

TEXTE

51/2010

Entwicklung eines Prüfungskonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Förderkennzeichen 3707 71 202
UBA-FB 001417

Entwicklung eines Prüfkonzepthes zur Erfassung der tatsächlichen Verdich- tungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden

von

Dr. Matthias Lebert

Ingenieurbüro für Bodenphysik, Kiel

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4027.html>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Stephan Marahrens

Dessau-Roßlau, Oktober 2010

Berichtsnummer 1. UBA-FB 001417	2.	3.
4. Titel des Berichts Entwicklung eines Prüfkonzepthes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Lebert, Matthias	8. Abschlußdatum 23.03.2010	
	9. Veröffentlichungsdatum Oktober 2010	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Dr. Matthias Lebert Ingenieurbüro für Bodenphysik Gutenbergstr. 26 D-24118 Kiel	10. UFOPLAN-Nr. / Förderkennzeichen (FKZ) 3707 71 202	
	11. Seitenzahl 96	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau	12. Literaturangaben 77	
	13. Tabellen 35	
	14. Abbildungen /Karten 43	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Im Vorhaben wurden bodenphysikalische Analysendaten von 1300 Ackerböden aus dem Bundesgebiet ausgewertet und eine Methode zur Herleitung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung von Unterböden in 4 Schritten erstellt. Im ersten Schritt wurde die Vorbelastung bei einer Bodenfeuchte von pF 1,8 über Pedotransferfunktionen geschätzt, die zuvor auf Plausibilität geprüft worden waren. Über die Vorbelastung wurde die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit definiert und klassifiziert. Es wurde ein vereinfachter Schätzrahmen für die Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte hergeleitet. Zu- und Abschläge auf die Klassen wurden erhoben in Abhängigkeit von Skelettgehalt, Verfestigungsgrad, Bodenform und dem aktuellen Bodenwassergehalt in % Feldkapazität. Eine Kartendarstellung erfolgte über die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte (BÜK 1000 N). Im zweiten Schritt wurden die Gefügeeigenschaften unter Aspekten der Bodenverdichtung in Abhängigkeit von den Kenngrößen Luftkapazität, gesättigte Wasserleitfähigkeit und effektive Lagerungsdichte klassifiziert, hergeleitet und über die BÜK 1000 N dargestellt. Im dritten Schritt wurden die Klassen für die Verdichtungsempfindlichkeit bei unterschiedlichem Bodenwassergehalt mit den Klassen der Gefügeeigenschaften verrechnet und daraus die Gefährdung von Bodenfunktionen klassifiziert, hergeleitet und über die BÜK 1000 N dargestellt. 68% der Ackerflächen haben bei einer Bodenfeuchte von pF 1,8 eine hohe bis sehr hohe Gefährdung der Bodenfunktionen durch Verdichtung im Unterboden. Bei einem Bo-		

denwassergehalt von 80 % Feldkapazität sind es noch 32%.

Im vierten Schritt wurden die Unterbodenbelastungen durch landwirtschaftliche Verfahren und Maschinen aus Literaturangaben bestimmt, die in 40 cm Bodentiefe als vertikale Spannungen typischerweise auftreten. In einem erweiterten Vorbelastungskonzept können die Auswirkungen üblicher Verfahren auf das Bodenverdichtungsverhalten hergeleitet werden.

Das Konzept liefert eine Grundlage zur Herleitung des Handlungsbedarfs im Bodenschutz sowohl auf der Planungs- als auch auf der Beratungsebene. Die großen Flächenanteile hoch verdichtungsgefährdeter Böden sind ein deutlicher Hinweis auf einen erweiterten Handlungsbedarf.

17. **Schlagwörter**

Bodenverdichtung, Vorbelastung, Verdichtungsempfindlichkeit, Verdichtungsgefährdung, Gefügebewertung, Bodendruck

18. **Preis**

19.

20.

1. Report No.: UBA-FB 001417	2.	3.
4. Report Title Development of a test concept to assess the real vulnerability to compaction of agricultural soils		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Lebert, Matthias	8. Report Date 23.03.2010	
	9. Publication Date October 2010	
6. Performing Organisation (Name, Address) Dr. Matthias Lebert Ingenieurbüro für Bodenphysik Gutenbergstraße 26 D-24118 Kiel	10. UFOPLAN-No. (FKZ) 3707 71 202	
	11. No. of Pages 96	
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau	12. No. of References 77	
	13. Tables 35	
	14. Figures and Maps 43	
15. Supplementary Notes		
16. Abstract In the project, the analysed soil physical data of 1300 agricultural soils from Germany were evaluated in order to set up a method to derive the real vulnerability of subsoils to compaction within 4 steps. In the first step, the pre-compression stress at the soil moisture of pF 1,8 was assessed by pedotransfer functions, which had been checked for plausibility before. By the pre-compression stress the mechanical susceptibility to compaction was defined and classified. A simplified scheme for the assessment of the susceptibility to compaction was found, depending on soil texture and packing density. Additions and reductions on the class of susceptibility were raised, depending on the amount of skeleton, the degree of hardening, soil genetics and the actual soil water content in % field capacity. The results were mapped in the 1:1.000.000 scale. In the second step, soil structural quality of subsoils under the view of soil compaction according to the properties air capacity, saturated water conductivity and packing density was classified, derived and mapped in the 1:1.000.000 scale. In the third step, vulnerability to compaction was derived by calculating an average of the classes of the soil moisture depending mechanical susceptibility to compaction and the classes of soil structural quality and was classified and mapped in the 1:1.000.000 scale. 68% of the agricultural area has high or very high vulnerability to subsoil compaction at the soil moisture of pF 1,8. At the water content of 80% field capacity this area is reduced to 32%. In the fourth step, the typical, vertical subsoil stresses at 40 cm depth, induced by agricul-		

tural techniques and machinery, were determined by evaluation of data taken from literature. In an extended concept of pre-compression stress, the effects of common techniques on soil compaction can be derived.

The concept enables the planning authorities and the advisory bodies to derive the necessary level of actions against soil compaction. The large area of soils with high vulnerability to compaction is a strong signal for actions needed beyond the actual common strategies.

17. Key Words

soil compaction, pre-compression stress, susceptibility, vulnerability, soil structure, soil stresses

18. Price

19.

20.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	12
2. Material und Methoden	13
2.1. Datenbeschaffung und –aufbereitung.....	13
2.2. Analysemethoden	16
2.3. Methoden zur Bestimmung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit.....	17
2.3.1. Vorbelastung.....	17
2.3.2. Druckbelastbarkeit.....	18
2.3.3. Schadverdichtungsgefährdungsklassen	19
2.3.4. Sm nach NIBIS	20
2.3.5. Auswahl der geeigneten Methode	21
2.4. Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung	23
2.4.1. Vorhandene Modelle	23
2.4.2. Kritik an den Modellen.....	25
3. Ergebnisse	26
3.1. Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit	26
3.1.1. Plausibilitätsprüfung der Pedotransferfunktionen	26
3.1.1.1. Zu erwartende Tendenzen und Größenordnungen.....	26
3.1.1.2. Abgleich mit den Schätzwerten	30
3.1.2. Schätzung der Vorbelastung mit Pedotransferfunktionen	38
3.1.3. Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit.....	45
3.1.3.1. Klassifizierung	45
3.1.3.2. Schätzrahmen nach Bodenart und effektiver Lagerungsdichte	46
3.1.3.3. Zu- und Abschläge nach bodenkundlichen Kriterien	47
3.1.3.4. Zu- und Abschläge nach Bodenwassergehalt	48
3.1.4. Regionalisierung.....	50
3.2. Gefügeeigenschaften	55
3.2.1. Klassifizierung und Herleitung.....	55
3.2.2. Regionalisierung.....	64
3.3. Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung	66
3.3.1. Klassifizierung und Herleitung.....	66
3.3.2. Regionalisierung.....	68
3.4. Druckbelastung im Unterboden durch Landmaschinen	74
3.4.1. Theoretische Hintergründe	74
3.4.2. Abschätzung der Unterbodenbelastung für das Vorbelastungskonzept	78
4. Diskussion	81
5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	86
6. Schlussfolgerungen	87
7. Zusammenfassung.....	88
Literatur	91
Anhang	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ermittlung der Vorbelastung aus dem Drucksetzungsversuch nach dem graphischen Verfahren von Casagrande (1936)	17
Abbildung 2: Beispiel für die Ableitung der Druckbelastbarkeit als vertikale Spannung im Konzept Belastungsquoziert nach Werner und Paul (1999) für den Unterboden aus einem Nomogramm nach Merkblatt DVWK 235 (1997) für das Abgreifen der Luftkapazität in Abhängigkeit von der Bodenart und der Bodenfeuchte.....	19
Abbildung 3: Einteilung der Böden in Schadverdichtungsgefährdungsklassen in Abhängigkeit von der Bodenart nach Petelkau et al. (2000).....	19
Abbildung 4: Wieder und Erstverdichtungsverhalten von Bodenproben im konsolidierten, drainierten Oedometertest (a: lineare und b: logarithmische Spannungsachse, aus Lebert und Horn, 1994).....	21
Abbildung 5: Bundesweit typische Messwerte für die Vorbelastung von Unterböden bei pF 1,8 für Sande in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte	27
Abbildung 6: Bundesweit typische Messwerte für die Vorbelastung von Unterböden bei pF 1,8 für Schluffe in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte	27
Abbildung 7: Bundesweit typische Messwerte für die Vorbelastung von Unterböden bei pF 1,8 für Lehme in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte.....	28
Abbildung 8: Bundesweit typische Messwerte für die Vorbelastung von Unterböden bei pF 1,8 für Tone in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte.....	28
Abbildung 9: Übersicht der Ausgleichsgeraden der Trends des Zusammenhangs zwischen Trockenrohdichte und gemessener Vorbelastung bei pF 1,8 für unterschiedliche Bodenarten aus den Abbildungen 5 – 8.....	30
Abbildung 10: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Reinsande und Lehmsande ohne SI3 (Ss, St2, SI2, Su2).....	31
Abbildung 11: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Schluffsande, Sandlehme und SI3 (SI3,4, Su3,4, Slu, St3)	32
Abbildung 12: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Schluffe (gesamt)	33
Abbildung 13: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Lehme (gesamt).....	34
Abbildung 14: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Tone (gesamt).....	35
Abbildung 15: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Reinsande in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	39
Abbildung 16: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Lehmsande (ohne SI3) in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	39
Abbildung 17: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Schluffsande in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	39
Abbildung 18: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Sandlehme und SI3 in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	40

	Seite
Abbildung 19: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Sandschluffe in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	40
Abbildung 20: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Lehmschluffe in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	40
Abbildung 21: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Tonschluffe in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	41
Abbildung 22: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Normallehme in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	41
Abbildung 23: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Tonlehme in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	41
Abbildung 24: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Schlufftone in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	42
Abbildung 25: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Lehmtone in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)	42
Abbildung 26: Korrekturfaktor für die Berechnung der Vorbelastung bei unterschiedlichen Wassergehalten auf der Basis der Vorbelastung bei pF 1,8 (aus Rücknagel, 2006)	49
Abbildung 27: Vereinfachtes Spannungsmodell nach Söhne (1953) für den Unterboden	74
Abbildung 28: Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche eines Radialreifens (650/65R30.5) bei einer Radlast von 60 kN in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck (50, 100 und 240 kPa, aus Schjønning et al., 2008)	75
Abbildung 29: Gemessene vertikale Spannungen (Dreiecke) im Vergleich zu berechneten Werten mit (durchgezogen) und ohne (gestrichelt) Berücksichtigung der Spannungsverteilung innerhalb der Reifenkontaktfläche (Reifen: 800/60-38, Radlast: 80 kN, Reifeninnendruck: 220 kPa, nach Keller, 2005)	76
Abbildung 30: Geometrische Komponenten zur Berechnung des vertikalen Druckes (σ_z) unter der Lotrechten einer kreisrunden Kontaktfläche nach dem vereinfachten Modell von Söhne (1953) und nach Newmark (1935) und deren Konsequenzen bei einer Erhöhung der Radlast bei gleich bleibendem Kontaktflächendruck	76
Abbildung 31: Gemessene vertikale Spannungen in 40 cm Bodentiefe, dargestellt in Abhängigkeit von a) Radlast (kN), b) Reifeninnendruck (kPa) und c) mittlerem Kontaktflächendruck (kPa) (nach Stahl et al., 2005)	77
Abbildung 32: Darstellung des kompletten Vorbelastungskonzeptes als Treppenschema für die nutzungsabhängige Verdichtungsprognose in Abhängigkeit vom Bodendruck in 40 cm Tiefe und der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten (verfahrenstypischer, vertikaler Druck in 40 cm Tiefe nach Stahl et al., 2005)	79
Abbildung 33: Beispiel für die Herleitung der für eine verdichtungsfreie Rübenernte notwendigen Austrocknung von Parabraunerden aus Löß mit unterschiedlicher Bodenart (Ut3, Ut4) anhand des Vorbelastungskonzeptes	80

