruktur eine Regeneration dadurch ermöglicht werden, dass die Druckbelastbarkeit geringer eingestuft wird, als die Vorbelastung.

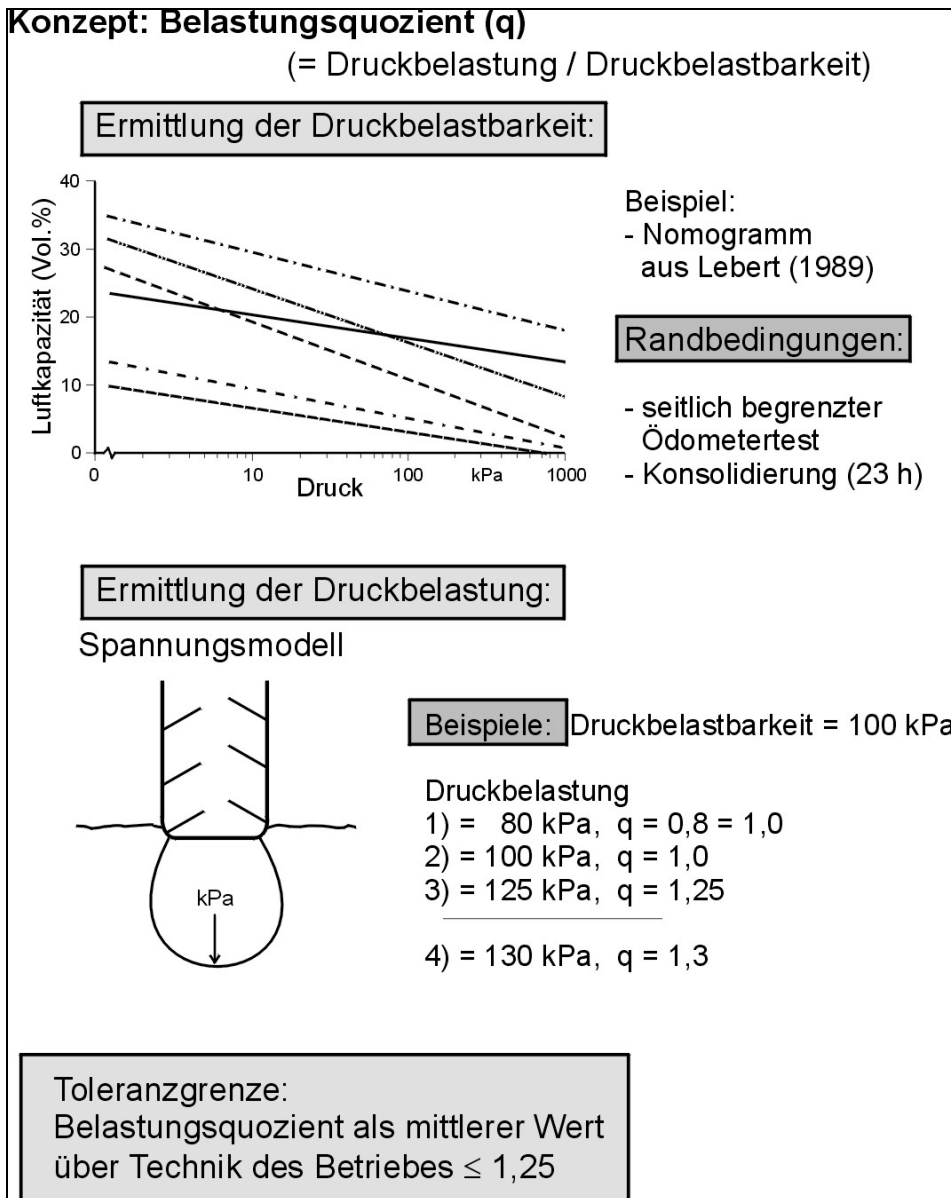


Abbildung 16: Gesamtübersicht zur Ermittlung des Belastungsquotienten.

Bei Druckbelastungsquotienten, die größer sind als 1,25 über einen Durchschnitt des Betriebes, wird davon ausgegangen, dass Schadverdichtungen entstehen können. Bei der Berechnung des durchschnittlichen Belastungsquotienten werden Einzelereignisse mit sehr geringer Bodenbelastung und Belastungsquotienten von unter 1 mit 1 gleichgesetzt, damit bei der Berechnung nicht extrem belastende Befahrungereignisse durch sehr gering belastende völlig kompensiert werden. Bei der Berechnung der durchschnittlichen Druckbelastung werden die typischen Befahrungereignisse innerhalb eines Fruchtfolgejahres und die Überrollhäufigkeiten berücksichtigt.

Das Konzept „Belastungsquotient“ orientiert sich nicht an der Gefügeveränderung, d.h. an der Verdichtung, sondern am möglichen Schadenseintritt, d.h. an der Schadverdichtung. Es enthält in den Modellannahmen hinsichtlich der Berechnung des Bodendruckes und der Randbedingungen im Laborversuch ähnliche, mögliche Fehlerquellen wie das Vorbelastungskonzept, weshalb dem Toleranzbereich des Be-

lastungsquotienten ein Zuschlag von 25 % gegeben wurde (kritischer Belastungsquotient = 1,25 und nicht 1,0!). Die Prognosen des Konzepts müssen deshalb ebenso validiert werden, was die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft im Rahmen der Bodendauerbeobachtung durchführt.

4.2.3 Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ (ZALF)

Das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ (SVGK) wurde am Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) in Müncheberg entwickelt (Petelkau et al., 2000). Es basiert auf empirischen Datenerhebungen auf dem Gebiet der ehemaligen DDR. Mithilfe der Newmark-Gleichung wird der Bodendruck berechnet, der sich aus beliebigen Kombinationen aus Radlast, Reifenbreite, Kontaktfläche und Kontaktflächendruck in einer zu bewertenden Bodentiefe ergibt. Aus den Erstverdichtungskurven des Kompressions-Schertests wird die zu erwartende Lagerungsdichte abgegriffen und mit dem jeweiligen Lagerungsdichtegrenzwert verglichen. Die Darstellung erfolgt in einem Bodendruck-Lagerungsdichte-Profil (**Abbildung 17**). Mit einem zusätzlichen, empirischen Algorithmus wird der Effekt der Überrollhäufigkeit berücksichtigt.

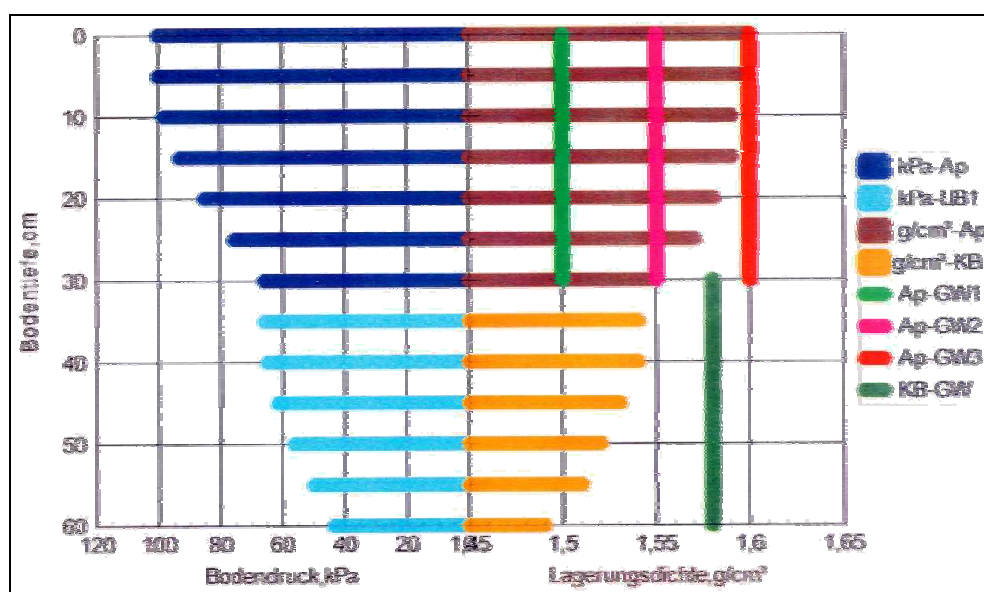


Abbildung 17: Beispiel für ein Bodendruck-Lagerungsdichteprofil für SVGK 3, Kontaktflächendruck = 100 kPa, Radlast = 20 kN, Bodenfeuchte = 90 % nFK, Kontaktfläche = 0,2 m² (aus Petelkau et al., 2000)².

Für typische Arbeitsgänge und deren technische Ausstattung wird für eine Anbaufrucht die Bodenbelastung aus den Fahrzeugparametern zusammengestellt. Dann werden an repräsentativen Einzelprofilen (Dauerbeobachtungsflächen) Belastungsrichtwerte ermittelt und den zugehörigen Schadverdichtungsgefährdungsklassen zugeordnet. Die Belastungsparameter ergeben sich aus Reifenbreite, Kontaktflächendruck, Radlast und Anzahl der Überrollungen. Kriterien für die Belastungsricht-

² Kürzel: Ap = Ap-Horizont, UB1 = Unterboden, GW 1-3 = Lagerungsdichtegrenzwerte gestaffelt nach Ertragseinbußen, KB = Krumenbasis

werte sind für den Oberboden die Intensitäten der Überschreitungen der Lagerungsdichtegrenzwerte, in folgender Abstufung: nicht, mäßig, erheblich, stark und sehr stark überschritten.

Grundsätzlich sollen Überschreitungen des Lagerungsdichtegrenzwertes im Oberboden vermieden werden. Wenn sie aber nicht zu vermeiden sind, z.B. weil der Boden in eine stark schadverdichtungsgefährdete Klasse eingestuft ist und der maximale, mittlere Kontaktflächendruck bis zum Erreichen des Lagerungsdichtegrenzwertes so niedrig wäre, dass er mit üblicher Technik nicht realisiert werden könnte, dann erfolgt in Abhängigkeit vom Grad der Überschreitung des Lagerungsdichtegrenzwertes eine Lockerungsempfehlung. Böden ohne Grenzwertüberschreitung im Oberboden werden als grundsätzlich geeignet für reduzierte Bodenbearbeitungsintensität eingestuft, während Böden mit erheblichen bis starken Überschreitungen als jährlich krumentief zu lockern angesehen werden.

Beim Unterboden werden nur zwei Fälle unterschieden, nämlich ob eine Überschreitung des Lagerungsdichtegrenzwertes stattfindet oder nicht. Eine Staffelung der Überschreitungsintensität erfolgt nicht, da eine Überschreitung des Lagerungsdichtegrenzwertes im Unterboden nicht toleriert werden kann. Würden sich bei den Berechnungen zu erwartende Überschreitungen ergeben, so wären die Belastungsparameter einschließlich der Überrollhäufigkeit so zu modifizieren, dass eine Überschreitung vermieden wird. Lediglich im Bereich von Regelspuren würden Überschreitungen toleriert, sofern sie durch partielle Lockerungstechniken wieder beseitigt werden könnten.

Die standortbezogene Erarbeitung von Richtwerten ist Aufgabe der jeweiligen landwirtschaftlichen Beratung. Unter Annahme von standardisierten Radlasten und Reifentypen haben die Autoren im Bund-Länder-Papier (BMVEL, 2001) eine Tabelle mit mittleren

Tabelle 20: Empfehlungen für SVGK-angepasste Kontaktflächendrücke in Ober- und Unterböden Brandenburgs für eine Bodenfeuchte von 70 % nFK (aus BMVEL, 2001).

SVGK	Kontaktflächendruck (kPa), dessen Einhaltung nur eine mäßige Verdichtung im Oberboden bewirkt und durch Grundbodenbearbeitung beseitigt werden kann	Kontaktflächendruck (kPa), dessen Überschreitung in 30 cm Tiefe (Krumenbasis) zu Schäden führen und durch Grundbodenbearbeitung nicht beseitigt werden kann
1 (gering)	310	270
3 (erheblich)	110	160
4 (stark)	60	120
5 (sehr stark)	50	110

Das Konzept ist als Krumenschutzkonzept sehr ausgereift und basiert auf einer breiten empirischen Datengrundlage, in der allerdings ausschließlich die Bodenlandschaften der neuen Bundesländer repräsentiert sind. Eine Verwendung als Schutz-

konzept für den Unterboden ist nicht sinnvoll, da die bodenphysikalischen Zusammenhänge der Gefügebildung und deren Auswirkungen auf die Bodenstabilität nicht berücksichtigt worden sind. Für eine Beschränkung der Anwendung auf die Krume spricht generell auch die Einschätzung Konzepts, dass leichte Böden am stärksten verdichtungsgefährdet sind. Ein solcher Befund ist für Unterböden nicht übertragbar.

4.2.4 Konzept „Befahrbarkeit“ (FAL)

Im Rahmen der Bemühungen zum physikalischen Bodenschutz wird an der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) ein Sensorsystem zum Befahrbarkeitsmonitoring von landwirtschaftlich genutzten Böden entwickelt. Das Gesamtsystem besteht aus dem Prototypen des Lasersensors für die Spurtiefenmessung (Brunotte et al., 2000), einer modellgestützten Sensorik zur Erfassung des realen Kontaktflächendrucks bei jeder Radumdrehung, zu der erste Testmessungen vorliegen, und einer im Aufbau befindlichen, modellgestützten Messvorrichtung zur Erfassung der Tiefenauswirkung im Unterboden.

Die Spurtiefe ist ein Kriterium zur Bewertung der Befahrbarkeit durch den Praktiker. Sie ist leicht zu ermitteln und gibt immer die standortspezifische Situation unter Praxisbedingungen wieder. Sie ist keine Prognose, sondern eine Messung der tatsächlichen Gesamtsetzung des Bodens, bezogen auf das durch Bodendruck erfasste Bodenvolumen. Sie integriert die Setzungsanteile der Krume und des Unterbodens. Eine Trennung der Setzungsanteile ist aber ohne zusätzliche Informationen nicht möglich. Neben den Einflüssen von Bodentyp und Bodenfeuchte kommen in der Spurtiefe auch die Auswirkungen der Bodenbearbeitung (z.B. Pflug oder Mulchsaat) zum Ausdruck. Mithilfe einer kontinuierlichen Spurtiefenerfassung können der Einfluss der Radlast, z.B. bei zunehmender Bunkerfüllung wie in **Abbildung 18**, und der richtige Zeitpunkt des Abbunkerns ermittelt werden. Für den Unterbodenschutz ist dieser Sensor jedoch nicht ausreichend. Deshalb wird das Messsystem weiterentwickelt.

Die Messung des realen Kontaktflächendrucks ist von Bedeutung, weil herkömmliche Bestimmungen des Kontaktflächendrucks aus der Radlast dividiert durch die Reifenaufstandsfläche nur einen mittleren Wert liefern, der oft für die tatsächliche Belastung nicht repräsentativ ist. Er ist unter Arbeitsbedingungen auch schwer bestimmbar, da die Kontaktfläche dort nicht bekannt ist.

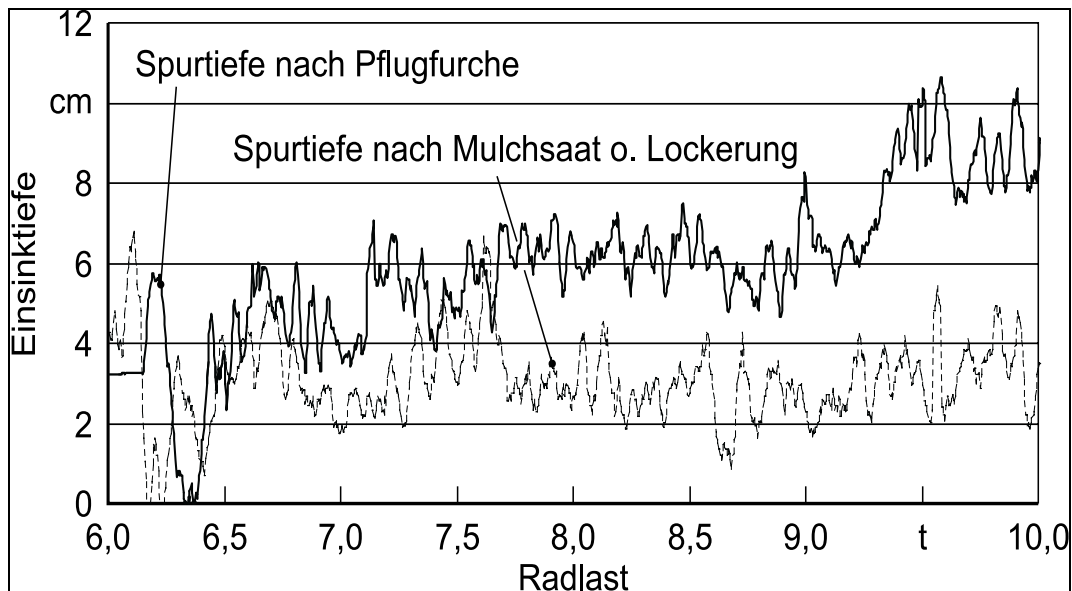


Abbildung 18: Spurtiefe eines 6-reihigen Köpfrödebunkers (Maximale Radlast: 10 t) in Abhängigkeit von der Bunkerfüllung für zwei Bodenbearbeitungsverfahren (nach Brunotte et al., 2000).

Das neue Messsystem besteht aus einer Messvorrichtung für die Reifenumdrehung und -verformung, die an der Einzelradmessvorrichtung der FAL montiert ist (**Abbildung 19**), und einer Berechnungseinheit, die nach dem Modell von Jaklinski (1999) die Normal- und Scherspannungen innerhalb der Kontaktfläche aus den Parametern $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, z_0$ und e der Reifenverformung (**Abbildung 20**) berechnet, sowie aus den Kenngrößen Radlast, Triebkraft und Schlupf, die über den Bordcomputer der Einzelradmessvorrichtung bereitgestellt werden. Erste erfolgreiche Testmessungen wurden durchgeführt (Jaklinski et al., 2001; Sommer et al., 2001).

Der Vorteil dieser Vorgehensweise, eine sensorgestützte Bodeninformation als Basis für Bodenschutzentscheidungen heranzuziehen, liegt in der direkten Umsetzbarkeit von Bodenschutzbelangen vor Ort. Vorsorgeaspekte könnten so im direkten Nachgang mit Maßnahmen zur Gefahrenabwehr gekoppelt werden.



Abbildung 19: Sensorik an der Einzelradmessvorrichtung der FAL zur Ermittlung von Radumdrehung und Reifenverformung.

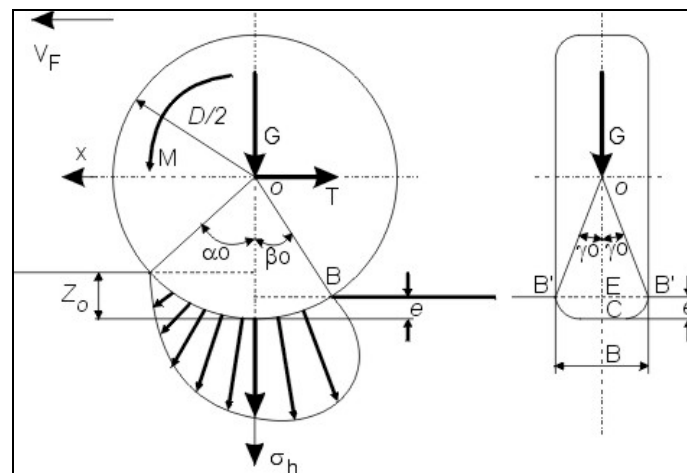


Abbildung 20: Schematische Darstellung der in das Modell nach Jaklinski (1999) eingehenden Parameter der Reifenverformung.

In der Spurtiefe spiegeln sich alle verdichtungsrelevanten Fahrzeug- und Bodenparameter wider, auch die aktuelle Bodenfeuchte. Woran weiter gearbeitet wird, ist eine Zuordnung von kritischen Spurtiefen im Hinblick auf den Schutz des Unterbodens. Erst dann kann es möglich sein, die Spurtiefe in ein Prüfkonzept für den Unterbodenschutz einzubauen und in Gefährdungsklassen einzuteilen.

4.2.5 Vorschlag einer EU-Arbeitsgruppe

Eine EU-Arbeitsgruppe (Chamen et al., 2003) schlägt vor, den Reifeninnendruck in Kombination mit der Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens als Schlüsselindikator für ein Prüfkonzept heranzuziehen. Der Reifeninnendruck als Indikator hat den Vorteil, dass er leicht bestimmbar ist und mit vertretbarem, technischem Aufwand geregelt werden kann (Reifeninnendruckregelanlage).

Nach den Vorstellungen der EU-Arbeitsgruppe werden vier Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit jeweils maximale Werte für den Reifeninnendruck zugeordnet (**Abbildung 21**). Die Verdichtungsempfindlichkeitsklassen sollen neben der texturbedingten Verdichtungsgefährdung auch einen Algorithmus zur Berücksichtigung der Bodenfeuchte enthalten. Hierzu wird in verschiedenen Projekten derzeit gearbeitet.

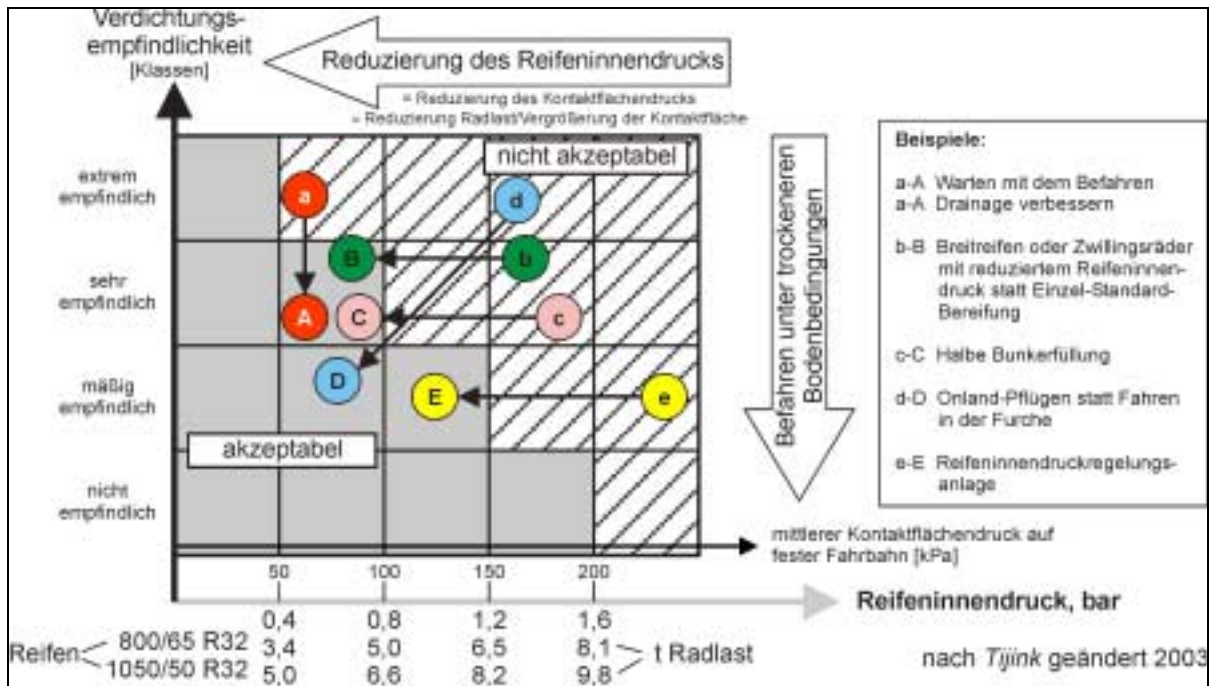


Abbildung 21: Vorschlag für ein Prüfkonzept der mechanischen Belastbarkeit des Bodens in Abhängigkeit von der Verdichtungsempfindlichkeit und dem Reifeninnendruck (Tijink, 2003, geändert).