Kartenverzeichnis

Karte 1: Lage der Bodenprofile mit Analysendaten in der Übersicht (ohne Flächenbodenformen in Brandenburg).....	14
Karte 2: Darstellung der potenziellen, mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000).....	51
Karte 3: Darstellung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik bei einem Bodenwassergehalt von 80% Feldkapazität (FK) über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000).....	52
Karte 4: Darstellung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik bei einem Bodenwassergehalt von 70% Feldkapazität (FK) über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000).....	53
Karte 5: Darstellung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik bei einem Bodenwassergehalt von 60% Feldkapazität (FK) über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000).....	54
Karte 6: Gefügeeigenschaften der Unterböden von Ackerflächen der Bundesrepublik, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)	65
Karte 7: Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von pF 1,8, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000).....	69
Karte 8: Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von 80% Feldkapazität, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000).....	70
Karte 9: Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von 70% Feldkapazität, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000).....	71
Karte 10: Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von 60% Feldkapazität, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000).....	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der von den Ländern bereitgestellten Datensätze von Unterböden der Ackerflächen.....	15
Tabelle 2: Potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit (Sm) als Grundeinstufung in Abhängigkeit von der Bodenart nach NIBIS.....	20
Tabelle 3: Vergleichender Überblick der Kenngrößen zur Bewertung und Herleitung der Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerböden.....	22
Tabelle 4: Pedotransferfunktionen verschiedener Ansätze zur Schätzung der Vorbelastung bei pF 1,8 (Pv) und deren Stratifizierung in Bodenartenuntergruppen (Erläuterungen der Kürzel in Tabelle 5).....	23
Tabelle 5: Eingangsvariablen der Pedotransferfunktionen aus Tabelle 4, deren Kürzel und Dimension	24
Tabelle 6: Statistische Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen den Messwerten zur Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 und der Trockenrohdichte (TRD).....	29
Tabelle 7: Für die Ackerböden Deutschlands geeignete Regressionsansätze zur Schätzung der Vorbelastung bei pF 1,8 in Abhängigkeit von der Bodenart.....	37
Tabelle 8: Statistische Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen den Schätzwerten der Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 nach den Pedotransferfunktionen aus Tabelle 7 und der Trockenrohdichte (TRD).....	37
Tabelle 9: Gruppierung der Bodenarten für die Auswertung in Bodenarten-Gruppen (* = Abweichung gegenüber KA5, 2005)	38
Tabelle 10: Statistische Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen Schätzwerten zur Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 nach den geeigneten Pedotransferfunktionen aus Tabelle 7 und der effektiven Lagerungsdichte (LD).....	43
Tabelle 11: Einstufung und Klassenmittelwerte der effektiven Lagerungsdichte von Mineralböden nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, 2005).....	43
Tabelle 12: Mittelwerte der effektiven Lagerungsdichte der Untersuchungsböden in den verschiedenen Klassen für die effektive Lagerungsdichte (* = Klassenmittelwert nach Tabelle 8 nicht repräsentativ).....	44
Tabelle 13: Aus den Ausgleichsgeraden der Abbildungen 15 bis 25 berechnete Vorbelastung bei pF 1,8 in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte (LD), durch Einsetzen des repräsentativen LD-Wertes der jeweiligen LD-Klasse	45
Tabelle 14: Einstufungen der Vorbelastung nach DIN Vornorm 19688 und DVWK Merkblatt 234.....	46
Tabelle 15: Einstufung der Vorbelastung und Ableitung von Klassen der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit (nach Lebert und Schäfer, 2005)	46
Tabelle 16: Schätzrahmen für die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 für Ackerböden in Deutschland in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte LD (in Klammern: extrapolierte Werte, die im Datenbestand nicht vorkommen).....	47
Tabelle 17: Zu- und Abschlüge in Klassen auf die mechanische Verdichtungs-empfindlichkeit nach Tabelle 16	48
Tabelle 18: Abschlüge in Klassen auf die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 nach Tabelle 16 in Abhängigkeit vom Wassergehalt in % Feldkapazität (FK).....	49
Tabelle 19: Flächenanteile der verschiedenen Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit bei unterschiedlichem Bodenwassergehalt.....	55
Tabelle 20: Kriterien für einen Gefügeschaden nach Lebert et al. (2004).....	56

	Seite
Tabelle 21: Klassifizierungen der Parameter effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, 2005).....	56
Tabelle 22: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Sanden.....	57
Tabelle 23: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Geschieben.....	57
Tabelle 24: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Fluss-, Auen- und Terrassenablagerungen	58
Tabelle 25: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Hochflut- und Deckablagerungen	58
Tabelle 26: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Verwitterungen und Hangablagerungen.....	59
Tabelle 27: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Löss- und Lösslehm	59
Tabelle 28: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus verschiedenen Lössvariationen	60
Tabelle 29: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Schwemm- und Kolluvialablagerungen	60
Tabelle 30: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Meeres-, Becken- und Seeablagerungen sowie aus Sandschluffen	61
Tabelle 31: Klassifizierung der Gefügeeigenschaften im Vorhaben im Hinblick auf die Verdichtungsgefährdung von Unterböden ackerbaulich genutzter Flächen (modifizierte Klasseneinteilung der KA 5)	62
Tabelle 32: Herleitung der Gesamtklasse der Gefügeeigenschaften aus den Klassen für die effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden nach Tabelle 31	63
Tabelle 33: Klassifizierung der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung anhand der Verdichtungsempfindlichkeit und den Gefügeeigenschaften.....	66
Tabelle 34: Beispiele für die Herleitung der Klasse der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung.....	67
Tabelle 35: Flächenanteile der verschiedenen Klassen der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung bei unterschiedlichem Bodenwassergehalt.....	73

1. Einleitung

Bodenverdichtungen in der Landwirtschaft stellen eine Gefährdung von Bodenfunktionen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen dar. Insbesondere unterhalb der Lockerungstiefe, im Unterboden von ca. 30 – 60 cm Bodentiefe, können sich Verdichtungen akkumulieren und die Bodenfunktionen beeinträchtigen. Die Folgen eines geschädigten Bodengefüges können sehr vielschichtig sein. Verdichtete Böden neigen stärker zur Vernässung, da das Niederschlagswasser nicht schnell genug abgeführt und bei einer Wasserauffüllung des Porensystems die Bodenluft schnell aus den verringerten Grobporen verdrängt wird. Ein dadurch reduziertes Sauerstoffangebot kann das Wurzelwachstum und den Ertrag beeinflussen. Eine Verdichtung erhöht auch den mechanischen Widerstand für die Pflanzenwurzeln und kann so das Wachstum hemmen. Eine beeinträchtigte Wasseraufnahme des Bodens und eine verringerte Grundwasserneubildung fördern den Oberflächenabfluss und die Erosion. Bei extremen Niederschlägen kann die Bodenverdichtung deshalb auch das Auftreten von Hochwasserereignissen fördern. Vernässte Böden haben auch eine höhere Emission von Treibhausgasen und können damit zum Klimawandel beitragen.

Im Bundes-Bodenschutzgesetz wird gefordert, Bodenverdichtungen im Rahmen der guten fachlichen Praxis so weit wie möglich zu vermeiden (BBodSchG, 1998). Regelungen zur Gefahrenabwehr in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) gibt es für die Bodenverdichtung bisher nicht, da eine Festlegung auf Prüf- und Maßnahmenwerte bisher nicht erfolgen konnte (Lebert und Böken, 2004). Daher ist es besonders wichtig, Bodenverdichtungen im Rahmen der Vorsorge effektiv vorzubeugen. Es fehlt jedoch bisher eine Ableitung effektiver Handlungsempfehlungen aus Konzepten, die sowohl das standortspezifische Risiko als auch die Belastungsfaktoren durch die landwirtschaftliche Verfahrenstechnik berücksichtigen. Die Empfehlungen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen durch die gute fachliche Praxis konzentrieren sich auf technische Aspekte, z.B. das Einstellen des Reifeninnendrucks auf die Empfehlungen der Reifenhersteller (VDI Richtlinie 6101, 2007). Mit reinen Empfehlungen zur Fahrwerksbeschaffenheit können aber sowohl den standörtlichen Unterschieden als auch den Wirkungen der Fahrzeugmassen auf die Bodenbelastung im Unterboden nicht Rechnung getragen werden. Das bodenspezifische Verdichtungsverhalten im Unterboden bleibt bei den praktischen Handlungsempfehlungen zumeist unberücksichtigt. Die Forderungen des Bundes-Bodenschutzgesetzes können deshalb derzeit nur unvollständig erfüllt werden.

Prüfkonzepte zur Herleitung des Verdichtungsverhaltens von Ackerböden in Abhängigkeit von der Verdichtungsempfindlichkeit und dem Bodendruck sind zwar vorhanden, sind aber für einen Einsatz im Bodenschutz noch teilweise unvollständig. So berücksichtigt z.B. das Vorbelastungskonzept nach Horn et al. (1991) zwar die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit bei einem hohen Bodenwassergehalt im Bereich der Feldkapazität, eine Bewertung des Bodens bei höherer Austrocknung kann aber nicht erfolgen. Darüber hinaus sind die erforderlichen Eingangsgrößen, wie die Vorbelastung oder der Bodendruck im Unterboden für eine Anwendung häufig nicht verfügbar. Pedotransferfunktionen zur Herleitung der Vorbelastung werden zwar in DVWK Merkblatt 234 (1995) und 901 (2002) sowie DIN Vornorm 19688 (2001) angeboten. Sie sind jedoch für eine bundesweite Anwendung nicht validiert und nur von Fachspezialisten anwendbar, die Erfahrung haben im Umgang mit der Einordnung von bodenmechanischen Kenngrößen. Eine breite Anwendbarkeit von Prüfkonzepten zur Bodenverdichtung ist demzufolge bislang nicht gegeben.

Ziel des Vorhabens ist ein Prüfkonzert zu erstellen, das für eine bundesweite Anwendbarkeit geeignet ist und über die bisherigen Betrachtungen einer potenziellen Bewertung hinausgeht. Durch Berücksichtigung möglichst vieler Einflussfaktoren soll die Bewertung einer tatsächlichen Verdichtungsgefährdung ermöglicht werden. Hierzu werden folgende Schritte für erforderlich gehalten:

- o Plausibilitätsprüfung von Pedotransferfunktionen für eine bundesweit gültige Schätzung der mechanischen Vorbelastung bei einer Bodenfeuchte von $pF_{1,8}$
- o Erstellung eines Schätzrahmens zur Herleitung der aus der Vorbelastung resultierenden mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit und deren Darstellung in Bodenkarten
- o Bewertung und Darstellung des Einflusses der Bodenfeuchte auf die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit
- o Bestimmung der verdichtungsrelevanten Gefügeeigenschaften von bundesweit repräsentativen Ackerflächen und deren Darstellung in Bodenkarten
- o Herleitung der Gefährdung von Bodenfunktionen aus der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit und den Gefügeeigenschaften und deren Darstellung in Bodenkarten
- o Herleitung des verfahrensabhängigen Bodendruckes im Unterboden

Karten zur Darstellung der Verdichtungsgefährdung sind im Vorhaben von besonderem Interesse. Sie sind ein wesentliches Instrument um die Dringlichkeit und den erforderlichen Umfang des Handlungsbedarfs im vorsorgenden Bodenschutz gegen Verdichtungen nachvollziehbar einzuschätzen. Bislang fehlen solche Übersichten.

Es wird hier noch einmal ausdrücklich daraufhin gewiesen, dass sich die im Folgenden dargestellten Projektergebnisse auf die Unterböden von Ackerflächen beziehen. Die Gültigkeit für andere Bodennutzungen, wie Grünland, Forst oder Gartenbau und deren Böden wurde nicht untersucht.

2. Material und Methoden

2.1. Datenbeschaffung und -aufbereitung

Die Daten zur Durchführung des Projektes wurden bei allen Geologischen Diensten und einigen Landwirtschaftsbehörden der Flächenbundesländer und deren Kooperationspartnern angefragt. Benötigt wurden nachfolgend aufgelistete Kenngrößen und bodenphysikalische Analysendaten von Böden unter Ackernutzung:

Profilsprache:

- o Geogenese
- o Pedogenese
- o Stratigraphie
- o Horizontfolge mit Tiefenangaben
- o Gefügeansprache (Makro- und Makrofeingefüge, effektive Lagerungsdichte)

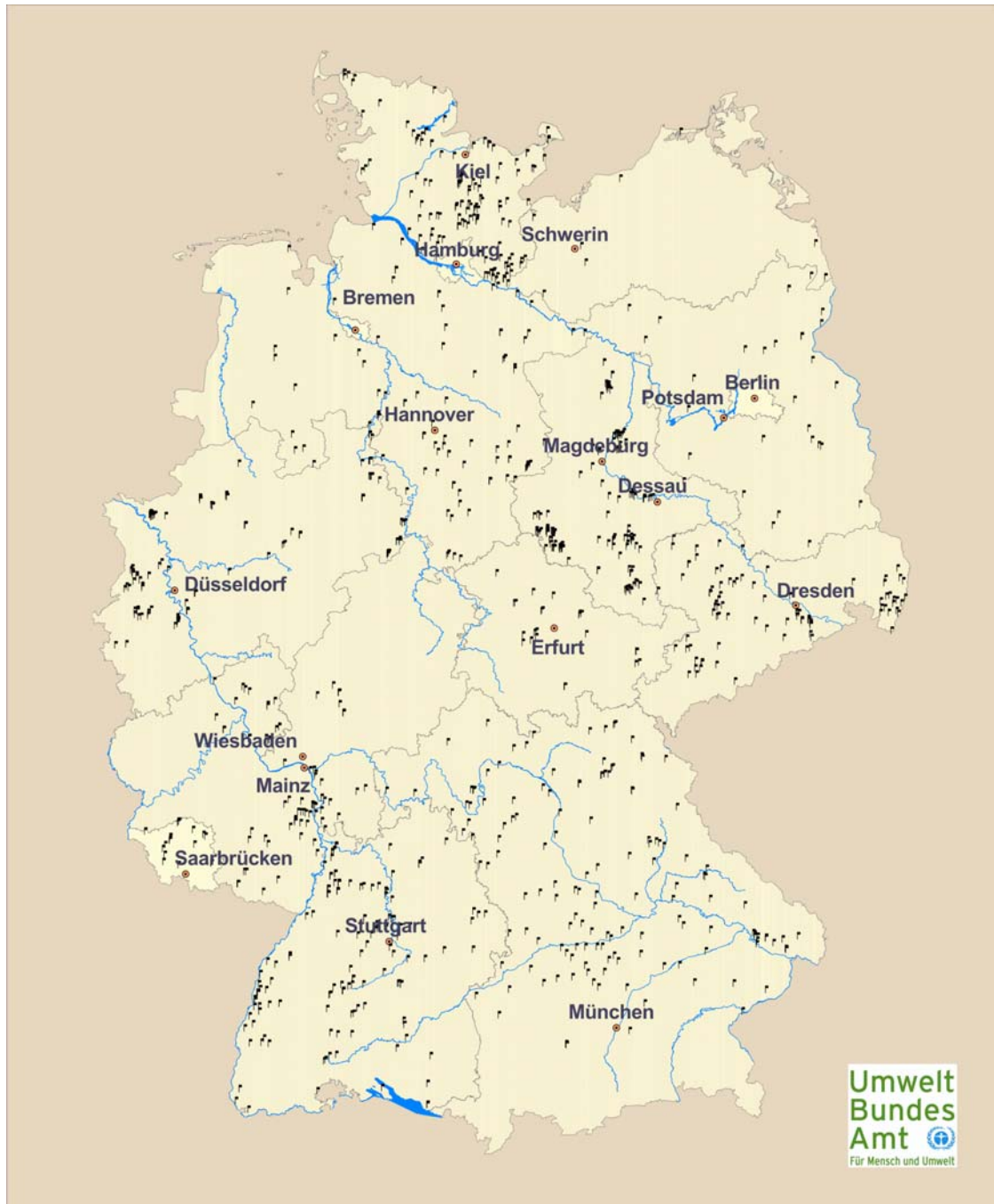
Allgemeine Bodenkenngrößen:

- o Bodenart (analytisch)
- o Skelettgehalt

- o Carbonatgehalt
- o Gehalt an organischer Substanz

Physikalische Bodenkenngrößen:

- o Luftkapazität (Poren $> 50 \mu\text{m}$)
- o Nutzbare Feldkapazität (Poren von 50 bis $0,2 \mu\text{m}$)
- o Totwassergehalt (Poren $< 0,2 \mu\text{m}$)
- o Trockenrohdichte
- o Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Wert)



Karte 1: Lage der Bodenprofile mit Analysendaten in der Übersicht (ohne Flächenbodenformen in Brandenburg)

Tabelle 1: Übersicht der von den Ländern bereitgestellten Datensätze von Unterböden der Ackerflächen

Bundesland	Institution	Anzahl Profile	Anzahl Datensätze
MV	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Güstrow; Universität Rostock, Institut für Landnutzung	8	23
BR	Landesumweltamt, Potsdam; Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe, Kleinmachnow	184	590
SL	Landesamt für Umwelt und Arbeitssicherheit, Saarbrücken	18	41
TH	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena	79	151
BY	Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof/Saale; Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising	146	265
SH	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Flintbek	139	407
NI	Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover	91	269
RP	Landesamt für Geologie und Bergbau, Mainz	38	80
HE	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden	34	80
NW	Geologischer Dienst NRW, Krefeld	111	319
SN	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden	88	278
ST	Landesamt für Geologie und Bergwesen, Halle/Saale	224	468
BW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Karlsruhe; Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau	139	435
Summe		1299	3406

Bereitgestellt wurden Daten aus Erhebungen zur Bodendauerbeobachtung (BDF), zur Landesaufnahme (Begleitanalytik zur Kartierung) sowie Daten aus Projekten mit bodenphysikalischem Bezug. Die bereitgestellten Daten stellen die aktuellsten Erhebungen der Länder dar. Der überwiegende Anteil der Daten wurde von 1990 bis 2007 erhoben. Nur in Ausnahmefällen wurden auch Daten aus Erhebungen vor 1985 übermittelt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht der von den Ländern bereitgestellten Daten. Die Anzahl an Datensätzen ist für die im Vorhaben durchgeführten Auswertungen völlig ausreichend. Auch die Verteilung der Profile über die Ackerflächen des Bundesgebiets ist überwiegend gleichmäßig (Karte 1). Für Brandenburg wurden die Daten von weiteren 154 Flächenbodenformen übermittelt, die in Karte 1 nicht verzeichnet sind.

Die bereitgestellten Daten wurden gesichtet und auf Plausibilität geprüft. Folgende Schritte wurden durchgeführt:

- Kontrolle der Quersumme der Korngrößenverteilung
- Kontrolle der Quersumme der Porengrößenverteilung
- Kontrolle des Gesamtporenvolumens anhand von Trockenrohdichte und Festsubstanzdichte
- Gegebenfalls Schätzung der Festsubstanzdichte über den Gehalt an organischer Substanz
- Plausibilitätsprüfung der Kenngrößen Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität, Totwassergehalt und gesättigte Wasserleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Bodenform, Skelettgehalt und Trockenrohdichte

Fehlende Parameter wurden soweit möglich durch Berechnung ergänzt oder in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5, 2005) parametrisiert. Fehlerhafte Daten wurden wenn möglich korrigiert oder der gesamte Datensatz wurde entfernt.

2.2. Analysenmethoden

Die Analysenmethoden für die Messungen der im Vorhaben verwendeten Daten wurden von den Bereitstellern überwiegend dokumentiert, aber nicht vollständig. Da es sich aber ausnahmslos um autorisierte Facheinrichtungen handelt, kann davon ausgegangen werden, dass die Analysenmethoden vollständig den bodenkundlichen Standards entsprechen.

Die Bodenprofilansprachen erfolgten nach verschiedenen Auflagen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA3, 1982; KA4, 1994; KA5, 2005). Allgemeine Bodenkenngrößen wurden nach Methoden bestimmt, wie sie bei Schlichting et al. (1995) oder VDLUFA (1991) beschrieben sind. Die Erhebung bodenphysikalischer Kenngrößen orientierte sich an DIN Normen. Die aus der pF-Kurve abzuleitenden Kenngrößen Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Totwassergehalt werden nach DIN ISO 11274 (2001) ermittelt, die Trockenrohdichte nach DIN ISO 11272 (2001) und die gesättigte Wasserleitfähigkeit nach DIN 19683-9 (1998).

In einigen Datensätzen fehlte die Erhebung der Festsubstanzdichte (DIN 19683-13, 2007), so dass das Gesamtporenvolumen und die Luftkapazität nicht berechnet waren. In diesen Fällen wurde die Dichte der festen Bodensubstanz (d_F) über die mittlere Gesteinsdichte von $2,65 \text{ g/cm}^3$ und dem Gehalt an organischer Substanz in Masse (%) bestimmt, nach der Regressionsformel:

$$dF \text{ (g/cm}^3\text{)} = 2,65 - 0,0125 \text{ org. Substanz in Masse \%}, \quad (1)$$

die sich aus den bei Hartge und Horn (2009) beschriebenen, mittleren Zusammenhängen bei der Parameter herleiten lässt.

2.3. Methoden zur Bestimmung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit

Für die Bewertung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerstandorten stehen vier algorithmenbasierte Kenngrößen zur Verfügung: die Vorbelastung, die Druckbelastbarkeit aus dem Konzept Belastungsquotient, die Schadverdichtungsgefährdungsklassen und die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit (S_m) nach NIBIS.

2.3.1. Vorbelastung

Die Verwendung der mechanischen Vorbelastung als Kenngröße zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit wird von Horn et al. (1991) vorgeschlagen. Die mechanische Vorbelastung wird analytisch im konsolidierten, drainierten Drucksetzungsversuch an ungestörten Gefügeproben ermittelt. Die Auswertung der Drucksetzungskurve geschieht standardmäßig mit dem graphischen Verfahren nach Casagrande (1936). Bei dieser Auswertung werden die Spannungen auf der Druckachse im logarithmischen Maßstab aufgetragen (Abb. 1). An den Punkt der stärksten Krümmung (A) der Wiederverdichtungskurve (WVK) wird eine Tangente angelegt. Durch Punkt A wird eine Parallele (B) zur X-Achse gezogen. In den Winkel von Tangente und Parallele wird eine Winkelhalbierende gezeichnet. Der Schnittpunkt zwischen der Winkelhalbierenden und der rückwärtigen Extrapolation der Erstverdichtungsgeraden (EVG) bestimmt die Vorbelastung. Die mechanische Vorbelastung ist eine bodeninterne Stabilität gegenüber dem Zusammendrücken, die sich aus der Anzahl der Korn zu Korn Kontakte, der Kornstabilität und aus dem Scherwiderstand an den Kornkontakten ergibt.

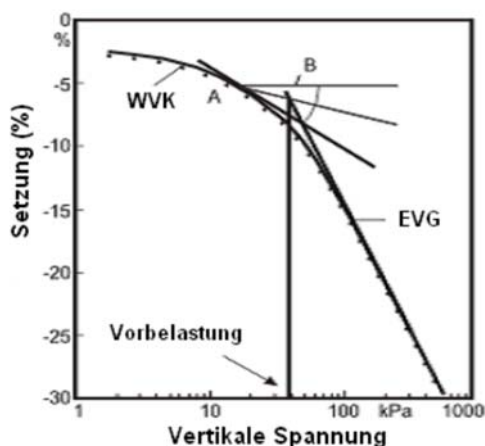


Abbildung 1: Ermittlung der Vorbelastung aus dem Drucksetzungsversuch nach dem graphischen Verfahren von Casagrande (1936)

Die Vorbelastung der gepflügten Ackerkrume ist jahreszeitlichen Schwankungen unterlegen. Sie wird dort nach einer Lockerung sehr stark vom Grad der Rücksetzung des Gefüges bestimmt. Im Unterboden hat die Vorbelastung den Charakter einer kontinuierlichen Gefügeeigenschaft. Sie wird dort durch geogene und pedogene Prozesse bestimmt, kann aber auch anthropogen überprägt sein, z. B. durch Verdichtung. Durch die geogenen und pedogenen Primäreinflüsse kann sie im Unterboden aber nicht als ein reines Ergebnis der anthropogenen Vorverdichtung angesehen werden. Diese erhöht zwar die Zahl der Kornkontakte, aber nicht die Festigkeit zwischen den Körnern. Letztere kann durch Verdichtung auch gemindert werden, z.B. wenn stabile Aggregate zerdrückt werden.

Die Vorbelastung kennzeichnet einen Druck in kPa, der dem Druck durch Fahrzeuge als bodeneigene Stabilität direkt gegenübergestellt werden kann. Sind beide Kenngrößen bekannt, Druck durch Maschinen und Vorbelastung, so kann eine Prognose erfolgen, ob durch den konkreten Maschineneinsatz zusätzliche Verdichtungen zu erwarten sind oder nicht. Das Reziprok der Vorbelastung ist die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit.

Alternativ zur Messung kann die Vorbelastung auch über Pedotransferfunktionen geschätzt werden. Entsprechende Algorithmen beschreiben die Merkblätter DVWK 234 (1995) und DVWK 901 (2002) sowie die DIN Vornorm 19688 (2001).

2.3.2. Druckbelastbarkeit

Einen weiteren Ansatz für die Bewertung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens stellen Werner und Paul (1999) im Konzept Belastungsquotient vor. Der Belastungsquotient ist in das Betriebsbewertungskonzept USL (Umweltsicherungssysteme Landwirtschaft) des VDLUFA integriert (Eckert et al., 2002). Die Druckbelastbarkeit ist ein empirisch im konsolidierten, drainierten Ödometertest ermittelter Druck, bei dem die Luftkapazität von ungestörten Bodenproben aus dem Oberboden unter 8 Vol.% und aus dem Unterboden unter 5 Vol.% sinkt. Diese Werte stuften Werner und Paul (1999) als kritische Werte für die Durchlüftbarkeit des Bodens im Hinblick auf das Pflanzenwachstum ein. Die Herleitung der Druckbelastbarkeit kann auf verschiedene Weise geschehen. Eine Möglichkeit ist das Abgreifen des entsprechenden Druckwertes von bodenartabhängigen Erstverdichtungsgeraden für die Luftkapazität, wie sie im DVWK Merkblatt 235 (1997) dokumentiert sind (Abb. 2). Diese Dokumentation umfasst allerdings nur bayerische Böden aus Lebert (1989).

Die Ableitung der Druckbelastbarkeit lehnt sich also über die Verwendung von Erstverdichtungsgeraden an das Vorbelastungskonzept an. Die Druckbelastbarkeit ist jedoch nur in besonderen Fällen identisch mit der Vorbelastung, nämlich dann, wenn der Boden eine originale Luftkapazität von 8 Vol.% in der Krume und von 5 Vol.% im Unterboden aufweist. Weichen die Luftkapazitäten von diesen Werten ab, so entspricht die Druckbelastbarkeit derjenigen Vorbelastung, die der Boden hätte, wenn die Luftkapazität 8 bzw. 5 Vol.% betragen würde. Aus diesem Grund kann die Druckbelastbarkeit auch alternativ über Pedotransferfunktionen zur Berechnung der Vorbelastung hergeleitet werden. In die entsprechenden Gleichungen ist eine Luftkapazität von 8 bzw. 5 Vol.% einzusetzen. Wenn die übrigen Porositätswerte des konkreten Bodens an die veränderte Luftkapazität angepasst worden sind, kann eine solche hypothetische Vorbelastung als Druckbelastbarkeit berechnet werden (Paul, 2004; VDLUFA, 2009).

Die Druckbelastbarkeit im Konzept Belastungsquotient bewertet nicht die Empfindlichkeit des Bodens für zusätzliche Verdichtung, sondern die Empfindlichkeit des Bodens für Schäden

an der Durchlüftungsfunktion. Sie wird vorrangig für Bewertungen von Unterkrume und Krumenbasis eingesetzt.