Die möglichen Wege zur Modifikation der Bodenbelastung zum Erreichen einer „akzeptablen“ Kombination aus Verdichtungsempfindlichkeit und Reifeninnendruck sind im Vier-Bausteine-Konzept nach Sommer (1998) und im Bund-Länder-Papier zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung des BMVEL (2001) beschrieben. Die vier Bausteine bestehen aus der Nutzung technischer Möglichkeiten (Beispiele Wege b-B und e-E), der Anpassung von Arbeitsverfahren (Beispiel Weg d-D), der Verbesserung der Belastbarkeit des Bodens (Beispiel Weg a-A) und der Begrenzung der mechanischen Belastung (Beispiel Weg c-C).

4.2.6 Fazit: Prüfkonzepte

Zuverlässige Prognosen für die Verdichtungssituation auf Ackerböden können nur getroffen werden, wenn mittels Schlüsselindikatoren eine Aussage über die Gesamtwirkung der vier Einzelindikatoren der Verdichtungsgefährdung (Fahrzeugparameter, Bodendruck, Druckbelastbarkeit und Bodenfeuchte) gelingt. Die vorhandenen Prüfkonzepte unterscheiden sich in ihren Zielen und den ableitbaren Aussagen.

Die bodenphysikalischen Konzepte „Vorbelastung“, „Belastungsquotient“ und „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ sind grundsätzlich ähnlich aufgebaut (**Tabelle 21**). Ihre Kriterien enthalten

- einen Algorithmus zur Bewertung der bodentypischen Druckbelastbarkeit,
- eine Charakterisierung bodenbelastender Fahrzeugparameter,
- einen Algorithmus zur Bestimmung der Druckbelastung und
- eine Prüfgröße zur Festlegung eines Toleranzbereiches.

Tabelle 21: Ziele und Wirkungsweise der Prüfkonzepete zum Schutz gegen Bodenschadverdichtung.

Konzept	Schutzziel	Indikation	Schlüsselindikator
„Vorbelastung“	Erhalt des vorhandenen Bodengefüges	Bodengefüge-veränderung	Vorbelastung $\geq$ vertikaler Bodendruck
„Belastungsquotient“	Erhalt der funktionalen Leistungsfähigkeit des Bodengefüges	Schadenseintritt an Bodenfunktionen	Belastungsquotient $\leq 1,25$
„Schadverdichtungs-gefährdungsklassen“	Erhalt der Ertragsfähigkeit der Krume	Schadenseintritt am Ertrag	Bodenspezifischer Lagerungsdichte-grenzwert
„Befahrbarkeit“	Vermeidung von Schäden am Bodengefüge	Befahrbarkeit	Spurtiefe

Das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ berücksichtigt zusätzlich die Bodenfeuchte über einen weiten Bereich von 10-90 % der nutzbaren Feldkapazität. Die beiden anderen Konzepte beziehen sich ausschließlich auf den Feuchtebereich der Feldkapazität von pF 1,8 bis 2,5.

Der Algorithmus zur Bestimmung der Druckbelastung ist bei allen Konzepten ähnlich und basiert auf Berechnungen des vertikalen Bodendruckes in Abhängigkeit vom Kontaktflächendruck den Theorien nach Boussinesq und Fröhlich (Fröhlich, 1934). Die Konzepte unterscheiden sich allerdings in der Zielsetzung und damit auch in der Ermittlung der Druckbelastbarkeit und der Verwendung einer Prüfgröße im Hinblick auf den Toleranzbereich.

Das Konzept „Vorbelastung“ hat zum Ziel, das vorhandene Bodengefüge zu konservieren. Dazu sollen die Belastungen unterhalb der Vorbelastung des Bodens gehalten werden. Das Konzept „Belastungsquotient“ will durch eine bodengefügebezogene Bewertung des Maschineneinsatzes das Erreichen bzw. Überschreiten von bodenphysikalischen Schadensschwellen am Kriterium der Luftkapazität verhindern. Das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ will Ertragseinbußen durch Bodengefügeschäden vermeiden, indem die Lagerungsdichte einen bestimmten Grenzwert nicht überschreitet.

Das Konzept „Vorbelastung“ erkennt also die Bodengefügeveränderung aber nicht den Gefügeschaden. Die anderen beiden Konzepte erkennen den Schadenseintritt, lassen aber die schadensfreie Gefügeveränderung unberücksichtigt. Die boden-

physikalischen Konzepte erlauben eine Bewertung der Belastbarkeit anhand von Boden- und Fahrzeugdaten. Sie beziehen ihre Basisdaten aus der Betriebsanalyse, aus Bodenkarten und aus begleitender Analytik.

Das verfahrenstechnische Konzept „Befahrbarkeit“ will In-situ-Entscheidungshilfen zum Bodengefügeschutz geben. Die Spurtiefe ist für den Praktiker ein Maß für die gute fachliche Praxis. Das Konzept orientiert sich an den konkreten aktuellen Bedingungen und setzt auf die Verantwortlichkeit des Maschinenfahrers bzw. Landwirts. **Tabelle 22** gibt einen Überblick über die Indikatoren und deren Basisdaten, die in den bis jetzt verfügbaren Prüfkonzerten zur Beurteilung der Verdichtungsgefährdung verwendet werden.

Das einzige Konzept, das alle vier Indikatoren berücksichtigt, ist das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ des ZALF. Dieses Konzept berücksichtigt auch die Bodenfeuchte in 10-Vol.-%-Schritten. Es ist aber aufgrund der verwendeten Basisdaten (Setzungstest an gestörten Proben) für die Anwendung auf die Krume konzipiert und deshalb für die Bewertung des Unterbodens weitestgehend nicht einsetzbar. Die anderen Konzepte benutzen drei der vier aufgeführten Indikatoren.

Tabelle 22: Übersicht der Einzelindikatoren und Basisdaten von Prüfkonzepthen zum Schutz gegen Bodenschadverdichtungen.

Bewertungs-kriterium	Indikatoren	Basisdaten	Schlüsselindikatoren und deren Basisdaten			
			Vorbelastung (DVWK)	Belastungs-quotient (KUL)	SVGK (ZALF)	Befahrbarkeit (FAL)
Bodenbelastung	Fahrzeug-daten	- Radlast - Kontaktflächen-druck - Reifeninnendruck	X X	X X	X X	X X X
	Bodendruck	- Messung mit Sonden - Berechnungen nach Söhne/Newmark	X X	X	X	
Bodenbelast-barkeit	Bodentypische Druck-belast-barkeit	- Ödometertest ungestörte Probe - Ödometertest gestörte Probe - Spurtiefe	X	X	X	X
	bodenfeuchteabhängige Druckbelast-barkeit	- Ödometertest ungestörte Probe - Ödometertest gestörte Probe - Spurtiefe			X	X

Die Konzepte „Vorbelastung“ und „Belastungsquotient“ beziehen die variable, feuchteabhängige Druckstabilität nicht mit ein, sondern beziehen sich auf eine angenommene Feuchte im Bereich der Feldkapazität. Sie können deshalb nur Aktualität haben, wenn dieser Feuchtezustand im Boden auch vorliegt. In der Regel stellt sich im Bundesgebiet die Feldkapazität über Winter in den Böden ein und hält bis etwa Ende März an (Scheffer/Schachtschabel (1998).

Das Konzept „Befahrbarkeit“ integriert über die Spurtiefenmessung die Einflüsse aller Fahrwerksparmeter, die bodentypische Druckbelastbarkeit und die Einflüsse der Bodenfeuchte. Es berücksichtigt aber die Druckbelastung und die Druckbelastbarkeit des Unterbodens nicht ausreichend.

In der bisher vorliegenden Form sind die vorhandenen Prüfkonzepthen zur Bewertung von Bodenschadverdichtungen nicht vollständig genug, um als alleinige Basis für ein Prüfkonzepth zur Gefahrenabwehr verwendet werden zu können. Dazu müssten sie um die jeweils fehlenden Kriterien ergänzt werden. Darüber hinaus müssten vor einer Anwendung von Prüfkonzepthen im Rahmen der Gefahrenabwehr ausreichendere Validierungsergebnisse als bisher vorliegen.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zu den Fragen 1. bis 3. aus der Einführung (vgl. S. 1) ergeben sich anhand der Recherchen in diesem Vorhaben folgende Antworten:

- **zu Frage 1.: *Wie kann eine Bodenschadverdichtung zweifelsfrei identifiziert werden?***

Eine Identifikation von Bodenschadverdichtungen kann durch eine kombinierte Diagnose aus bodenphysikalischen Messungen und der Feldgefügeansprache erfolgen. Beim Vorliegen einer Luftkapazität unter 5 Vol.-% und einer gesättigten Wasserleitfähigkeit unter 10 cm/ Tag und einer gleichzeitigen Einstufung des Bodens bei der Feldgefügeansprache in die Klassen 4 und 5 ist vom Vorliegen einer Bodenschadverdichtung auszugehen. Bei der Feldgefügeansprache wird auch das durch die reine bodenphysikalische Beschreibung nicht erfassbare Wurzelwachstum mit berücksichtigt. Bei der Gesamtbewertung sind darüber hinaus die bodengenetischen Verhältnisse zu berücksichtigen, weshalb die Bewertung nur von bodenkundlichen Fachleuten durchgeführt werden kann. Bei Böden, die bodengenetisch bedingt über Hintergrundwerte verfügen, die bereits die analytischen Schadensschwellen erreichen oder überschreiten, ist besonderer Wert auf die Feldgefügeansprache zu legen.

- **zu Frage 2.: *Wie erheblich sind Schäden am Bodengefüge für die Beeinträchtigung von Schutzgütern?***

Bodenschadverdichtung kann auf Teilbereichen landwirtschaftlicher Nutzflächen mit besonders intensiver mechanischer Bodenbelastung, wie Vorgewenden, Versuchs- und Rekultivierungsflächen, nachgewiesen werden. Sie kann dort erhebliche Schäden an den Bodenfunktionen verursachen, die durch die Anzeiger Pflanzenwachstum bzw. Ertrag, bodenbiologische und bodenphysikalische Eigenschaften zum Ausdruck kommen.

- Auf Produktionsflächen ohne besondere Belastungsbedingungen sind bisher keine Schäden anhand dieser Anzeiger dokumentiert.
- Schäden durch Bodenverdichtungen an Schutzgütern, die durch andere hochrangige Anzeiger wie Landschaftswasserhaushalt, Hochwasserbildung, Erosion, Gewässer- und Luftqualität zum Ausdruck kommen und im wesentlichen Schäden an den Ausgleichs- und Regelungsfunktionen darstellen, sind zwar kausal herleitbar aber nicht dokumentiert. Die Schäden sind, sollten sie vorhanden sein, nicht so groß, dass sie ohne zusätzliche Untersuchungen auffallen. Und es ist bisher nicht üblich, mit gezielten Untersuchungen nach solchen Schäden zu suchen.
- Das zukünftige Entstehen von Schadverdichtung auf Kernproduktionsflächen kann durch vorliegende Ergebnisse des Bodenmonitorings weder bestätigt noch ausgeschlossen werden. Es werden derzeit insgesamt zu wenig Daten erhoben. Gezielte, langfristige Erhebungen zur Bodenphysik und zu möglichen Schäden durch Bodenverdichtungen

sollten zukünftig durchgeführt und zwischen den Institutionen und Fachleuten abgestimmt werden. Das im Vorhaben zusammengestellte Indikatorsystem zur Erkennung einer Bodenschadverdichtung könnte dafür eine Grundlage sein. Die Ruhm'schen Untersuchungen zeigen, dass Veränderungen des Bodengefüges bodenphysikalisch nur langfristig erfasst werden können.

- Bodenmechanische Untersuchungen können auf einen stattfindenden Verdichtungsprozess hinweisen. Die vorhandene Datenbasis ist aber für allgemeine Aussagen zu klein.

- **zu Frage 3.: Welche Anforderungen müssten an ein Prüfkonzpt zur Beurteilung der konkreten Schadverdichtungsgefährdung gestellt werden?**

Indikatoren zur Fahrzeugbelastung:

Bodenbelastende Fahrzeugkenngößen haben unterschiedliche Indikatorqualität. Der mittlere Kontaktflächendruck ist die gebräuchlichste, aber auch ungenaueste Kenngröße. Die Kontaktfläche und die Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche sind meist nicht bekannt. Die Radlast ist zwar statisch leicht zu ermitteln, aber dynamisch ist sie unter In-situ-Bedingungen nicht genau anzugeben, da z.B. der Bunkerfüllungsgrad serienmäßig nicht angezeigt wird und auch Zugkräfte eine vertikale Komponente haben. Am einfachsten zu bestimmen ist der Reifeninnendruck, bei dessen Bewertung als Belastungskenngröße aber auch die Kontaktfläche und die Karkassensteife eine Rolle spielen.

Indikatoren zum Bodendruck:

Der Bodendruck wird überwiegend rechnerisch in Abhängigkeit vom Kontaktflächendruck und der Kontaktfläche bestimmt und gilt für ein idealisiertes, elastisches, homogenes und isotropes Medium. Eine Berechnung des Bodendruckes ist deshalb nur näherungsweise möglich. Berechnungen und Messungen zum Bodendruck haben jedoch gezeigt, dass diese Näherungen für Aussagen über die Druckbelastung von Böden verwertbar sind.

Indikatoren zur bodentypischen Druckbelastbarkeit:

- Die bodentypische Druckbelastbarkeit wird für den Unterboden natürlich gewachsener, landwirtschaftlich genutzter Böden nur durch die Indikatoren „Vorbelastung“ und „Druckbelastbarkeit im KUL“ beschrieben, weil diese die Gefügebildung berücksichtigen.
- Eine Regionalisierung der Vorbelastung über Regressionsmodelle ist erst möglich, wenn die verschiedenen Ansätze anhand der verfügbaren Datensätze auf Plausibilität geprüft und validiert worden sind.
- Die Indikatoren „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ und „Potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit nach NIBIS“ beschreiben die Druckbelastbarkeit unabhängig von der Gefügebildung und haben deshalb nur Gültigkeit für die gestörte Ackerkrume oder den in Einzelkornstruktur abgelagerten Boden. Für eine Anwendung auf den ungestörten Unterboden müssten sie durch eine bodengefügeabhängige Bewertung er-

gänzt werden. Beide Ansätze liefern diametral widersprüchliche Aussagen zur Verdichtungsgefährdung.

- Eine Verwendung der Atterberg'schen Plastizitätsgrenzen als Indikatoren für die Druckbelastbarkeit von Unterböden landwirtschaftlich genutzter Flächen ist aus bodenmechanischen Gründen nicht möglich.

Indikatoren zur bodenfeuchteabhängigen Druckbelastbarkeit:

Indikatoren für eine Bewertung der Druckbelastbarkeit von Unterböden landwirtschaftlich genutzter Flächen in Abhängigkeit von wechselnder Bodenfeuchte gibt es derzeit nicht. Die Indikatoren „Druckbelastbarkeit nach KUL“ und „Vorbelastung“ beziehen sich auf den Feuchtebereich der Feldkapazität.

Prüfkonzepte:

- Das Konzept „Vorbelastung“ zielt auf die Konservierung des jeweils vorhandenen Unterbodengefüges durch Anpassung des Bodendruckes an einen Belastbarkeitsgrenzwert. Es geht aus dem Wert der Vorbelastung allein aber nicht hervor, ob dieser geogen oder bereits anthropogen überprägt ist. Die empirischen Berechnungsgrundlagen beziehen sich auf den Feuchtebereich von pF 1,8 bis 2,5.
- Das Konzept „Belastungsquotient“ zielt auf die Vermeidung von Schäden an den Ausgleichs- und Regelungsfunktionen in Ackerkrume und Unterboden durch Anpassung des Bodendruckes an einen Belastbarkeitsgrenzwert, der durch eine Schadensschwelle für die Luftkapazität festgelegt ist. Die empirischen Berechnungsgrundlagen beziehen sich auf den Feuchtebereich von pF 2,5.
- Das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ zielt auf eine Vermeidung von Ertragsschäden durch Anpassung des Bodendruckes an einen Lagerungsdichtegrenzwert. Es ist deshalb in erster Linie ein Krumenschutzkonzept.
- Das Konzept „Befahrbarkeit“ zielt auf In-situ-Entscheidungshilfen zum Bodengefügeschutz. Es ist bisher als Online-Anzeige der Spurtiefe in Form eines Prototyps realisiert. Der Indikator „Spurtiefe“ integriert die Bodenverdichtung über den Ober- und Unterboden unter aktuellen Belastungsbedingungen. Eine Trennung der Verdichtungsanteile in Ober- und Unterboden erfolgt nicht.
- Keines der Prüfkonzepte ist derzeit vollständig und enthält in seinen Schlüsselindikatoren sämtliche zur zuverlässigen Bewertung der Gefahrensituation erforderlichen Einzelindikatoren. Den Konzepten „Vorbelastung“ und „Druckbelastbarkeit nach KUL“ fehlt die Bewertung wechselnder Bodenfeuchte und den Konzepten „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ und „Befahrbarkeit“ fehlen Bewertungsansätze für den Unterboden.
- Grundvoraussetzung für eine Anwendung der Prüfkonzepte im Vollzug der Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen sind Vali-

dierungen der Prognoseergebnisse, die bisher noch nicht ausreichend vorliegen.

6 Schlussfolgerungen hinsichtlich Regelungen in der Bundes-Bodenschutz- und Altlasten- verordnung

Eine vorhandene, schädliche Bodenveränderung durch anthropogene Verdichtung lässt sich im Rahmen einer Einzelfallprüfung mit analytischem Aufwand feststellen. In einem solchen Fall könnten geeignete Maßnahmen im Rahmen einer Rechtsverordnung analog zum Vorgehen in §8 BBodSchV zur Gefahrenabwehr bei Erosion angeordnet werden. Die schädliche Bodenveränderung ist dann aber schon da, und es müssen sowohl Sanierungs- oder Regenerationsmaßnahmen als auch Maßnahmen zur Vermeidung des Wiedereintritts ergriffen werden.

Einen hinreichenden Verdacht für das Entstehen einer schädlichen Unterbodenverdichtung ohne Einzelfallprüfung herzuleiten, ist beim derzeitigen Stand der Indikatormodelle nicht möglich. Es stehen noch Vervollständigungen der Modelle zur Erkennung der tatsächlichen Gefahr und Validierungen aus, und es bestehen Kenntnislücken über das Schadensausmaß. Deshalb sollte das Vorhaben, Regelungen zur Abwehr von Gefahren durch Bodenverdichtungen in die Bundes-Bodenschutzverordnung aufzunehmen, erst nach einer Verbesserung der Indikatormodelle und einer Verbesserung der Datenlage über das aktuelle Schadensausmaß weitergeführt werden.

Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist im Folgenden zusammengestellt.

7 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Darstellung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs folgt der Dreigliederung des Berichts: Identifikation einer Schadverdichtung, Erheblichkeit von Schäden durch Bodenverdichtungen und Anforderung an ein Prüfkonzept zur Gefahrenerkennung.

Die geringsten Forschungsdefizite liegen bei der bodenphysikalischen Analytik und Feldgefügeansprache zur **Identifikation einer Schadverdichtung**. Das zusammengestellte Analyseschema, bestehend aus der Luftkapazität, der gesättigten Wasserleitfähigkeit und den drei Feldgefügeansprachen Packungsdichte, effektive Lagerungsdichte und Spatendiagnose, lässt den Gefügezustand eines Bodens unter Einbeziehung der Pedogenese mit hinreichender Sicherheit beschreiben. Das Analyseschema könnte durch das Kriterium „Strukturmerkmalskombination“ und den Parameter „Luftleitfähigkeit“ ergänzt werden, wenn deren Analytik eindeutig normiert und einfache Klassifizierungsschemata erstellt würden.

Ungeklärt bleibt die Bewertung der Erheblichkeit von Gefügeschäden im konkreten Fall. Beurteilungskriterien für die Lage und Mächtigkeit einer verdichteten Schicht im Bodenprofil und deren Flächenanteil müssen für die Einzelfallprüfung erstellt werden.

Deutliche Forschungsdefizite liegen im Bereich der Feststellung der **Erheblichkeit von Schäden durch** Bodenverdichtungen an den Schutzgütern. Es fehlt sowohl ein klarer Überblick über den Gefügezustand von Ackerstandorten als auch eine Bestandaufnahme von Schäden, die durch Bodenverdichtungen an Schutzgütern entstehen. Eine bodenphysikalische Bestandaufnahme sollte bundesweit erfolgen. Dabei sollten unbedingt die Kenngrößen Luftkapazität, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Lagerungsdichte erhoben und eine Feldgefügeansprache durchgeführt werden. Die Lagerungsdichte wird zwar nicht für die Erkennung einer Schadverdichtung verwendet, sie ist aber eine hilfreiche Größe zur Ableitung von Schätzdaten für weitergehende Berechnungen wie z.B. der Vorbelastung.

Eine verbreiterte Datenbasis würde auch zu einer verbesserten Aufklärung von Wirkungsketten führen, in denen die Bodenverdichtung bisher noch eine weitgehend unbekannte Rolle spielt, wie z.B. das Entstehen von Bodenerosion oder Hochwasser oder bei Fragen der Gewässer- und Luftqualität. Zusammenhänge könnten so besser erkannt und die Bedeutung der Bodenverdichtung für Schäden durch hochrangige Anzeiger besser quantifiziert werden. Die Auswirkungen von Bodenverdichtungen durch praxisübliche Technik auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag sind in der Literatur belegt. Es ist unstrittig, dass ein schadverdichteter Boden ungünstige Wachstumsbedingungen schafft und extreme Verdichtungen zu Ertragseinbußen führen. Der hinreichende Nachweis von Ertragsschäden auf üblichen Kernproduktionsflächen durch Bodenverdichtungen ist aber nicht erbracht. Mehr Klarheit in diese Frage könnte eine Bonitur von wachstums- oder ertragsdepressiven Teilarealen mit kombinierter Erhebung von bodenphysikalischen Standortdaten an gleicher Stelle bringen.