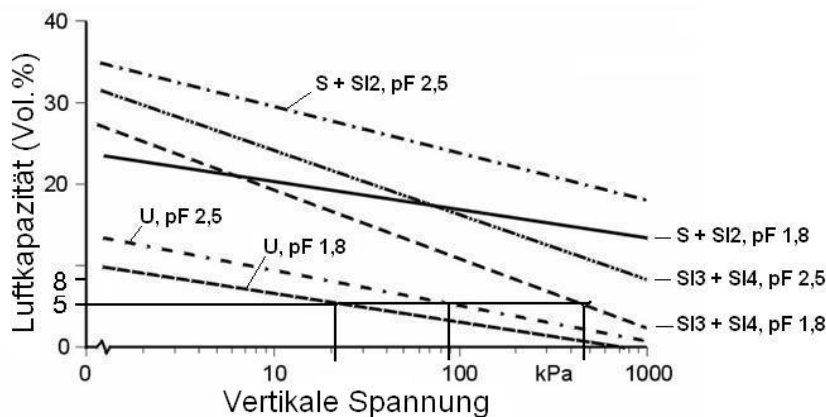


Abbildung 2: Beispiel für die Ableitung der Druckbelastbarkeit als vertikale Spannung im Konzept Belastungsquozient nach Werner und Paul (1999) für den Unterboden aus einem Nomogramm nach Merkblatt DVWK 235 (1997) für das Abgreifen der Luftkapazität in Abhängigkeit von der Bodenart und der Bodenfeuchte

2.3.3. Schadverdichtungsgefährdungsklassen

Einen weiteren Ansatz zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit beschreiben Petelkau et al. (2000) im Konzept Schadverdichtungsgefährdungsklassen. Die Einstufung erfolgt ebenfalls anhand von Ödometerversuchen, die jedoch an gestörten, gesiebten Bodenproben durchgeführt werden. Diese Tests beschreiben das Rückverdichtungsverhalten von gelockertem

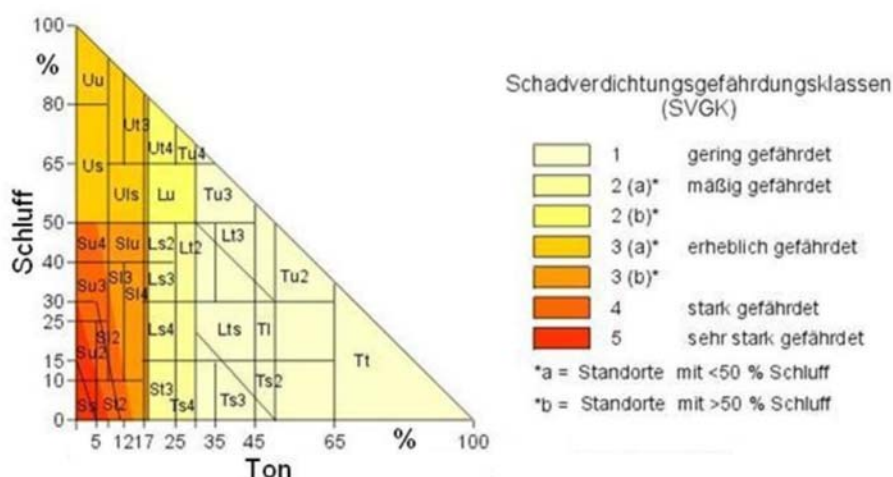


Abbildung 3: Einteilung der Böden in Schadverdichtungsgefährdungsklassen in Abhängigkeit von der Bodenart nach Petelkau et al. (2000)

Bodenmaterial aus der Ackerkrume. Die Verdichtungsempfindlichkeit ist umso höher je größer die Verdichtungszunahme im Drucksetzungstest ist, und je schneller dadurch kritische Verdichtungszustände für die Ertragsleistung des Bodens erreicht werden. Den Böden können in Abhängigkeit von der Bodenart 5 Klassen der Schadverdichtungsgefährdung zugeordnet werden (Abb. 3). Gesiebte Bodenproben aus der Krume von Sanden erreichen beim geringsten Druck kritische Gefügestände. Gesiebte Tone erreichen erst bei dem im Vergleich zu den anderen Bodenarten höchsten Druck kritische Werte. Daraus folgt, dass sich die Schadverdichtungsgefährdung der Krume mit feiner werdender Körnung verringert.

2.3.4. Sm nach NIBIS

Eine weitere Methode zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit ist die Bestimmung des Kennwertes Sm, der in der Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS beschrieben ist (NLfB, 2004). Aus der Kombination der Eigenschaften Bodenart, bodenkundliche Feuchtestufe, Humusgehalt, Carbonatgehalt, Grobbodenanteil und Verfestigungsgrad von B-Horizonten bei Podsolen, wird die Verdichtungsempfindlichkeit hergeleitet. Die Basis der Bewertung bildet zunächst eine Einstufung nach der Bodenart in 6 Stufen, in aufsteigender Reihenfolge von „sehr gering“ bis „äußerst hoch“ (Tab. 2). In Abhängigkeit von den übrigen Eigenschaften werden Zu- oder Abschläge zur Grundeinstufung erhoben, die in der Summe die Gesamtbewertung ergeben, der noch eine Stufe „0“ für „keine“ potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit angefügt wurde. Alle Zu- und Abschläge sind nach Bodenarten gestaffelt.

Tabelle 2: Potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit (Sm) als Grundeinstufung in Abhängigkeit von der Bodenart nach NIBIS

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

Die Grundlage für die Einteilung bilden Regressionsgleichungen nach Horn (1981a), welche die mittlere Setzungsziffer (abgekürzt: Sm) in Abhängigkeit von bodenkundlichen Kenngrößen, wie der Bodenart, Lagerungsdichte oder Luftkapazität beschreiben. Die mittlere Setzungsziffer Sm wurde von Horn (1981a) als Maß für die Verdichtungsempfindlichkeit verwendet. In späteren Arbeiten wurde sie aber von Horn (1981b) durch die Vorbelastung ersetzt. Die mittlere Setzungsziffer Sm stellt bodenphysikalisch das Reziprok des Steifemoduls dar, welches die Steigung der Erstverdichtungskurve im linearen Maßstab der Druckachse beschreibt (Abb. 4a). Sie kennzeichnet die vertikale Setzungszunahme ungestörter Gefügestufen mit zunehmendem Druck (= Normalspannung in Abb. 4). Bei logarithmischer Darstellung der Druckachse entspricht das Steifemodul dem Kompressionsindex der Erstverdichtungsgeraden (Abb. 4b).

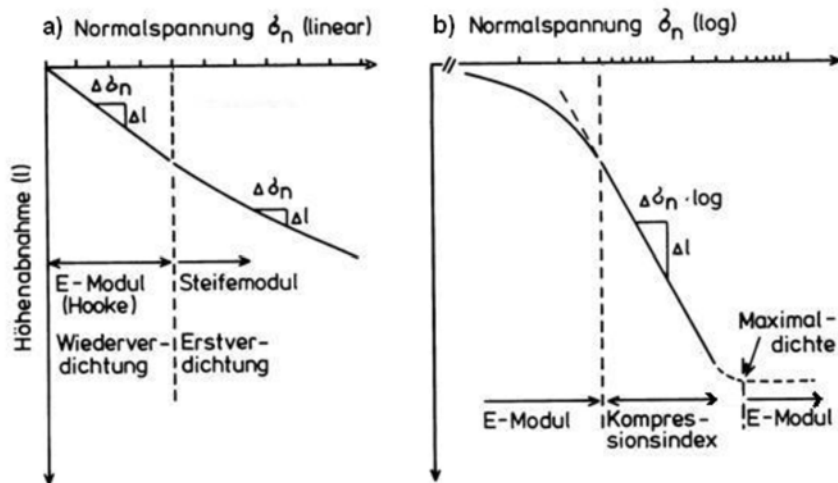


Abbildung 4: Wieder und Erstverdichtungsverhalten von Bodenproben im konsolidierten, drainierten Oedometertest (a: lineare und b: logarithmische Spannungsachse, aus Lebert und Horn, 1994)

Die Verdichtungsempfindlichkeit S_m nach NIBIS zeigt in Abhängigkeit von der Bodenart ein umgekehrtes Ergebnis im Vergleich zum Ansatz Schadverdichtungsgefährdungsklassen: bei Sanden ist die Verdichtungszunahme bei gleicher Druckzunahme geringer als bei Tonen. Die Verdichtungsempfindlichkeit wird also mit größer werdendem Korndurchmesser geringer. Dieser Gegensatz ist nur scheinbar, weil die Bezugsgrößen beider Konzepte unterschiedlich sind. Bezugsgröße im Konzept Schadverdichtungsgefährdungsklassen ist der gelockerte Boden und das Konzept beschreibt die Rückverdichtung. Bezugsgröße für S_m ist der natürlich gelagerte, abgesetzte Unterboden und das Konzept beschreibt das Erstverdichtungsverhalten. Im überlockerten Zustand ist die Verdichtungszunahme einer sandigen Krume erheblich stärker als bei einer Krume aus tonigem Boden. Im abgesetzten Unterboden ist dieser Sachverhalt aber genau umgekehrt. Hier ist die Setzungszunahme beim Sand unter gleicher Belastung deutlich geringer als beim feinkörnigen Boden.

2.3.5. Auswahl der geeigneten Methode

Die beschriebenen Methoden zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit sind für unterschiedliche Zielsetzungen erarbeitet worden und sind deshalb nicht für jede Fragestellung gleichwertig einsetzbar. Vor einer Auswahl des geeigneten Verfahrens müssen deshalb die Ziele eines Vorhabens genau definiert werden. Tabelle 3 gibt einen Überblick der verschiedenen Zielsetzungen und Zielgrößen.

Für die Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit des ungestörten, gewachsenen Bodens wurden die Ansätze Vorbelastung, Druckbelastbarkeit und S_m nach NIBIS entwickelt. Sie unterscheiden sich aber in ihrer Aussagefähigkeit. Die Vorbelastung bewertet die Empfindlichkeit des Bodens für zusätzliche Verdichtung. Sie beschreibt die Effekte der Gefügebildung aus Geo- und Pedogenese auf die Verdichtungsempfindlichkeit und ist deshalb vorrangig im Unterboden unterhalb der bearbeiteten Krume einsetzbar. Sie kann zwar grundsätzlich auch für die Krume verwendet werden, jedoch muss in diesen Fällen der jeweilige Rücksetzungsgrad bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Die Druckbelastbarkeit bewertet die Empfindlichkeit für Schäden an der Durchlüftung in Unterkrume und Krumbasis,

unabhängig von der aktuellen Vorbelastung. Sie berücksichtigt ebenfalls die Aspekte der Gefügebildung durch Verwendung von ungestörten Bodenproben in den zugrunde liegenden Tests. Die Verdichtungsempfindlichkeit S_m nach NIBIS klassifiziert die Intensität der Zunahme der Dichtlagerung im Unterboden im Falle des Auftretens von Verdichtungen. Sie basiert auch auf Tests an ungestörten Gefügeproben. Die Verdichtungsempfindlichkeit im Konzept Schadverdichtungsgefährdungsklassen ist auf Tests an gestörten Bodenproben gestützt ist deshalb speziell auf die Bewertung der Krume von Ackerböden unter den Aspekten der Ertragsfähigkeit und der Rückverdichtung ausgerichtet.

Tabelle 3: Vergleichender Überblick der Kenngrößen zur Bewertung und Herleitung der Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerböden

Kenngröße	Zielsetzung	Zielgröße im Boden	Algorithmus für Herleitungen
Vorbelastung	Vermeidung von Verdichtungen	Unterboden	Pedotransferfunktionen
Druckbelastbarkeit	Vermeidung von Durchlüftungsschäden	Unterkrume und Krumenbasis	Pedotransferfunktionen
SVGK	Vermeidung von Ertragseinbußen	Krume	Bodenart
S_m nach NIBIS	Beschreibung der Verdichtungsintensität	Unterboden	Bodenart mit Zu- und Abschlägen

Die Zielsetzung bei der Ermittlung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden ist im Vorhaben der nachhaltige Schutz der Bodenfunktionen. Hier spielt der Schutz des gewachsenen Unterbodens eine vorrangige Rolle. Durch die Fokussierung auf den Unterboden scheidet die Methode Schadverdichtungsgefährdungsklassen für eine Verwendung aus. Die S_m -Methode nach NIBIS beschreibt qualitativ das Bodenverhalten im Erstverdichtungszustand. Wenn sich der Boden im Erstverdichtungszustand befindet, dann ist die Vorbelastung aber überschritten und Verdichtung findet bereits statt.

Unter Vorsorgeaspekten, insbesondere nach Inkrafttreten des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG, 1998), sind das Vermeiden von Verdichtung sowie das Vermeiden von Schäden durch Verdichtungen vorrangiges Ziel des Bodenschutzes. Diese Ziele lassen sich nur über die Kenngrößen Vorbelastung und Druckbelastbarkeit realisieren. Beide Kenngrößen können direkt in Prognosemodelle für die Verdichtung in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik eingebaut werden, welche als Grundlage für die landwirtschaftliche Beratung dienen können. Das Konzept Druckbelastbarkeit ist jedoch im Unterboden vorrangig auf die Regeneration der Krumenbasis ausgerichtet und weniger auf den Schutz des gesamten ungestörten Unterbodens im Bereich von 30 – 60 cm Bodentiefe. Deshalb kommt im Vorhaben das Vorbelastungskonzept zur Anwendung.

2.4. Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung

2.4.1. Vorhandene Modelle

Zur Herleitung der Vorbelastung stehen Modellansätze mit Pedotransferfunktionen zur Verfügung (DVWK Merkblatt 234, 1995; DVWK Merkblatt 901, 2002; DIN Vornorm 19688, 2001; Rücknagel, 2006). Die Zielgröße Vorbelastung bei pF 1,8 wird mit insgesamt 10 bodenkundlichen Kenngrößen als Variablen über multiple Regressionsgleichungen geschätzt (Tab. 4).

Tabelle 4: Pedotransferfunktionen verschiedener Ansätze zur Schätzung der Vorbelastung bei pF 1,8 (Pv) und deren Stratifizierung in Bodenartenuntergruppen (Erläuterungen der Kürzel in Tabelle 5)

Ansatz	Bodenarten (KA5)	Pedotransferfunktionen Pv =
DVWK 234	Ss, Su2,3,4, Slu, Sl2,3,4, St2	$438,10 \text{ (TRD)} - 0,0008 \text{ (phi)}^3 - 3,14 \text{ (TW)} - 0,11 \text{ (nFK)}^2 - 465,60$ $R^2 = 0,78$ (2)
	St3, Ls	$169,30 \text{ (TRD)} - 29,03 \text{ (org)}^{0,5} + 6,45 \text{ kf} + 32,18 \log \text{ (c)} - 9,44 \text{ (phi)} + 27,25 \sin \text{ (TW)} + 119,74 \log \text{ (nFK)} + 19,51$ $R^2 = 0,83$ (3)
	Uu, Us, Uls, Ut2,3	$374,15 \text{ (TRD)} - 4,10 \text{ (org)} + 3,38 \text{ (LK)} - 1,58 \text{ (kf)}^{0,5} + 1,79 \text{ (c)} + 1,09 \text{ (TW)} - 6,37 \text{ (phi)}^{0,67} + 0,088 \text{ (nFK)}^2 - 472,77$ $R^2 = 0,77$ (4)
	Lu, Ut4, Lt2, Ts4	$10^{(0,843 \text{ (TRD)} - 0,544 \text{ (kf)}^{0,33} - 0,022 \text{ (TW)} + 7,03 \text{ (c)}^{-1} + 0,024 \text{ (phi)} - 0,015 \text{ (nFK)} + 0,725)}$ $R^2 = 0,81$ (5)
	Lt3, Tu2,3,4, Lts, Ts2,3, Tl, Tt	$4,59 \text{ (TRD)} - 1,02 \text{ (org)} - 16,43 \text{ (kf)}^{0,33} + 0,31 \text{ (TW)} - 1,57 \text{ (nFK)} + 3,55 \text{ (c)} + 1,18 \text{ (phi)} - 18,03$ $R^2 = 0,77$ (6)
DIN V 19688	Su2,3,4, Sl2,3, Slu, Uu, Us, Uls, Ut2,3	$69,5 \text{ (TRD)} - 13,3 \text{ (org)} - 23,3 \text{ (LK)}^{0,5} + 1,45 \text{ (c)} + 0,085 \text{ (phi)}^2 - 56,6$ $R^2 = 0,49$ (7)
	Ss, Sl4, St2, Ut4, Ls2,3,4, Lu, Tu4	$119,9 \text{ (TRD)} - 10,1 \text{ (org)} - 12,6 \text{ (TW)}^{0,5} + 11,1 \text{ (c)}^{0,5} - 78,9$ $R^2 = 0,50$ (8)
	St3, Lt2,3, Lts, Ts2,3,4, Tu2,3, Tl, Tt	$-42,7 \text{ (TRD)} - 20,7 \text{ (org)}^{0,5} - 14,2 \text{ (nFK)}^{0,5} - 20,8 \text{ (LK)}^{0,5} + 5,17 \text{ (phi)}^{0,5} + 1,23 \text{ (c)}^{0,5} + 231$ $R^2 = 0,61$ (9)
DVWK 901	S und U	$68,0 \text{ (TRD)} - 3,09 \text{ (TW)} - 32,2 \text{ (org)}^{0,67} - 0,64 \text{ (S)} + 13,7 \text{ (c)}^{0,5} + 35,0$ $R^2 = 0,49$ (10)
	L und T	$(6,20 \text{ (TRD)} + 0,284 \text{ (nFK)} + 0,260 \text{ (TW)} - 0,597 \text{ (org)} + 0,049 \text{ (S)} - 11,2)^2$ $R^2 = 0,59$ (11)
Rücknagel (2006)	alle Bodenarten	$10^{(-3,15 \text{ (ARD/TRD)} + 0,60 \text{ (TRD)} + 4,49)}$ $R^2 = 0,84$ (12)

Die Modelle unterscheiden sich hinsichtlich der Stratifizierung in Bodenartenuntergruppen und in der Zusammensetzung und Gewichtung der einzelnen Variablen in den Gleichungen. Das Modell aus dem DVWK Merkblatt 234 enthält einen Satz von 5 Regressionsgleichungen (2-6) für unterschiedliche Gruppierungen von Bodenartenuntergruppen, der original von Lebert (1989) übernommen wurde. Die Datengrundlage für die Erstellung der Gleichungen beschränkt sich auf Ackerböden Bayerns und die Übertragbarkeit für eine bundesweite Anwendung war bisher unklar. Bei der Übernahme der Gleichungen in das Merkblatt DVWK 234 wurden Veränderungen bei den Zuordnungen der Gleichungen zu den Bodenartenuntergruppen vorgenommen, da die Körnungseinteilung nach Lebert (1989) nicht mit der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4, 1994) kompatibel war. So wurde die Bodenartenuntergruppe Ut4 nicht mehr, wie ursprünglich einer Gesamtgleichung (4) für alle Schluffe sondern der Gleichung (5) für schluffigen Lehm, schwach tonigen Lehm und stark sandigen Ton zugeordnet. Die Regressionsgleichungen wurden aber an diese veränderte Zuordnung nicht angepasst. Die Stratifizierungen von lehmigen und tonigen Böden erfolgten nach Lebert (1989) in Abhängigkeit vom Tongehalt. Es wurde unterschieden zwischen Böden mit einem Tongehalt von kleiner 35 % und größer gleich 35 %. Für die Bodenartenuntergruppen Tu3 und Lts bedeutete dieser Sachverhalt, dass sie je nach Tongehalt der Gleichung (5) oder der Gleichung (6) zugeordnet werden mussten. Um die Zuordnungen zu vereinfachen wurden aber im Merkblatt DVWK 234 beide Gruppen der Gleichung (6) zugeordnet. Die Originalgleichungen wurden auch hier beibehalten und nicht an diese Veränderungen angepasst.

Im Merkblatt DVWK 901 wird die Vorbelastung bei pF 1,8 nur anhand von 2 Regressionsgleichungen (10, 11) bestimmt. Sande und Schluffe, sowie Lehme und Tone werden jeweils zu einer Stratifizierung zusammengefasst. Grundlage ist eine Arbeit von Nissen (1999), der die Datenbasis im Vergleich zu Lebert (1989) auf Böden aus dem gesamten Bundesgebiet erweiterte, wodurch allgemeingültigere Prognosen ermöglicht werden sollten. Etwa zeitgleich erarbeitete Hennings (2001), mit etwa den gleichen Datensätzen wie Nissen, aber unter stärkerer Berücksichtigung der Standortvariation und einer veränderten Stratifizierung in Bodenartenuntergruppen, einen weiteren Satz von 3 Regressionsgleichungen (7-9). Diese wurden in die DIN Vornorm 19688 übernommen.

Tabelle 5: Eingangsvariablen der Pedotransferfunktionen aus Tabelle 4, deren Kürzel und Dimension

Kürzel	Variable	Dimension
TRD	Trockenrohdichte des Gesamtbodens	g /cm ³
org	Gehalt an organischer Substanz	Masse %
k _f	gesättigte Wasserleitfähigkeit	cm /s x 1000
LK	Luftkapazität	Vol. %
nFK	Nutzbare Feldkapazität	Vol. %
TW	Totwassergehalt	Vol. %
c	Kohäsion	kPa
phi	Winkel der inneren Reibung	° (Grad)
S	Sandgehalt des Feinbodens	Masse %
ARD	Trockenrohdichte von Einzelaggregaten	g /cm ³

Einen alternativen Ansatz zur Schätzung der Vorbelastung mit Pedotransferfunktionen entwickelte Rücknagel (2006). Für alle Bodenarten gilt eine Regressionsgleichung (12), welche nur zwei Variablen enthält: die Trockenrohdichte des Gesamtbodens und die Aggregatdichte. Über das Verhältnis dieser beiden Dichten kann die Vorbelastung bei gegebener Trockenrohdichte beschrieben werden. Diese Regressionsgleichung ist sehr einfach, sie benötigt aber die Aggregatdichte als Messwert, die in den Datensätzen des Vorhabens nicht vorlag. Deshalb kann dieser Ansatz im weiteren Vorhaben nicht mehr berücksichtigt werden.

2.4.2. Kritik an den Modellen

Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung werden bisher kaum für Bodenschutz Zwecke eingesetzt. Der Grund dafür ist eine Unklarheit darüber, ob die Pedotransferfunktionen eine bundesweite Gültigkeit für die Schätzung der Vorbelastung haben. Es wurden bisher keine bundesweiten Validierungen durchgeführt. Literaturangaben weisen daraufhin, dass mit den Ansätzen der Pedotransferfunktionen Vorbelastungen berechnet wurden, die z.T. erheblich von entsprechenden Messwerten abgewichen sind. So berichten Quassem et al. (2000) von wenig Übereinstimmung bei Messungen und Schätzungen nach DVWK M 234 für Böden in der Schweiz. Schäfer-Landefeld und Brandhuber (2001) erzielten keine Übereinstimmung für Böden in Bayern, obwohl die Pedotransferfunktionen von DVWK 234 explizit für bayerische Böden erstellt worden waren. Allerdings verwendeten die Autoren bei der Messung der Vorbelastung über Drucksetzungskurven nicht das Standardverfahren nach Casagrande, sondern verwendeten ein Regressionsverfahren nach Dias Junior und Pierce (1995). Bei diesem Verfahren werden der Verlauf der Wiederverdichtungskurve und der Erstverdichtungsgeraden jeweils durch eine Regressionsgerade beschrieben und der Schnittpunkt mit der Geraden kennzeichnet die Vorbelastung. Keller et al. (2004) haben nachgewiesen, dass zwischen den Ergebnissen dieses Regressionsverfahrens und denen der Auswertung nach Casagrande keine enge Beziehung besteht und dass beide Verfahren nicht austauschbar sind. Eine Verifizierung von Pedotransferfunktionen, die auf Auswertungen nach dem Casagrande-Verfahren beruhen, mit Messdaten, die nicht nach diesem Verfahren erhoben wurden, ist deshalb nicht möglich. Cramer et al. (2006) erzielten für Ackerböden aus Nordrhein-Westfalen mit allen drei Modellen sehr uneinheitliche Übereinstimmungen zwischen Messwerten und Schätzwerten. Bei einzelnen Modellen waren für bestimmte Bodenartengruppen gute Übereinstimmungen vorhanden, für andere nicht.

Die Gründe für mögliche Unstimmigkeiten zwischen Schätzungen und Messungen können darin liegen, dass

- o die Eingangsdaten zur Erstellung der Pedotransferfunktionen nicht die gesamte Variationsbreite typischer Böden umfassen,
- o die Zuordnungen der Pedotransferfunktionen zu Stratifizierungen von Bodenartengruppen im Grenzbereich zu stärkeren Differenzen führen können und,
- o die Stratifizierungen je nach Modellansatz unterschiedlich sind, was zu voneinander abweichenden Prognosen für die gleiche Bodenart führen kann.

Es ist deshalb erforderlich, die über Pedotransferfunktionen berechneten Ergebnisse zur Vorbelastung einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen, um deren Eignung für eine allgemeine Anwendung in Deutschland zu ermitteln. Einen Ansatz für eine Plausibilitätsprüfung ohne Messwerte für die zu vergleichenden Schätzwerte beschreiben Lebert und Schäfer (2005) für niedersächsische Ackerböden. Als Maß für die Gültigkeit der Pedotransferfunktionen wurden die Trends und Größenordnungen von Messwerten vergleichbarer, typischer Böden für die

Verifizierung herangezogen. Im Ergebnis zeigte sich, dass für niedersächsische Sande der Ansatz DVWK 234 geeignet ist. Für alle anderen Bodenarten in Niedersachsen liefert überwiegend die DIN V 19688 die am besten nachvollziehbaren Ergebnisse. Für einen bundesweit repräsentativen Datensatz erfolgte eine solche Prüfung bisher jedoch nicht.

3. Ergebnisse

3.1. Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit

Der erste Schritt zur Entwicklung eines Prüfkonzpts zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung von landwirtschaftlich genutzten Böden ist die Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit und deren Darstellung in Bodenkarten. Die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit wird im Vorhaben aus der Vorbelastung abgeleitet. Bevor die Vorbelastung der Böden anhand von Pedotransferfunktionen geschätzt werden kann, ist eine Plausibilitätsprüfung für deren bundesweite Anwendbarkeit durchzuführen.

3.1.1. Plausibilitätsprüfung der Pedotransferfunktionen

Messwerte, anhand derer die Ergebnisse der Schätzung der Vorbelastung durch Pedotransferfunktionen im direkten Vergleich überprüft werden könnten, sind nicht in ausreichender Zahl vorhanden. Anhand von typischen Messwerten aus dem gesamten Bundesgebiet können aber zu erwartende Tendenzen und Größenordnungen hergeleitet werden. Bei einer Plausibilitätsprüfung können dann die Schätzergebnisse mit diesen Tendenzen und Größenordnungen verglichen und die geeigneten Pedotransferfunktionen ermittelt werden.

3.1.1.1. Zu erwartende Tendenzen und Größenordnungen

Systematische Erhebungen von Messwerten für die Vorbelastung von Unterbodenhorizonten deutscher Ackerböden sind in folgenden Arbeiten veröffentlicht: Lebert (1989), Nissen (1999), Stahl et al. (2005), Rücknagel (2006) und Cramer (2006). Die Messwerte dieser Arbeiten wurden zur Festlegung von zu erwartenden Tendenzen und Größenordnungen herangezogen. Es konnten aber nicht alle der dort aufgelisteten Messwerte verwendet werden. Offensichtliche Ausreißer wurden eliminiert. Nicht verwendet wurden Horizonte von anthropogenen Böden, wie Plaggeneschen oder Tiefumbruchböden, da solche Böden mechanische Besonderheiten aufweisen, die bei der Erstellung der Pedotransferfunktionen nicht berücksichtigt werden konnten. Aus dem gleichen Grund wurden die Werte von verfestigten B-Horizonten von Podolen sowie von stark mit Sesquioxiden angereicherten Go-Horizonten von Gleyen nicht verwendet. Den Besonderheiten solcher Böden können nur durch pauschale Zu- oder Abschläge Rechnung getragen werden. Pedotransferfunktionen können diese Besonderheiten nicht erfassen. Zusätzlich zu den publizierten Messwerten liegen dem Autor noch einzelne, unveröffentlichte Projektergebnisse vor. Aus dem zur Verfügung stehenden Messwertumfang konnten die Daten von insgesamt 180 Unterbodenhorizonten aus ca. 90 Ackerböden aus dem Bundesgebiet verwendet werden. Es existieren darüber hinaus in der Literatur noch weitere Messdaten. Im Vorhaben werden aber zur Ermittlung von Erwartungstrends für Böden aus dem Bundesgebiet nur Messdaten aus systematischen Vorbelastungserhebungen verwendet, die nach dem Standardverfahren nach Casagrande erhoben wurden. Es wurden keine Messdaten verwendet, die nur Begleitanalytik für andere Fragestellungen darstellen.