Ein **Prüfkonzept** zur Erkennung einer tatsächlichen Gefahr durch Bodenverdichtungen muss vier Indikatoren enthalten: bodenbelastende Fahrzeugparameter, einen Algorithmus zur Berechnung des Bodendruckes, ein Verfahren zur Ableitung der bodentypischen Druckbelastbarkeit und die Bewertung des Einflusses der Bodenfeuchte. Ein solches Prüfkonzept existiert derzeit nicht vollständig.

Die umfassendsten Ansätze für eine Erkennung potentieller Gefährdung des Unterbodens sind die Konzepte „**Belastungsquotient**“ nach KUL und „**Vorbelastung**“ nach DVWK. Sie enthalten für den Unterboden jeweils drei der vier geforderten Indikatoren. Es fehlt beiden jedoch ein Ansatz zur Berücksichtigung des Effektes wechselnder Bodenfeuchte. Dieser Forschungsbedarf könnte entweder durch analytische Ergänzungsmessungen für typische Ackerböden oder durch modellhafte Ableitungen von Zu- oder Abschlägen in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte gedeckt werden.

Darüber hinaus sind für beide Konzepte noch Validierungsarbeiten erforderlich. Die für Thüringer Böden abgeleitete „Druckbelastbarkeit“ nach KUL müsste auf bundesweiten Maßstab übertragen und die Herleitung und Zuordnung der kritischen Werte für die Luftkapazität für typische Böden der Bundesrepublik dokumentiert werden. Im Vorbelastungskonzept nach DVWK liegen zwar Berechnungsmodelle für die Böden der Bundesrepublik Deutschland vor, diese liefern aber unterschiedliche Ergebnisse. Die Modelle sollten mit den Datenbeständen der Länder, wie im Beispiel in Kapitel 4.1.3.2. dieses Berichts, durchgerechnet und auf Plausibilität geprüft werden. Diese Forderung wird auch vom Deutschen Institut für Normung in der DIN-Vornorm 19688 (DIN, 2001) erhoben; sie ist Grundvoraussetzung für eine Anwendung von Regressionsmodellen zur Vorbelastung im Rahmen des Bodenschutzvollzuges.

Zusätzlich müsste durch Validierungen geprüft werden, ob die Indikation der Konzepte, nämlich das Überschreiten eines kritischen Belastungsquotienten oder der Vorbelastung auch in situ zu den erwarteten Ergebnissen führt. Schließlich stellen Tests unter Laborbedingungen und Berechnungen für den Bodendruck für idealisierte Medien die Grundlage für die Prognosen dar. Die Randbedingungen der Prognosen treffen also die realen Verhältnisse nur ungenau. Wie ungenau weiß man aber nicht. Diese Unsicherheitsfaktoren müssten durch gezielte Validierungsprogramme bewertet werden.

Das Konzept „**Schadverdichtungsgefährdungsklassen**“ nach ZALF enthält zwar alle vier geforderten Indikatoren, es orientiert sich jedoch an Bodengefügegrenzwerten gestörter Böden und dem Ertrag und ist somit ein Krumenschutzkonzept. Für eine Übertragbarkeit der Prognosen auf den Unterboden müsste die Datengrundlage um Untersuchungen an ungestörten Bodenproben erweitert werden. Außerdem müsste geklärt werden, warum die Bewertungen für den Indikator der bodentypischen Druckbelastbarkeit im Vergleich zur Bewertung nach dem „**NIBIS**“-Ansatz diametral unterschiedlich ausfallen.

Das „**NIBIS**“-Verfahren zur potenziellen Verdichtungsgefährdung baut ebenfalls auf Bewertungen nach der Bodenart auf und berücksichtigt den Gefügeeinfluss auf die Verdichtungsgefährdung nur bei Podsolen, die allerdings in Niedersachsen, wo

das Verfahren entwickelt wurde, weit verbreitet sind. Für Anwendungen auf bindige Böden mit höherer Gefügedynamik und Böden außerhalb Niedersachsens sollte das Verfahren mit den Konzepten nach KUL oder DVWK, die den Gefügeeinfluss berücksichtigen, abgestimmt werden.

Das Konzept „**Befahrbarkeit**“ nach FAL setzt auf die sensor-technische Erfassung der aktuellen In-situ-Bodenreaktion. Die Randbedingungen der Prognose entsprechen also den realen Verhältnissen während des Befahrens. Die bereits realisierte Spurtiefensensorik allein gibt jedoch keine ausreichende Information über die Reaktionen und Prozesse im Unterboden. Sie soll durch eine berührungslose Unterbodensensorik ergänzt werden, um den Unterbodenanteil an der Gesamtspur zu ermitteln. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Grundsätzlicher Forschungsbedarf besteht auch noch bei der Bewertung der bodenbelastenden **Fahrzeugparameter**. Von den belastungsrelevanten Fahrzeugdaten sind der Reifeninnendruck und die Radlast (leer oder voll beladen) zwar exakt bestimmbar. Die manuelle Messung des Luftdruckes oder die Ermittlung der Radlast durch Wägung ist jedoch aufwendig und umständlich. Eine kontinuierliche Erfassung beider Größen durch eine serienmäßige Sensorausstattung sollte deshalb angestrebt werden.

Die tatsächliche Bodenbelastung ergibt sich erst über den Kontaktflächendruck im Zusammenspiel mit der Kontaktfläche. Sowohl Radlast als auch Reifeninnendruck sind also Komponenten, die sich auf den Kontaktflächendruck auswirken, exakt lässt er sich aber aus diesen Parametern nicht ableiten. Der mittlere Kontaktflächendruck aus Radlast dividiert durch Kontaktfläche ist hingegen eine Durchschnittsgröße und gibt die Belastung nur unvollständig wider. Man kann z.B. Druckspitzen unter dem Reifenzentrum nicht erfassen. Außerdem ist die Ermittlung der Kontaktfläche in situ schwierig. In Forschungsvorhaben kann man sie zwar weitgehend exakt durch Umstäuben des Reifenabdrucks erfassen, für eine routinemäßige Anwendung im Bodenschutz ist das aber nicht machbar.

Verbesserungsmöglichkeiten zur Erfassung der tatsächlichen Druckbelastung in der Kontaktfläche versprechen Verfahren der sensortechnischen Onlinemessung von Spurtiefe und Reifenverformung in Kombination mit der Modellierung von Spannungen innerhalb der Kontaktfläche, z.B. in Anlehnung an das Verfahren nach Jaklinski et al. (2001), bei dem für jede Reifenumdrehung die realen Normal- und Scherspannungen innerhalb der Kontaktfläche berechnet werden können. Eine entsprechende Sensortechnik am Rad ist zu entwickeln.

8 Zusammenfassung

In dem Vorhaben wird untersucht, ob eine Aufnahme von Regelungen zur Gefahrenabwehr von Bodenschadverdichtungen nach § 8 Bundes-Bodenschutzgesetz in die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung unter fachlichen Gesichtspunkten möglich ist.

Grund für die Sorge, das Bodengefüge könnte durch heutigen und gegebenenfalls unsachgemäßen Technikeinsatz Schaden nehmen, geben Untersuchungsergebnisse, die unter Versuchsbedingungen im Einzelfall auf negative Auswirkungen von mechanischen Bodenbelastungen auf das Bodengefüge hinweisen. In Standardwerken und Kongressbänden sind diese Forschungsergebnisse zusammengestellt. Es stellt sich deshalb die Frage, ob zum Schutz des Bodens die derzeitigen Vorsorgebemühungen ausreichen oder ob sie durch Regularien zur Gefahrenabwehr unterstützt werden müssen. Ziel des Bodenschutzes ist in diesem Fall der Bodenhorizont unterhalb der regelmäßig bearbeiteten Bodentiefe, also in der Regel der Unterboden, da dort Schäden nicht mehr durch die Bodenbearbeitung repariert werden können.

1. Das Vorhaben behandelt drei Fragen, die in Anbetracht der Verbindlichkeit von Regularien innerhalb der Bundes-Bodenschutzverordnung zu stellen sind:
2. Wie kann eine Bodenschadverdichtung zweifelsfrei identifiziert werden?
3. Wie erheblich sind Schäden am Bodengefüge für die Beeinträchtigung von Schutzgütern?
4. Welche Anforderungen müssten an ein Prüfkonzert zur Beurteilung der konkreten Schadverdichtungsgefährdung gestellt werden?

Ergebnis ist, dass eine schädliche Bodenveränderung durch Bodenverdichtung durch eine kombinierte Untersuchung aus bodenphysikalischen Messungen und der Feldgefügeansprache festgestellt werden kann. Bei einer Luftkapazität unter 5 Vol.-%, einer gesättigten Wasserleitfähigkeit unter 10 cm/Tag und einer gleichzeitigen Einstufung des Bodens bei der Feldgefügeansprache in die Klassen 4 und 5 ist vom Vorliegen einer Bodenschadverdichtung auszugehen. Allerdings sind die pedogenetischen Gegebenheiten stets mit zu berücksichtigen, weshalb eine solche Prüfung nur durch bodenkundliche Fachleute durchgeführt werden kann. Darüber hinaus wäre zukünftig noch festzulegen, ab welcher Mächtigkeit und Tiefenlage im Bodenprofil und ab welchem Flächenanteil eine verdichtete Schicht einen erheblichen Gefügeschaden darstellt.

Schäden durch Bodenverdichtungen können erhebliche Störungen der Bodenfunktionen hervorrufen. Sie äußern sich in Ertragsschäden, Rückgang der biologischen Aktivität und negativen Beeinflussungen der bodenphysikalischen Eigenschaften wie z.B. den Kenngrößen des Luft- und Wasserhaushaltes. Schäden sind bisher auf Flächen mit besonderen Belastungsbedingungen nachgewiesen worden, wie z.B. Vorgewenden, Kippenflächen oder Flächen aus Bodenbelastungsversuchen. Schäden auf Kernproduktionsflächen sind nicht nachgewiesen, es liegen lediglich Berichte

über Veränderungen von Bodenfunktionen vor. Schäden durch Bodenverdichtungen, die durch hochrangige Anzeiger zum Ausdruck kommen, wie z.B. Landschaftswasserhaushalt, Hochwasser, Erosion oder Gewässerqualität sind zwar kausal herleitbar, aber bisher nicht dokumentiert oder quantifiziert.

Ein Prüfschema zur Beurteilung von Bodenverdichtungen muss im Gegensatz zur Vorsorge die tatsächliche Gefährdung, d.h. die konkrete oder hinreichend wahrscheinliche Gefahr des Eintretens einer schädlichen Bodenveränderung durch Bodenverdichtungen erkennen lassen. Es wird zwischen vier potenziellen Anzeigern der Bodenverdichtungsgefährdung unterschieden: bodenbelastende Fahrzeugkenngrößen, Bodendruck, bodentypische und bodenfeuchteabhängige Druckbelastbarkeit. Eine Gefahr von Schäden durch Bodenverdichtungen ergibt sich dann, wenn alle vier Indikatoren eine verdichtungsfördernde Konstellation ergeben, nämlich dass die Bodenbelastung die Bodenbelastbarkeit übersteigt und wenn die Bodengefügeveränderung die Schadensschwellen erreicht.

Eine verdichtungsfördernde Konstellation der Indikatoren wird über Schlüsselindikatoren ermittelt. Es werden vier Konzepte untersucht und miteinander verglichen: das Konzept „Vorbelastung“ nach ATV-DVWK, das Konzept „Belastungsquotient“ nach KUL, das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ nach ZALF und das Konzept „Befahrbarkeit“ nach FAL.