Für eine Plausibilitätsprüfung anhand von Tendenzen und Größenordnungen bietet es sich an, die Vorbelastung als abhängige Variable von einer einheitlichen Einflussgröße darzustellen. Eine wesentliche Einflussgröße auf die Vorbelastung ist die Trockenrohdichte. Sie kommt als einzige, unabhängige Variable in allen Regressionsgleichungen vor. Grundlage für den Vergleich von Messwertetendenzen und –größenordnungen mit den Schätzwerten nach Pedotransferfunktionen ist deshalb die Gegenüberstellung von Vorbelastung und Trockenrohdichte.

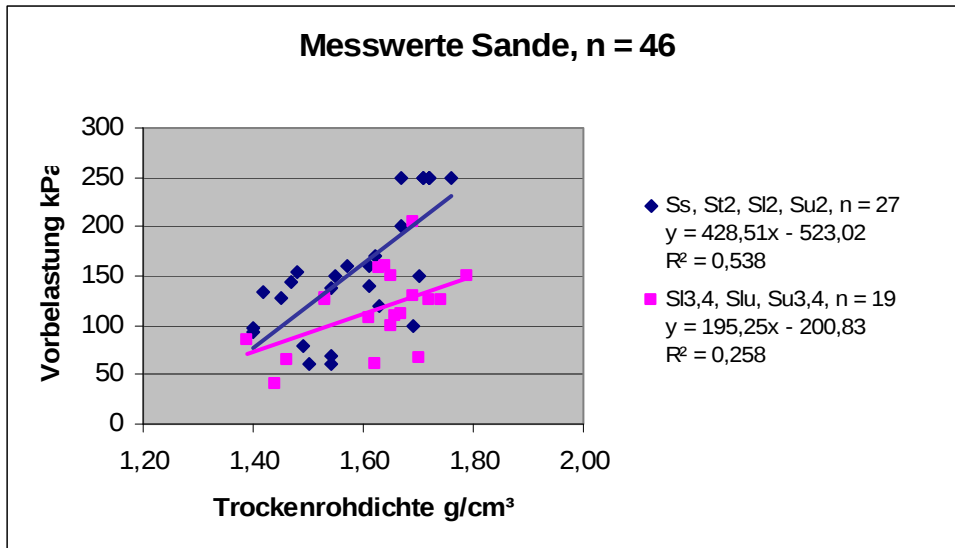


Abbildung 5: Bundesweit typische Messwerte für die Vorbelastung von Unterböden bei pF 1,8 für Sande in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte

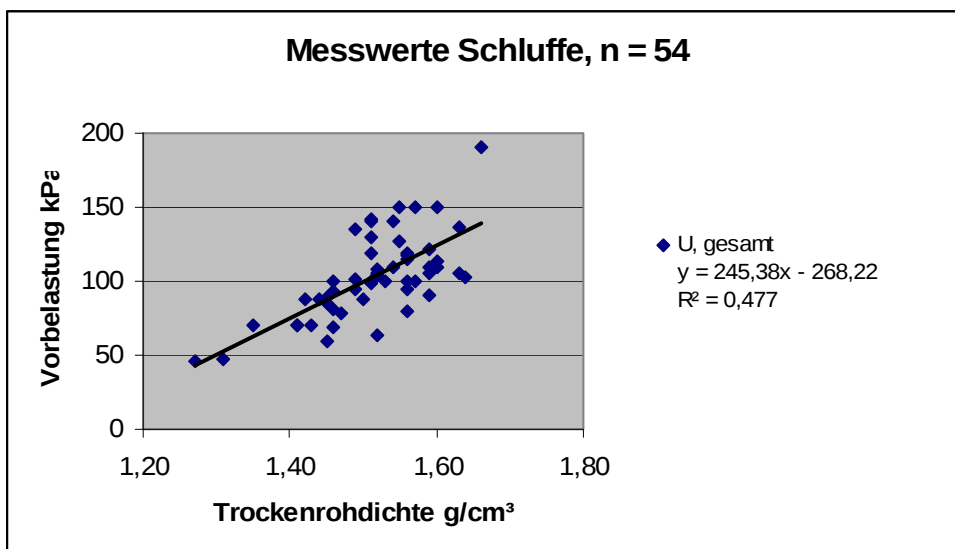


Abbildung 6: Bundesweit typische Messwerte für die Vorbelastung von Unterböden bei pF 1,8 für Schluffe in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte

Bei den Sanden ist eine klare Tendenz des Anstiegs der Vorbelastungsmesswerte mit der Trockenrohdichte zu erkennen (Abb. 5). Allerdings ist zwischen den Sanden der Bodenartenuntergruppen Ss, St2, Su2, Sl2 und den Sanden mit höheren Beimischungen an Ton und Schluff (Su3,4, Sl3,4, Slu) zu unterscheiden. Bei Ersteren ist der Anstieg der Vorbelastung mit der Trockenrohdichte deutlich stärker ausgeprägt.

Auch die Schluffe zeigen eine deutliche Steigung der Vorbelastung mit steigender Trockenrohdichte an, die sich etwa auf dem Niveau der stärker schluffigen und lehmigen Sande bewegt (Abb. 6), allerdings mit einem höheren Bestimmtheitsmaß.

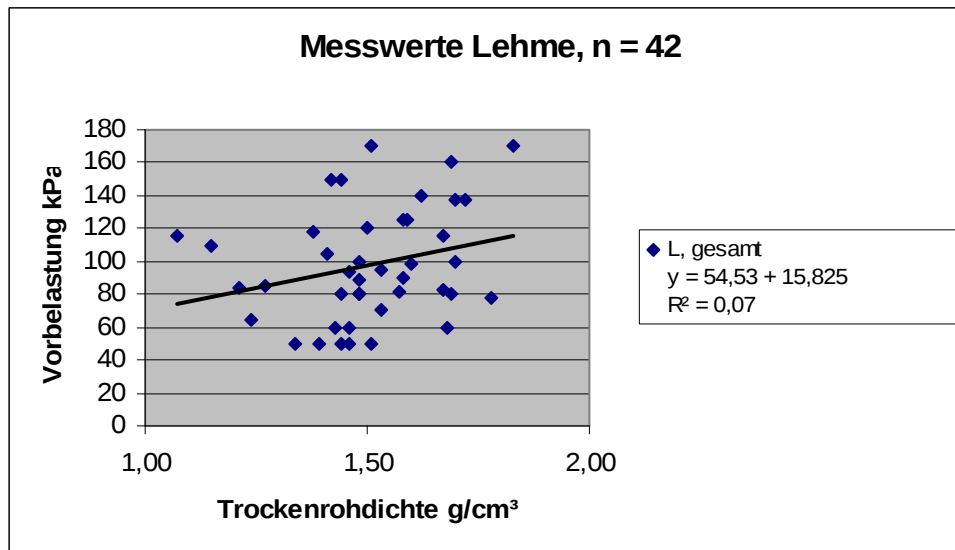


Abbildung 7: Bundesweit typische Messwerte für die Vorbelastung von Unterböden bei pF 1,8 für Lehme in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte

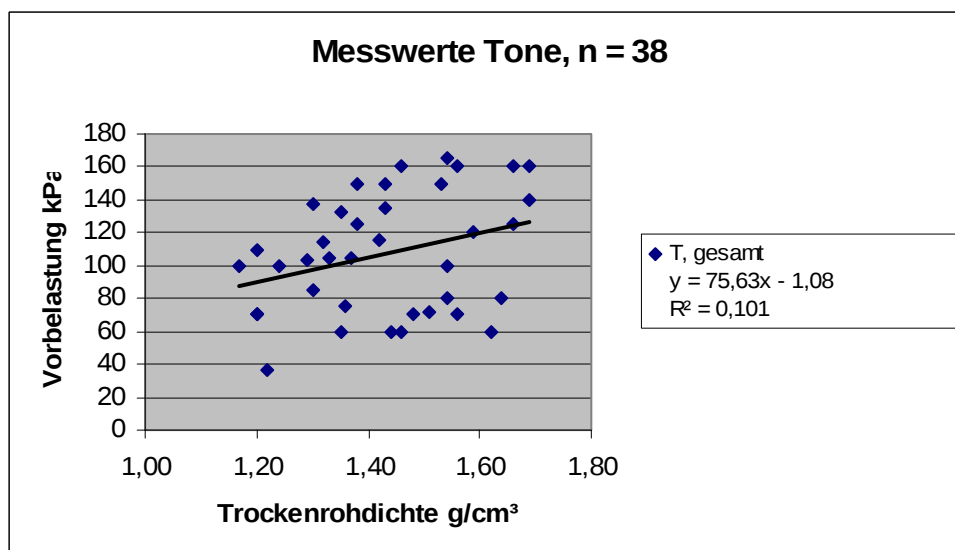


Abbildung 8: Bundesweit typische Messwerte für die Vorbelastung von Unterböden bei pF 1,8 für Tone in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte

Die gemessenen Vorbelastungen für Lehme zeigen nur eine ganz schwache Tendenz der Zunahme mit der Trockenrohdichte (Abb. 7). Der Grund dafür liegt in dem steigenden Einfluss der Aggregation auf die Vorbelastung, welcher über die Trockenrohdichte nicht abgebildet werden kann. Wichtige Einflussgrößen sind hier die Scherwiderstandsparameter. Auch die Einzelaggregatstabilität hat hier einen Einfluss, der aber auch über die Trockenrohdichte des Gesamtbodens nicht abgebildet werden kann. Eine Auswertung in Abhängigkeit von Scher- oder Einzelaggregatseigenschaften kann in der vorliegenden Auswertung nicht erfolgen, da Scherparameter nur als Schätzwerte und Einzelaggregatseigenschaften gar nicht vorliegen.

Ein ähnliches Bild zeigt sich aus den gleichen Gründen bei den Tonen (Abb. 8). Auch hier ist nur eine schwache Tendenz der Zunahme der Vorbelastung mit der Trockenrohdichte zu erkennen.

Tabelle 6 gibt einen Überblick der statistischen Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen Messwerten der Vorbelastung bei pF 1,8 und der Trockenrohdichte für die verschiedenen Gruppierungen von Bodenarten. Hochsignifikant ist der Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung bei den Reinsanden und Lehmsanden (ohne SI3) sowie bei den Schluffen. Bei der Gruppe der Schluffe und Sande einschließlich SI3 ist der Zusammenhang einfach signifikant. Bei Lehmen und Tonen ist der Zusammenhang nicht signifikant. Da jedoch ein Kausalzusammenhang zwischen steigender Trockenrohdichte und steigender Vorbelastung besteht, kann man davon ausgehen, dass ein schwach positiver Trend vorliegen muss, der aber aufgrund der relativ kleinen Stichproben keine Signifikanz aufweist. Die Standardfehler der Regression sind bei den Schluffen mit 21 kPa am kleinsten und bei den Reinsanden und Lehmsanden (ohne SI3) mit 45 kPa am höchsten.

Tabelle 6: Statistische Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen den Messwerten zur Vorbelastung (P_v) bei pF 1,8 und der Trockenrohdichte (TRD)

Bodenarten	Regression P_v (kPa) =	n	R²	Standardfehler (kPa)	Signifikanz- niveau
Ss, SI2, Su2, St2	428,51 TRD – 523,02	27	0,538	45	< 0,001
SI3,4, Slu, Su3,4	195,25 TRD – 200,83	19	0,258	36	< 0,05
U	245,38 TRD – 268,22	54	0,477	21	<0,001
L	54,53 TRD + 15,83	42	0,007	33	n.s.
T	75,63 TRD – 1,08	38	0,101	34	n.s.

Abbildung 9 zeigt die Ausgleichsgeraden der auf Messwerten basierenden Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung noch einmal in der Übersicht. Die deutlich höchsten Vorbelastungen treten bei den Reinsanden und Lehmsanden (ohne SI3) auf, allerdings nur bei höheren Trockenrohdichten. Auch Schluffe erreichen bei hoher Trockenrohdichte hohe Vorbelastungen. Allerdings erreichen Schluffe seltener so hohe Trockenrohdichten wie Sande. Die höchsten Vorbelastungen bei geringer Trockenrohdichte treten bei Lehmen und Tonen auf. Durch die stärkere Gefügebildung, insbesondere die Aggregation, bleiben diese Böden auch bei geringerer Trockenrohdichte stabil. Mit steigender Trockenrohdichte nimmt die Vorbelastung bei Lehmen und Tonen zwar zu, aber nicht so stark wie bei den grobkörnigeren Böden. Bei hoher Trockenrohdichte haben Lehme und Tone daher eine geringere, mittlere Vorbelastung als Schluffe und Sande. Aufgrund der Aggregation können aber im Einzelfall auch deutlich höhere Vorbelastungen bei diesen Bodenarten auftreten, je nach-

dem wie hoch die Einzelaggregatstabilität ausgeprägt ist. Die aufgezeigten Trends sind durch die bodenmechanische Forschung unterstützt. Insbesondere die Arbeitsgruppe Horn et al. (1994) hat die beschriebenen Effekte intensiv erforscht und nachgewiesen. Die Trends bestätigen aber auch die Ergebnisse der Arbeitsgruppe Petelkau et al. (2000) und die Trends aus dem Konzept nach NIBIS (NLfB, 2004): beim Vorliegen einer geringen Trockenrohdichte, und das ist auch nach einer Lockerung der Fall, ist die Stabilität bei Tonen höher als bei Sanden. Bei höheren Trockenrohdichten, im stärker abgesetzten Zustand, ist das aber umgekehrt.

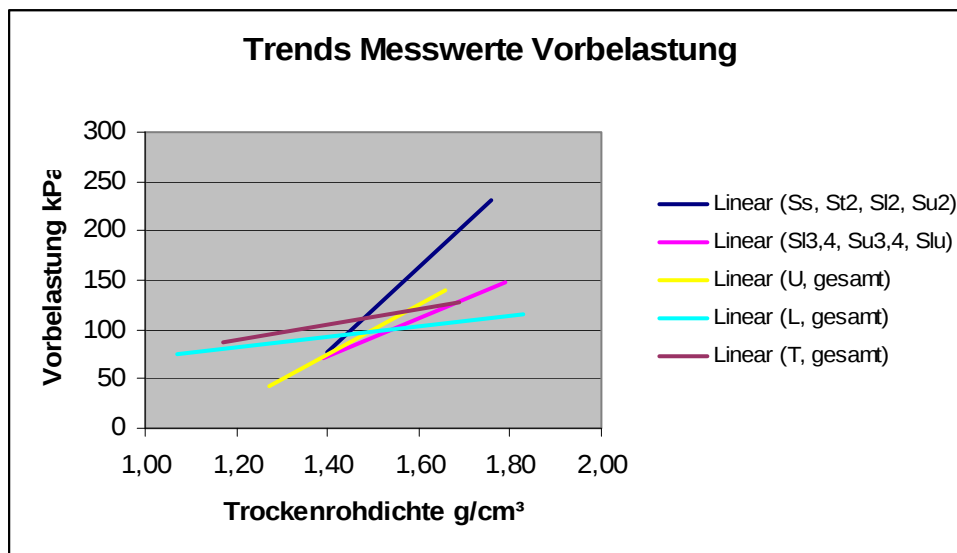


Abbildung 9: Übersicht der Ausgleichsgeraden der Trends des Zusammenhangs zwischen Trockenrohdichte und gemessener Vorbelastung bei pF 1,8 für unterschiedliche Bodenarten aus den Abbildungen 5 – 8

3.1.1.2. Abgleich mit den Schätzwerten

Die Trends der Messwerte können für die Prognosen keine exakten Sollwerte darstellen, da die Vielfalt der etwa 90 zugrunde liegenden Böden geringer sein muss als die der etwa 1.300 betrachteten Untersuchungsböden. Bei höherer Vielfalt wären sicher auch noch Verschiebungen der Tendenzen und Größenordnungen bei den Messwerten zu erwarten. Aufgrund der Unterstützung der Messwertetrends durch die Ergebnisse der bodenmechanischen Literatur und der daraus entwickelten Bewertungsmethoden kann man davon ausgehen, dass die vorliegenden Messwertetrends- und Größenordnungen repräsentativ sind. Es liefern dann auch diejenigen Pedotransferfunktionen, welche die oben aufgezeigten Trends am ehesten abbilden, eine verlässliche Prognose der Vorbelastung. Im Folgenden werden deshalb die Schätzwerte, berechnet aus den Parametern der 1300 Standorte auf Basis der Pedotransferfunktionen, mit den Messwertetrends verglichen. In den verfügbaren Datensätzen fehlten Messwerte für die Scherparameter (Kohäsion und Winkel der inneren Reibung), so dass diese geschätzt werden mussten. Für die Schätzung wurde eine Schätztabelle aus der DIN V 19688 verwendet, die durch Daten aus Lebert (1989) und Nissen (1999) ergänzt wurde. Die komplette Schätztabelle ist im Anhang (Tabelle A1) dokumentiert.

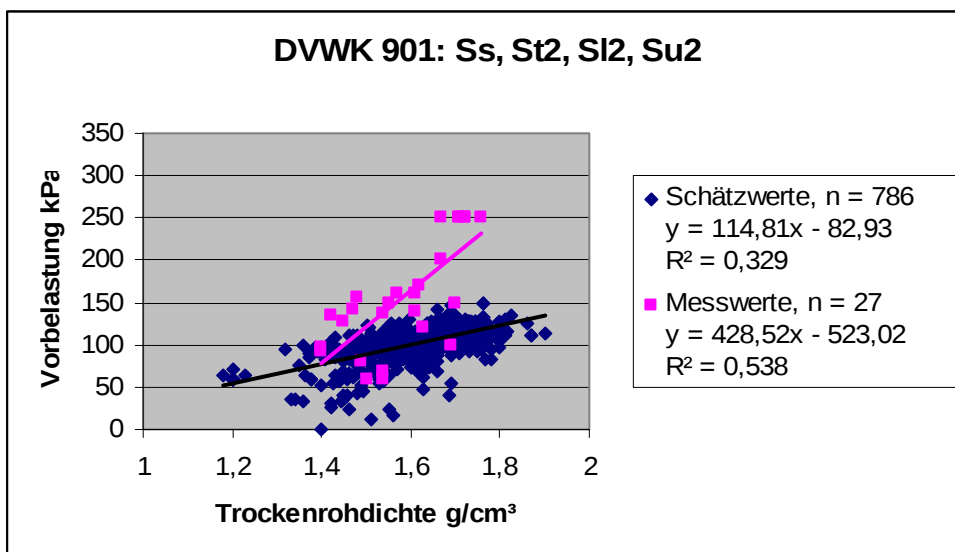
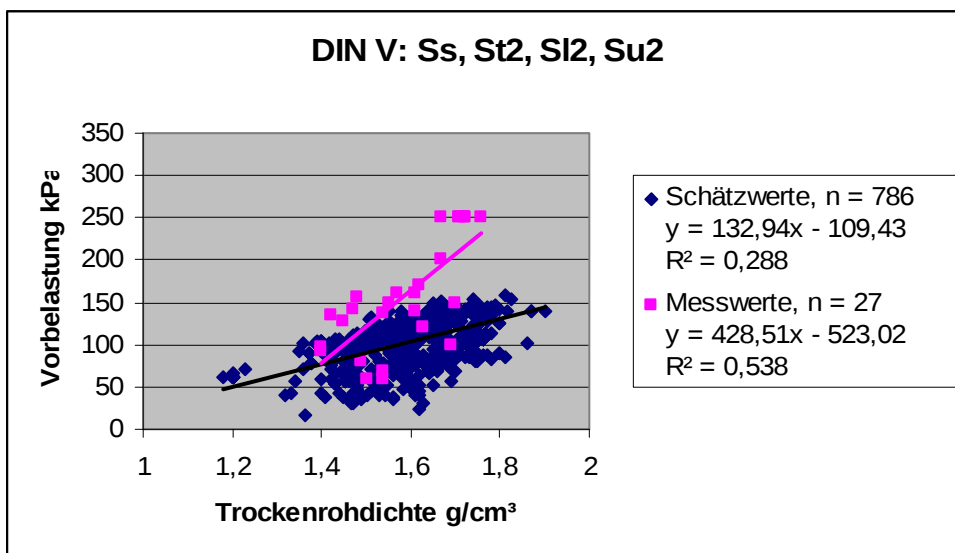
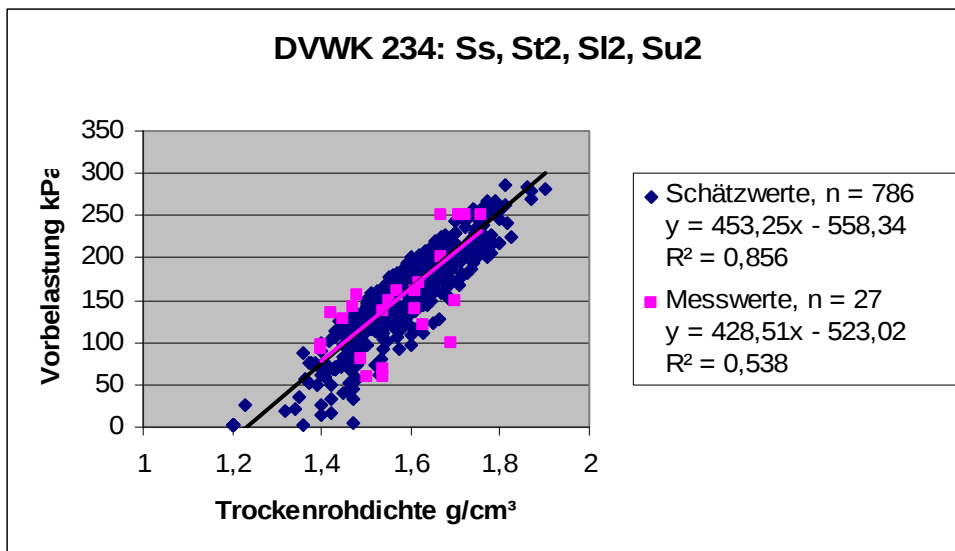


Abbildung 10: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Reinsande und Lehmsande ohne Sl3 (Ss, St2, Sl2, Su2)

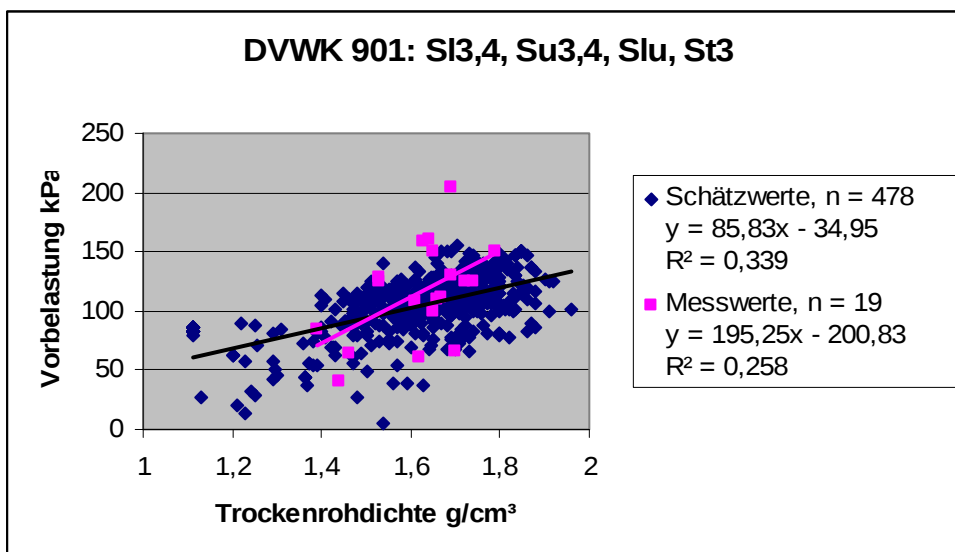
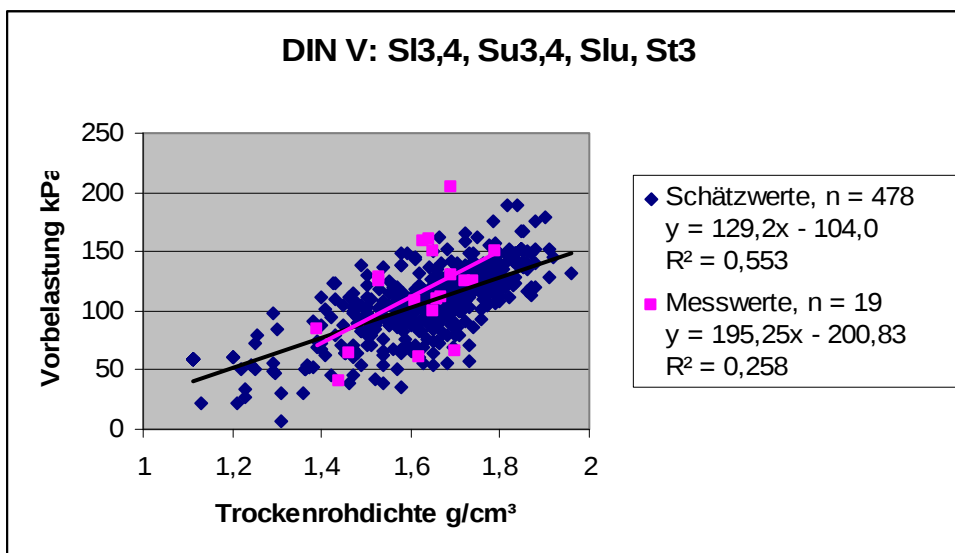
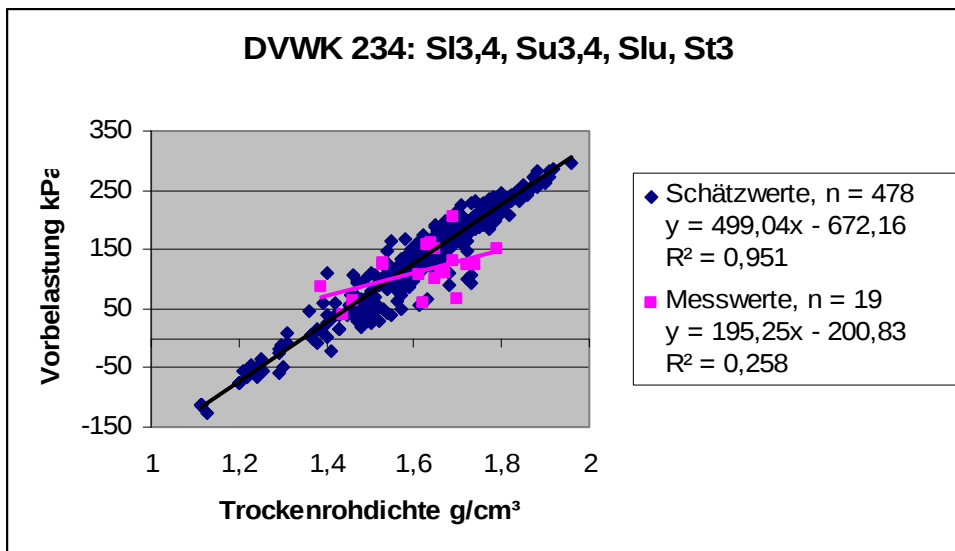