Das Konzept „Vorbelastung“ zielt auf die Konservierung des jeweils vorhandenen Unterbodengefüges durch Anpassung des Bodendruckes an einen Belastbarkeitsgrenzwert, indem der vertikale Bodendruck in einer zu betrachtenden Bodentiefe die Vorbelastung nicht überschreiten soll. Die Vorbelastung unterscheidet nicht zwischen einer geogen oder anthropogen überprägten Gefügestabilität. Sie wird analytisch über einen Drucksetzungstest ermittelt. Regressionsmodelle zur Regionalisierung des Parameters in Bodenkarten bedürfen noch einer Validierungsprüfung. Das Vorbelastungskonzept bezieht sich auf den Feuchtebereich von pF 1,8 bis 2,5.

Das Konzept „Belastungsquotient nach KUL“ zielt auf die Vermeidung von Schäden an den Bodenfunktionen in Ackerkrume und Unterboden durch Anpassung des Bodendruckes an für den Ober- und Unterboden getrennte Belastbarkeitsgrenzwerte. Die Schadensschwelle wird erreicht, wenn durch die Druckbelastung des Bodens eine Luftkapazität von 5 Vol.-% unterschritten wird. Berechnungsgrundlage sind empirische Drucksetzungskurven. das Konzept bezieht sich auf den Feuchtebereich von pF 2,5.

Das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ zielt auf eine Vermeidung von Ertragsschäden durch Anpassung des Bodendruckes an einen Lagerungsdichtegrenzwert. Das Konzept bezieht seine Basisdaten aus Drucksetzungstests an gesiebten Bodenproben und ist für den Krumenschutz konzipiert. Es bezieht sich auf eine Feuchtespanne von 10 – 100 % der nutzbaren Feldkapazität. Das verfahrenstechnische Konzept „Befahrbarkeit“ ist bisher als Online-Anzeige der Spurtiefe in Form eines Prototyps realisiert. Es zielt auf In-situ-Entscheidungshilfen zum Bodengefügeschutz. Der Toleranzbereich wird nicht über einen Grenzwert, sondern über die Bewertung durch den Landwirt vor Ort und die Beratung ermittelt.

Jedes dieser Konzepte berücksichtigt derzeit noch nicht alle vier der notwendigen Indikatoren gleichzeitig. Die Konzepte „Vorbelastung“ und „Belastungsquotient“ berücksichtigen die wechselnde Bodenfeuchte nicht. Das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ ist ohne eine Ergänzung um Gefügeaspekte nicht für den Schutz des Unterbodens anwendbar. Das Konzept „Befahrbarkeit“ erlaubt keine Trennung zwischen Ober- und Unterbodenbeanspruchung.

In der bisher vorliegenden Form sind deshalb die beschriebenen Prüfkonzeppte noch nicht geeignet, als alleinige Basis zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung durch Bodenverdichtung verwendet zu werden. Sie müssen jeweils um die fehlenden Indikatoren vervollständigt und validiert werden, bevor sie in eventuelle Regelungen zur Gefahrenabwehr von Bodenverdichtungen im Rahmen der Bundes-Bodenschutzverordnung eingehen können.

Literatur

- ATV-DVWK (1986): Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte. Teil III: Anwendung der Kennwerte für die Melioration. – DVWK-Regeln 117, ATV-DVWK, Bad Hennes.
- ATV-DVWK (1995): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung- Teil I: Ansprache der Böden. – DVWK-Regeln 129, ATV-DVWK, Bad Hennes.
- ATV-DVWK (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 1: Mechanische Belastbarkeit. –DVWK-Merkblatt 234, ATV-DVWK, Bad Hennes.
- ATV-DVWK (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 2: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. – ATV-DVWK-Merkblatt 235, ATV-DVWK, Bad Hennes.
- ATV-DVWK (1999): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung. Teil II: Ableitungen zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden. - DVWK-Regeln 136, ATV-DVWK, Bad Hennes.
- ATV-DVWK (2002): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung – ATV-DVWK-Merkblatt 901, ATV-DVWK, Bad Hennes .
- ASAE (1987): Soil cone penetrometer. – American Society of Agricultural Engineering ASAE Standard S313.2.
- Barnes, K.K., W.M. Carleton, R.J. Throckmorton and G.E. Vandenberg (1971): Compaction of agricultural soils. – ASAE Monograph, St. Joseph, MI, USA.
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17.03.1998. – BGBl. I S. 502.
- Becher, H.H. (1971): Ein Verfahren zur Messung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit. – Z. Pflanzenern. u. Bodenk. 128, 1 – 12.
- Becher, H.H. (1978): Ein verbessertes Verfahren zur Messung des Eindringwiderstandes. – Z. Kulturtechnik u. Flurber. 19, 146 – 157.
- Becher, H.H. (1991): Festigkeitsverteilung in Einzelaggregaten. – Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 66, 290 – 296.
- Benecke, P (1966): Die Geländeansprache des Bodengefüges in Verbindung mit der Entnahme von Stechzylinderproben für Durchlässigkeitsmessungen. – Z. Kulturtechnik u. Flurber. 7, 91 – 104.
- Bertrand, A.R. und H. Kohnke (1957): Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and the growth of corn roots. – Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21, 135 – 140.
- Blackwell, P.S. und B.D. Soane (1978): Deformable spherical devices to measure stresses within field soils. J. of Terramech. 15, 207-222.

- Blume, H.-P. (1968): Stauwasserböden. – Arbeiten der Universität Hohenheim (Landwirtschaftliche Hochschule) 42, Ulmer, Stuttgart.
- BMVEL (2001): Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Erosion. Bonn.
- Bodenkundliche Kartieranleitung (KA3, 1982), 3. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4, 1994), 4. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Böhm, W. (1976): In situ estimation of root length at natural soil profiles. – J. agric. Sci., Cambridge 87, 365 – 368.
- Böhm, W. (1978): Die Bestimmung des Wurzelsystems am natürlichen Standort. – Kali-Briefe 14 (2), 91 – 101.
- Böhm, W. (1979): Methods of studying root systems. – Ecological Studies 33. Springer, Berlin.
- Bolling, I.H. (1986): How to predict soil compaction from agricultural tires. – J. of Terramech. 22, 205-223.
- Bolling, I.H. und W. Söhne (1982): Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. – Landtechnik 2, 54-57.
- Borchert, H. (1987): Dichtemessungen mit dem Penetrometer auf zwei sechsjährigen Radspur-Versuchsflächen. – Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 53, 123 – 130.
- Borchert, H. (1988): Effect of wheeling with heavy machinery on soil physical properties. – Catena supplement 11, 153 – 161.
- Brunotte, J., M. Weißbach, H. Rogasik, E. Isensee und C. Sommer (2000): Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrüben-Erntetechnik. – Zuckerrübe 49 (1), 34 – 40.
- Brandhuber, R., L. Schäfer-Landefeld, H.-J. Koch und N. Stockfisch (2001): Sind heute übliche Fahrzeugmassen bei Rübenernte und Gülleausbringung mit den Zielen vorsorgenden Bodenschutzes vereinbar? Ergebnisse eines Forschungsprojektes. – Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 96 (2), 711 – 712.
- Burger, N., M. Lebert und R. Horn (1988): Prediction of the compressibility of arable land. – Catena Supplement 11, 141 – 151.
- Casagrande, A. (1936): The determination of pre-consolidation load and its practical significance. – Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Cambridge, Mass. 3, 60.
- Chamen, T., L. Alakukku, S. Pires, C. Sommer, G. Spoor, F. Tijink und P. Weißkopf (2003): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2, Equipment and field practices to avoid subsoil compaction. – Soil & Till. Res. 73 (1-2), 161 – 174.

- Currie, J.A. (1984): Gas diffusion through soil crumbs; the effects of compaction and wetting. – J. Soil Sci. 35, 1 – 10.
- Czeratzki, W. (1972): Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. – Landbauforschung Völkenrode 22, 29 – 36.
- Dawidowski, J.B. und A.J. Koolen (1994): Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. – Soil & Tillage Res. 31, 277 – 282.
- Dias Junior, M.S. und F.J. Pierce (1995): A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. – Soil Technology 8, 139 – 151.
- Diez, T. (1991): Beurteilung des Bodengefüges im Feld – Möglichkeiten, Grenzen und ackerbauliche Folgerungen. – Berichte über Landwirtschaft 204, 96 – 103.
- Diez, T und H. Weigelt (1989): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (Hrsg.). Sonderdruck dlz agrarmagazin, München, 1. Auflage.
- Diez, T und H. Weigelt (1997): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (Hrsg.). Sonderdruck dlz agrarmagazin, München, 2. geänderte Auflage.
- DIN (1972): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau; Felduntersuchungen – Teil 9: Bestimmung der Luftleitfähigkeit. – Deutsches Institut für Normung, DIN 19682-9 (nicht mehr aktuell).
- DIN (1990): Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Scherfestigkeit; Triaxialversuch. – Deutsches Institut für Normung, DIN 18137-2. Beuth, Berlin.
- DIN (1996): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben – Einaxialer Druckversuch. – Deutsches Institut für Normung, DIN 18136. Beuth, Berlin.
- DIN (1997): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch. – Deutsches Institut für Normung, DIN 18137-3. Beuth, Berlin.
- DIN (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben. – Deutsches Institut für Normung, DIN 19683-9. Beuth, Berlin.
- DIN (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Felduntersuchungen – Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges. Deutsches Institut für Normung, DIN 19682-10. Beuth, Berlin.
- DIN (2000): Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. - Deutsches Institut für Normung, DIN-Entwurf 19688. Beuth, Berlin.

- DIN (2001): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohdichte. – Deutsches Institut für Normung, DIN ISO 11272. Beuth, Berlin.
- DIN (2001): Bodenbeschaffenheit; Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens; Laborverfahren. – Deutsches Institut für Normung, DIN ISO 11274. Beuth, Berlin.
- DIN (2001): Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. – Deutsches Institut für Normung, DIN-Vornorm 19688. Beuth, Berlin.
- Drescher, J. (2001): Bodenmechanik. – Handbuch der Bodenkunde, 2.6.5., 1 – 76, Ecomed, Landsberg/Lech.
- Dürr, H.J., H. Petelkau und C. Sommer (1995): Literaturstudie Bodenverdichtung. – Texte Umweltbundesamt 55/95, Berlin.
- Dumbeck, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. – Dissertation Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung Universität Gießen.
- Eckert, H., G. Breitschuh und D. Sauerbeck (1999): Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung – ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben. – Agrobiol. Res. 52, 57 – 76.
- Eckert, H., G. Breitschuh und D. Sauerbeck (2002): Das Umweltsicherungssystem Landwirtschaft (USL) des VDLUFA - ein Baustein für Umweltmanagementsysteme In: Spindler (Hrsg.) „Agrar-Öko-Audit“ S. 72-88, DLG-Verlags-GmbH
- Eggelsmann, R. (1981): Dränanleitung, 2. Auflage. Parey, Berlin – Hamburg.
- Ehlers, W., D. Werner und T. Mähner (2000): Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. – J. Plant Nutr. Soil Sci. 163, 321 – 333.
- Ehlers, W., K. Schmidtke und R. Rauber (2003): Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. – Z. Landnutzung u. Landentwickl. 44, 9 – 18.
- Emmerling, C. und N. Wermbter (1999): Untersuchung von Bodenzustand und Entwicklung der ostdeutschen Neulandböden anhand mikrobiologischer Eigenschaften und ausgewählter Bodentiere im Hinblick auf eine standortgerechte Landnutzungsplanung. – Abschlußbericht zum BMBF-Verbundvorhaben 0339634 der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Teilprojekt 5).
- Feldwisch, N. (2000): Untersuchungs- und Handlungskonzept zur Bodenverdichtung für verdichtungsempfindliche Standorte in Sachsen. – Studie im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden (unveröffentlicht).
- Fener, S. (1997): Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Ackerstandort. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 160, 157 – 164.

- Flühler, H. (1973): Sauerstoffdiffusion im Boden. – *Mitteilgn. schweiz. Anst. forstl. Versuchswesen* 49, 125 – 250.
- Frede, H.-G., J. Böttcher, B. Meyer und K. Severin (1979): Gastransport und Gasproduktion in Lößböden. – *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 29, 179 – 190.
- Fröhlich, O.K. (1934): *Druckverteilung im Baugrund.* – Springer, Wien.
- Gätke, C.R. (1969): Über den Einfluss der Beschaffenheit der Bodensubstanz auf das Speicherungsvermögen des Bodens für Wasser. – *Albrecht-Thaer-Archiv* 13, 361 – 370.
- Gätke, C.R. (1989): Zum Einfluss des Bodenwassergehalts auf die pneumatische Leitfähigkeit eines Sandbodens. – *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd., Berlin* 33, 437 – 443.
- Geisler, G. (1967): Bodenluft und Pflanzenwachstum unter besonderer Berücksichtigung der Wurzel. – *Arbeiten d. Landw. Hochschule Hohenheim* 40. Ulmer, Stuttgart.
- Geisler, G. (1980): *Pflanzenbau.* Parey, Berlin – Hamburg.
- Gill, W.R. (1968): Influence of compaction hardening of soil on penetration resistance. – *Transactions ASAE* 1968, 741 – 745.
- Göbring, J. (1947): *Die Grundlagen der Gare im praktischen Ackerbau.* – Landbuch-Verlag, Hannover.
- Grable, A.R. und E.G. Siemer (1968): Effects of bulk density, aggregate size and water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. – *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32, 180 – 186.
- Gradwell, M.W. (1965): Soil physical conditions of winter and the growth of ryegrass plants. I. Effects of compaction and puddling. *New Zealand J. Agric. Res.* 8, 238 – 261.
- Gudehus, G. (1981): *Bodenmechanik.* – Enke, Stuttgart.
- Gullich, P. und D. Werner (1984): Korrelative Beziehungen zwischen Porosität und Durchlässigkeit in einem primärverdichteten und gelockerten Löß-Unterboden. – *Arch. Acker – u. Pflanzenbau u. Bodenkd., Berlin* 28, 511 – 518.
- Gupta, S.C., P.S. Sharma und S.A. Franchi (1989): Compaction effects on soil structure. – *Advances in Agronomy* 42, 311 – 338.
- Harrach, T. (1984): Lockerungsbedürftige Böden einfach und sicher erkennen. In: *Bodenfruchtbarkeit in Gefahr?* – *Arbeiten der DLG*, 179. DLG-Verlag, Frankfurt.
- Harrach, T. und T. Vorderbrügge (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. – *Berichte über Landwirtschaft* 204, 69 – 82. Parey, Berlin – Hamburg.
- Harrach, T., W. Kuhn und H. Zörb (1999): Klassifizierung von Gefügekennwerten zur Abgrenzung und Beurteilung von Schadverdichtungen nach wurzelökologi-

- schen Kriterien. – Mitteln. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 91 (3), 1217 – 1220.
- Harris, H.D. und D.M. Bakker (1994): A soil stress transducer for measuring in situ soil stresses. *Soil & Tillage Res.* 29, 35 – 48.
- Hartge, K.H. (1966): Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. – *Z. Kulturtechnik u. Flurber.* 7, 155 – 163.
- Hartge, K.H. (1967): Der Zusammenhang zwischen Luft- und Wasserpermeabilität in Bodenproben. – *Z. Pflanzenernähr. u. Bodenk.* 117, 97 – 107.
- Hartge, K.H. (1994): Soil structure, its development and its implications for properties and processes in soils – a synopsis based on recent research in Germany. – *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 157, 159 – 164.
- Hartge, K.H. und R. Horn (1991): Einführung in die Bodenphysik. – Enke, Stuttgart.
- Hartge, K.H. und R. Horn (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. – Enke, Stuttgart.
- Hennings, V. (2001): Vergleichende Bewertung bestehender Pedotransferfunktionen zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.): Arbeitshefte Boden 3, 5 – 22.
- Horn, R. (1980): Die Ermittlung der vertikalen Druckfortpflanzung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen. – *Z. f. Kulturtechnik u. Flurber.* 21, 343-349.
- Horn, R. (1981): Die Bedeutung der Aggregation von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngößen. Schriftenreihe FB 14, TU Berlin, 10, 200 S.
- Horn, R. (1990): Aggregate characterization as compared to bulk soil properties. – *Soil & Tillage Res.* 17, 265 – 289.
- Horn, R. (1993): Mechanical Properties of structured unsaturated soils.- *Soil technology* 6, 47 – 75.
- Horn, R., C.E. Johnson, H. Semmel, R.L. Schafer und M. Lebert (1992): Räumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten, aggregierten Böden. – *Z. Pflanzenern. u. Bodenk.* 115, 269-274.
- Horn, R., H. Taubner, M. Wuttke und Th. Baumgartl (1994): Soil physical properties related to soil structure. - *Soil & Tillage Res.* 30, 187 - 216.
- Horn, R., M. Lebert und N. Burger (1991): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen. –In: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Materialien 73: Mechanische Belastbarkeit von Böden Bayerns.
- Horn, R., J.J.H. van den Akker und J. Arvidsson (Hrsg.) (2001): Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences. – *Advances in Geology* 32, Catena-Verlag, Reiskirchen.

- Horn, R., C. Simota, H. Fleige, A. Dexter, K. Rajkai und D. de la Rosa (2002): Prognose der mechanischen Belastbarkeit und der auflastabhängigen Änderung des Lufthaushaltes in Ackerböden anhand von Bodenkarten. - J. Plant Nutr. Soil Sci. 165, 235 - 239.
- Hütl, G., E.Q. Klaghofer, E. Murer und M. Nadlinger (1990): Ein neues Messgerät zur Bestimmung des Bodenzustandes. - Praktische Landtechnik 4/90, 10 - 11.
- Jaklinski, L. (1999): Models of pneumatic wheels acting on soil (Polish with English summary). - Politechnika Warszawska. Prace naukowe. Mechanika z. 175.
- Jaklinski, L., B. Jasinski, C. Sommer und M. Lebert (2001): The field test verification of new mathematical model for the calculation of individual soil-tire stresses. - Proc. 4 th. Int. Sci. Conf. on Microprocessor Systems in Agriculture, Plock 2001, Poland, 62-67.
- Kaiser, E.-A, G. Walenzik und O. Heynemeyer (1995): Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf Bodenmikroorganismen. - KTBL-Schrift 263, 157 - 175.
- Kleinstäuber, G. und J. Haupt (1989): Apparatur und Meßplatz zur Bestimmung des Gasdiffusionskoeffizienten. - Hercynia N. F. Leipzig 26, 58 - 70.
- Kmoch, H.G. und H. Hanus (1965): Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft. - Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. 111, 1 - 10.
- Kmoch, H.G. (1962): Die Luftdurchlässigkeit des Bodens. - Habilitationsschrift aus dem Institut für Pflanzenbau an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Bornträger, Berlin.
- Koolen, A.J. und H. Kuipers (1983): Agricultural soil mechanics. - Springer, Berlin.
- Kremer, J., D. Matthies und M. Ziesack (2000): Ökokontrolling für den Maschineneinsatz. - AFZ/Der Wald 18-19, 1011 - 1012.
- KTBL (Hrsg., 1986): Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.: Bodenverdichtungen, Schrift 308, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.
- KTBL (Hrsg., 1995): Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.: Bodenverdichtungen, Schrift 362, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.
- KTBL (Hrsg., 1998): Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.: Bodenbearbeitung und Bodenschutz, Arbeitspapier 266, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.
- Langmaack, M., R. Röhrig und S. Schrader (1996): Einfluß der Bodenbearbeitung und Bodenverdichtung auf terrestrische Oligochaeten (Enchytraeidae und Lumbricidae) landwirtschaftlicher Nutzflächen. - Braunschw. Naturkd. Schr. 5, 105 - 123.
- Larink, O., C. Heisler, W. Söchtig, B. Lübben und L. Wickenbrock (1995): Einfluß verdichteter Ackerböden auf die Bodenfauna und ihr Beitrag zur Bodenlockerung. - KTBL-Schrift 362, 142 - 156.
- Larson, W.E. und S.C. Gupta (1980): Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. - Soil Sci. Soc. Amer. J. 44, 1127 - 1132.

- Larson, W.E., Blake, G.R., Allmaras, R.R., Vorhees, W.B. und Gupta, S.C. (Hrsg., 1989): Mechanics and related processes in structured agricultural soils. NA-TO ASI-Series, E: Applied Sciences (172).
- Lebert, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. – Bayreuther Bodenkundl. Berichte 12, Universität Bayreuth.
- Lebert, M. (1991): Stabilitätseigenschaften rekultivierter Böden aus Löß im Rheinischen Braunkohlen-Tagebaurevier. – Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 66, (I), 165 – 168.
- Lebert, M. und R. Horn (1992): Ein Verfahren zur flächendeckenden Erfassung der Bodenstabilität im Hinblick auf die Beurteilung der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. – Z. Kulturtechnik u. Landentwickl. 33, 85 – 99.
- Lebert, M. und G. Springob (1994): Zur Rekultivierung von Lößböden (II): Wirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Unterbodenstruktur junger, planierter Flächen. – Z. f. Kulturtechnik u. Landentw. 35, 300 – 310.
- Lebert, M. und H. Stahl (2001): Auswirkungen der ackerbaulichen Nutzung von Bergbaufolgeflächen auf die Bodenfunktionen sowie die Wirtschaftlichkeit. – Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 6 (5): 1 – 32.
- Lemon, E. R. und A.E. Erickson (1952): The measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum microelectrode. – Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 16, 160 – 163.
- Lindner, H. (1964): Bodenphysikalische Untersuchungen über den Einfluss verschiedener Pflugkörper bei unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten auf einige Eigenschaften des Bodens. – Habilitationsschrift 118, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät der Humboldt-Universität, Berlin.
- Lüth, H.-G. (1993): Entwicklung des Längs-Penetrographen als Meßverfahren zur Bodenverdichtung. – Dissertation Universität Kiel, MEG-Schrift 235.
- Lütke-Entrup, N. und J. Öhmichen (Hrsg., 2000): Lehrbuch des Pflanzenbaus, Band 1: Grundlagen. – Th. Mann, Gelsenkirchen.
- Matthies, D. (1998): Das „Richtlinienhandbuch“ für den bodenverträglichen Maschineneinsatz im Wald. – Forsttechnische Informationen (FTI) 3, 23 – 29.
- Mückenhausen, E. (1963): Form, Entstehung und Funktion des Bodengefüges. Z. Kulturtechnik u. Flurber. 4, 102 – 114.
- Newmark, N.M. (1942): Influence charts for computation of stress in elastic foundations. – Eng. Exp. Stat. Bull. Series No. 338, Univ. of Illinois Bull. 40 (2), Urbana.
- Nichols, T.A., A.C. Bailey, C.E. Johnson und R. Grisso (1987): A stress state transducer for soil. – Transactions ASAE 30, 1237-1241.
- Nissen, B. (1999): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland – bodenphysikalischer Ansatz. – Schriftenreihe Inst. Pflanzenern. u. Bodenk. der CAU Kiel, 50, 159 pp.

- NLfB (1997): Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.): Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS), Auswertungsmethoden im Bodenschutz, Hannover 1997.
- Ohde, J. (1951): Grundbaumechanik, 27. Auflage, III. – W. Ernst & Sohn, Berlin.
- Olfe, G. und H. Schön (1986): Bodenbelastung durch Schlepper- und Maschineneinsatz in der Landwirtschaft. KTBL-Schrift 308: Bodenverdichtungen, 35 – 48.
- Paul, R. (1990): Korrelative Beziehungen zwischen Makrogasdiffusion und anderen Bodenparametern. – Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd., Berlin 34, 5 – 12.
- Paul, R. (1999): Zur Verdichtungsgefährdung im Rahmen des Bodengefügeschutzes auf großen Flächen. In: Einfluss der Großflächen-Landwirtschaft auf den Boden. – Thüriger Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, 54 – 59.
- Paul R. und D. Werner (1986): Abhängigkeit der Makrogasdiffusion von der Bodenstruktur. – Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd., Berlin 30, 681 - 687.
- Petelkau, H. (1984): Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sowie Maßnahmen zu ihrer Minderung. – Tag.-Ber. Akademie Landwirtschaftswiss. DDR, Berlin, 227, 25 – 34.
- Petelkau, H (1985): Grundlagen für die Steuerung der Bodenbearbeitung unter Produktionsbedingungen zur Aufwandsminderung bei der Grundbodenbearbeitung und Qualitätsverbesserung bei der Saatbettbereitung. – Forschungszentrum f. Bodenfrucht. d. AdL der DDR, F/E-Ber. G4.
- Petelkau, H. (1989): Arbeiten zur Mechanisierung der Pflanzen- und Tierproduktion Schlieben 6: 43, 93 – 114.
- Petelkau, H. und M. Dannowski (1990): Effect of repeated vehicle traffic in traffic lanes on soil physical properties, nutrient uptake and yield of oats. – Soil & Tillage res., 15, 217 – 225.
- Petelkau, H., K. Seidel, Cl.-R. Gätke und M. Dannowski (1988): Prinziplösung für die Steuerung der Grundbodenbearbeitung. – FZB-Report Müncheberg 1988, 86 – 93.
- Petelkau, H., K. Seidel und M. Frielinghaus (2000): Ermittlung des Verdichtungswiderstandes von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen. - Abschlußbericht zum Werkvertrag Nr. 350.214 des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg.
- Plagge, R. (1991): Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Boden. Bodenökologie und Bodengenese 3, Technische Universität Berlin.
- Prange, B. (1960): Neuartiges Verfahren zur Messung bodenmechanischer Zustandsgrößen. – Der Bauingenieur 10, 389.

- Pytko, J. und J. Dabrowski (2001): Determination of the stress-strain relationship for sandy soil in field experiments. *J. Terramechanics* 38, 185 – 200.
- Renger, M. (1970): Über den Einfluss der Dränung auf das Gefüge und die Wasserdurchlässigkeit bindiger Böden. – *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 11, 23 – 28.
- Rogasik, H. (1990): Beitrag zur Klärung kausaler Zusammenhänge zwischen Verformungsparametern, pneumatischer Leitfähigkeit und Durchdringungswiderstand von Volumenproben sandiger Bodensubstrate unterschiedlicher Ausgangslagerungsdichte. – *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk.*, Berlin 34, 731 – 740.
- Roscoe, K.H., A.N. Schofield und C.P. Wroth (1958): On the yielding of soils. – *Geotechnique* 8, 22-53.
- Ruhm (1984) zitiert in Sommer, 1985.
- Schäfer-Landefeld, L. und R. Brandhuber (2001): Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Vorbelastung von Böden – ein tragfähiges Konzept? – *Bodenschutz* 6 (2), 48 – 52.
- Scheffer, F. und P. Schachtschabel (Hrsg., 1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*, 14. Auflage. – Enke, Stuttgart.
- Schindler, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. – *Arch. Acker- Pflanzenbau u. Bodenk.*, Berlin 24, 1 – 7.
- Schlichting E., H.-P. Blume und K. Stahr (1995): *Bodenkundliches Praktikum*, 2. Auflage. Blackwell, Wien.
- Schneider, R. (1994): Gefügeentwicklung in Neulandböden aus Löss und Hafenschlick und deren Auswirkungen auf bodenphysikalische und –mechanische Parameter. – *Berichte aus der geowissenschaft, Shaker Aachen*, 210 pp.
- Schröder, D., S. Stephan und H. Schulte-Karring (1985): Eigenschaften, Entwicklung und Wert rekultivierter Böden aus Löss im Gebiet des Rheinischen Braunkohlenrevier-Tagebaus. – *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 148, 131 – 146.
- Selige, T (1997): Flächenhafte Diagnose von Standorteigenschaften rekultivierter Böden mittels Bioindikation und digitaler flugzeuggestützter Fernerkundung. – *Dissertation Universität Gießen*.
- Semmel, H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. – *Schriftenreihe Inst. Pflanzenern. u. Bodenk. der CAU Kiel*, 26, 183 pp.
- Semmel, H. und R. Horn (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.

- Soane, B.D. und C. van Ouwerkerk (Hersg., 1994): Soil compaction in crop production. Elsevier, Amsterdam.
- Söhne, W. (1951): Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung. – Grndl. d. Landtechnik, 9. Konstr.-Heft (1), 87-94.
- Söhne, W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. – Grndl. d. Landtechnik 5, 49-63.
- Söhne, W. (1958): Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. – Agric. Eng. 39, 272-281, 290.
- Sommer, C. (1985): Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung.- Landtechnik 9, 378-384.
- Sommer, C. (1998): Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. – Bodenschutz 1, 12 – 16.
- Sommer, C und K. Ziemer (1978): Zur messtechnischen Erfassung des Eindringwiderstandes von Böden. – Messtechnische Briefe 14, 58 – 61.
- Sommer, C., E. Ruhm und H.-J. Altemüller (1981): Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenertrag. – Kali-Briefe 15 (7), 429 – 448.
- Sommer, C., H.J. Dürr und M. Zach (1995): Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf den Pflanzenertrag und Schlußfolgerungen aus der Sicht des Bodenschutzes. – KTBL-Schrift 362 (Bodenverdichtungen), 176 – 188.
- Sommer, C., K. Walter, M. Lebert, L. Jaklinski und B. Jasinski (2001): Effiziente und bodenschonende Triebkraftübertragung vom Reifen zum Boden – Landtechnik 5, 316-317.
- Sommer, C., J. Brunotte und B. Ortmeier (2001): Bodenverdichtung – Felduntersuchungen zu Lösungsansätzen. – Zuckerrübe 50 (6), 364 - 371.
- Stahl, H. (2000): Zur Frage der Wirtschaftlichkeit des Ackerbaus auf Kippen. – In: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Landwirtschaft auf Rekultivierungsflächen, 57 – 60.
- Stahl, H. und M. Lebert (2000): Wurzeln erschließen den Boden. – In: Landwirtschaft auf Rekultivierungsflächen, Sächs. Landesanstalt f. Landwirtschaft, Dresden.
- Stahl, H. und U. Gierke (2001): Analyse zum Lasteintrag in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben. – Teilbericht I des Zwischenberichts zum Forschungsvorhaben der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden: Auswirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf die Fruchtbarkeit sächsischer Ackerböden unter Berücksichtigung der im Programm UL geförderten Maßnahmen zum physikalischen Bodenschutz.
- Stepniewski, W. (1981): Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. II. Oxygen diffusion coefficient. – Pol. J. Soil Sci. 14 (1), 3 – 13.

- Strobel, P. (1989): Untersuchungen zur Abschätzung der potenziellen Verdichtungs-empfindlichkeit von Böden unter Berücksichtigung der Auswertung von Bodenkarten. – Diplomarbeit Geogr. Inst. der Uni Hannover (unveröffentlicht).
- Taylor, S.A. (1949): Oxygen diffusion in porous media as a measurement of soil aeration. – Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14, 55 – 61.
- Tenholtern, R. (2000): Bodengefüge, Durchwurzelung und Ertrag als Indikatoren für Lockerungsbedürftigkeit und Lockerungserfolg auf rekultivierten Standorten im rheinischen Braunkohlenrevier. – Boden und Landschaft 28, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Terzaghi, K. und P. Jelinek (1954): Theoretische Bodenmechanik. Springer Berlin, Heidelberg.
- TGL 24 300/05 (1977): Fachbereichsstandard der DDR – Standortaufnahme von Böden. Körnungsarten und Skelettgehalt. – Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin.
- TGL 24300/19 (1986): Aufnahme landwirtschaftlich genutzter Standorte, Bodengefüge von Mineralböden. – Akademie der Landwirtschaftswiss. der DDR, Berlin.
- Thiere, J., M. Altermann, I. Lieberroth und D. Rau (1991): Zur Beurteilung landwirtschaftlicher Nutzflächen nach technologisch wirksamen Standortbedingungen. – Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk., berlin 35, 171 – 183.
- Tijink, F. G. J. (2003): Technical guidelines to avoid soil compaction in cropping systems with sugar beet. – Landbauforschung Völkenrode SH 256, 39 – 47.
- VDLUFA (1991): Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Vorderbrügge, Th. (1989): Einfluss des Bodengefüges auf die Durchwurzelung und den Ertrag bei Getreide – Untersuchungen an rekultivierten Böden und einem Bodenbearbeitungsversuch. – Gießener Bodenkundl. Abhandlungen (5), Inst. f. Bodenkunde und Bodenerhaltung der Universität Gießen.
- Weißbach, M. (1998): Flächenbonitur mit dem Horizontalpenetrometer. – Landtechnik 53 (2/98), 68 – 69.
- Weißbach, M. (2001): Neue Reifenkonzepte zur Bodenschonung. – Landtechnik 56, 72 – 73.
- Wendroth, O. (1990): Koeffizienten des Wasser- und Gastransportes zur Ableitung von Kenngrößen des Bodengefüges. – Dissertation Fachbereich Agrarwissenschaften der Universität Göttingen.
- Werner, D. und W. Thämert (1989): Zur Diagnose des physikalischen Bodenzustands auf Produktionsflächen. – Arch. Acker- Pflanzenb. Bodenk., Berlin 33, 729 – 739.
- Werner, D. und R. Paul (1999): Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. – Wasser und Boden 51(12): 10-14.
- Wesseling, J. (1974): Crop growth in wet soils. In: Drainage for agriculture. – Agronomy 17, 7 – 37.

- Wiermann, C. (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Stabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. – Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenern. u. Bodenk. Universität Kiel, 45, 191 pp.
- Wollny, E. (1893): Untersuchungen über die Permeabilität des Bodens für Luft. – Forsch. Gebiete Agr.-Phys. 16, 193 – 222.
- UGT (1999): Kennzeichnung des Porensystems im Strömungsversuch. – Schriftliche Mitteilung Umwelt – Geräte – Technik GmbH, Müncheberg.
- Zakosek, H. (1960): Abhandlungen Hess. Landesamt f. Bodenforschung, 32, Wiesbaden.
- Zausig, J. (1994): Wasser- und Sauerstoffhaushalt sowie Redoxverhältnisse einzelner Boden-aggregate eines Pelosol-Gleys und eines Braunen Auenbodens. – Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde 29, Universität Kiel.

Danksagung:

Die Autoren danken dem projektbegleitenden Arbeitskreis für die gewährte, fachliche Unterstützung. Besonderer Dank gilt den Herren Dr. König (MUNLV, NRW) und Dr. Tenholtern (LfUG, Sachsen) für die Vorschläge bei der Erstellung des Fließschemas Bodenverdichtung in Abbildung 1.