Abbildung 11: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Schluffe, Sande, Sande, Sande und SI3 (SI3,4, Su3,4, Slu, St3)

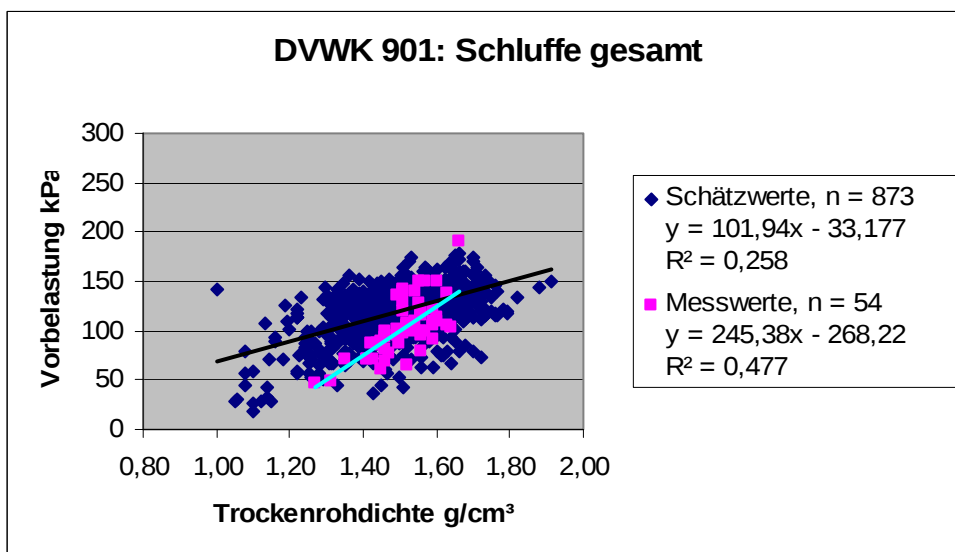
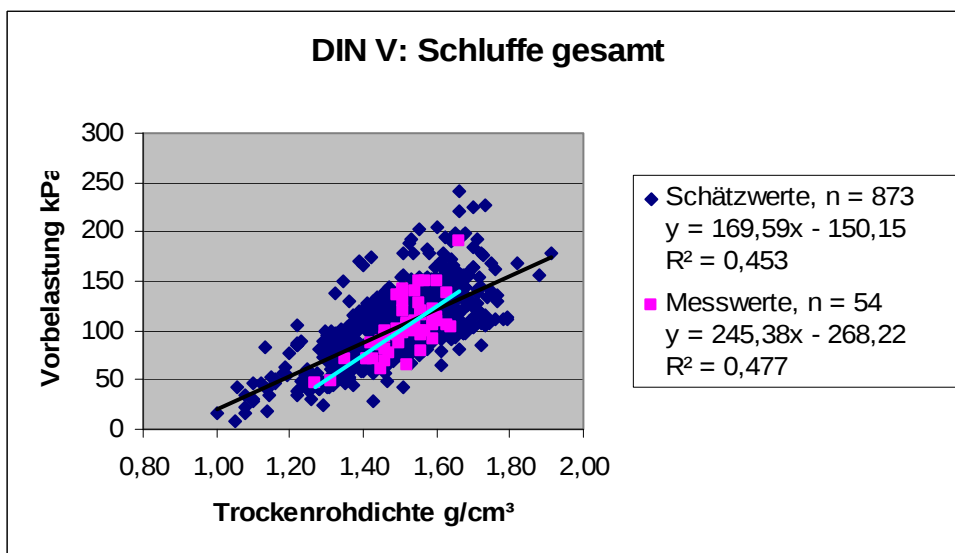
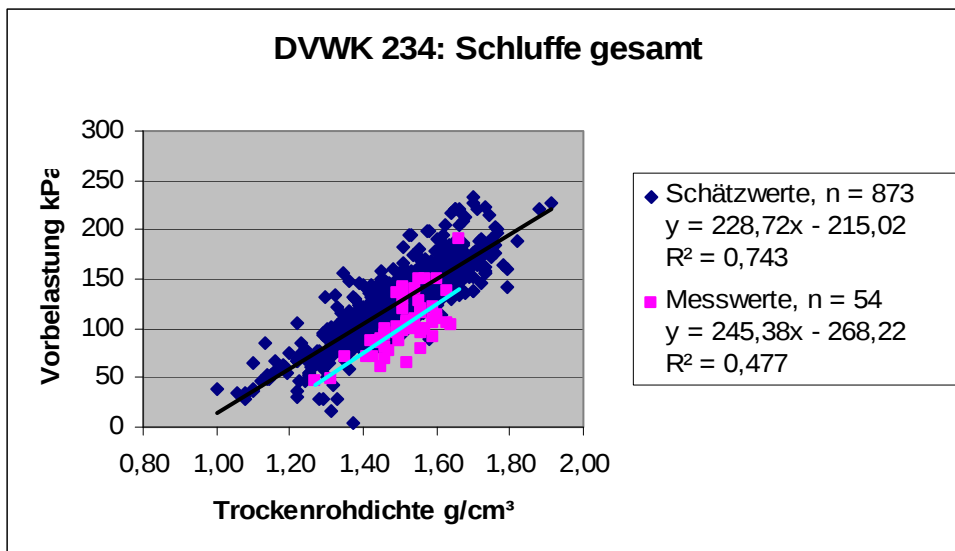


Abbildung 12: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Schluffe (gesamt)

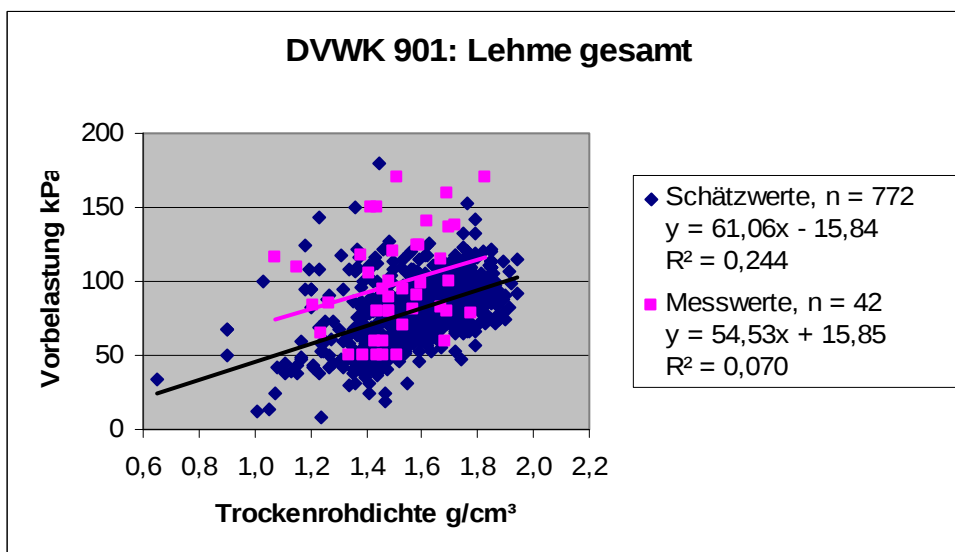
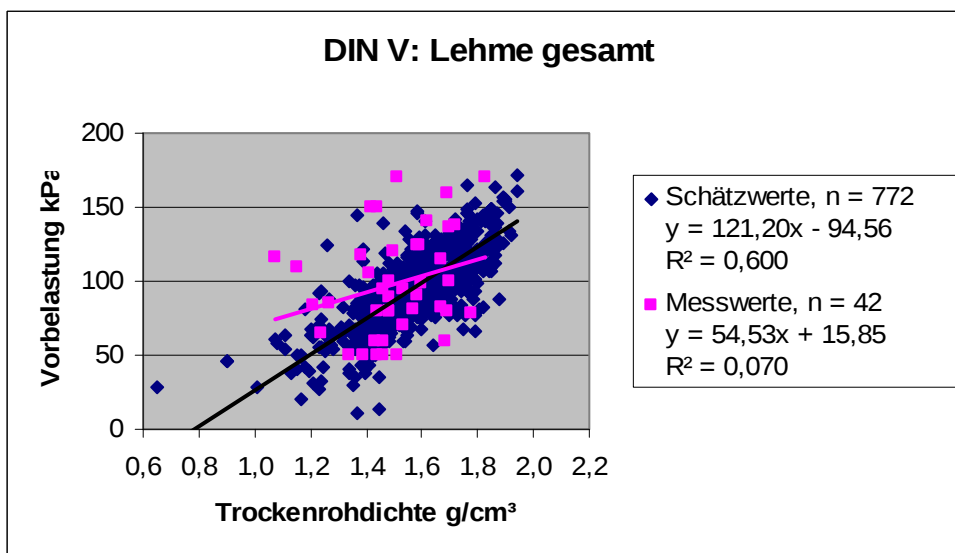
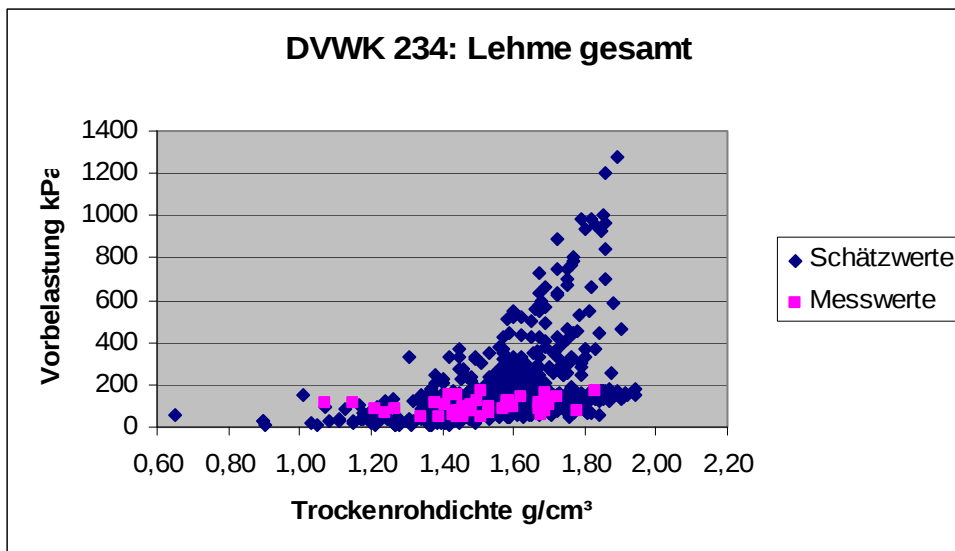


Abbildung 13: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Lehme (gesamt)

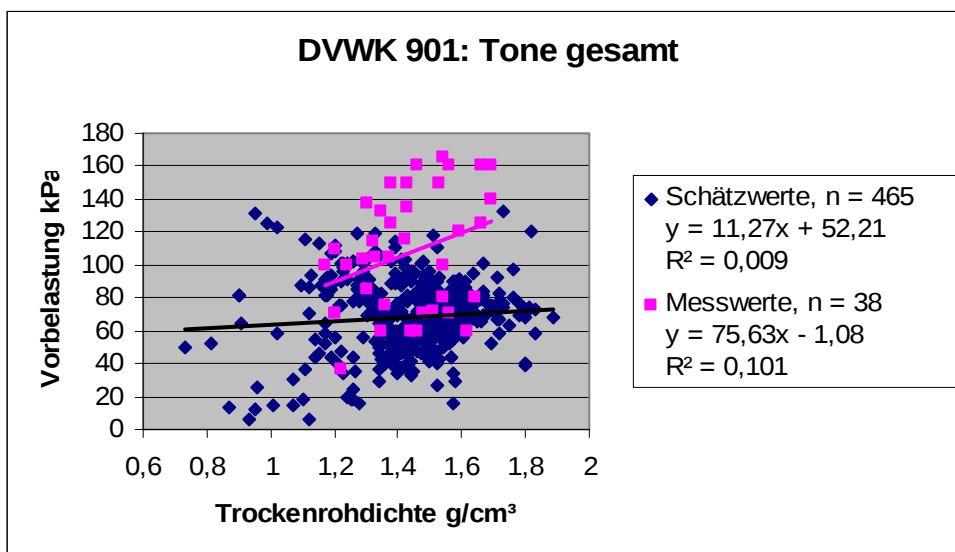
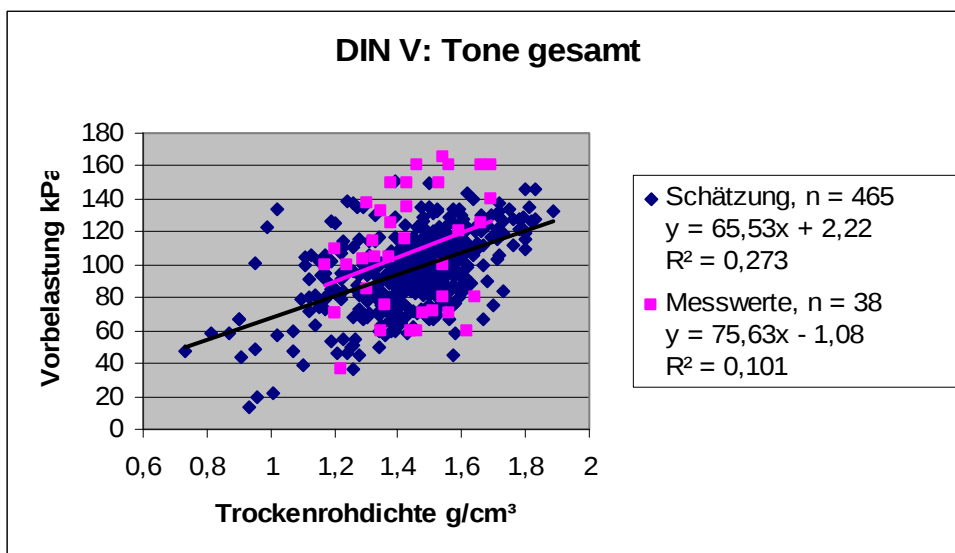
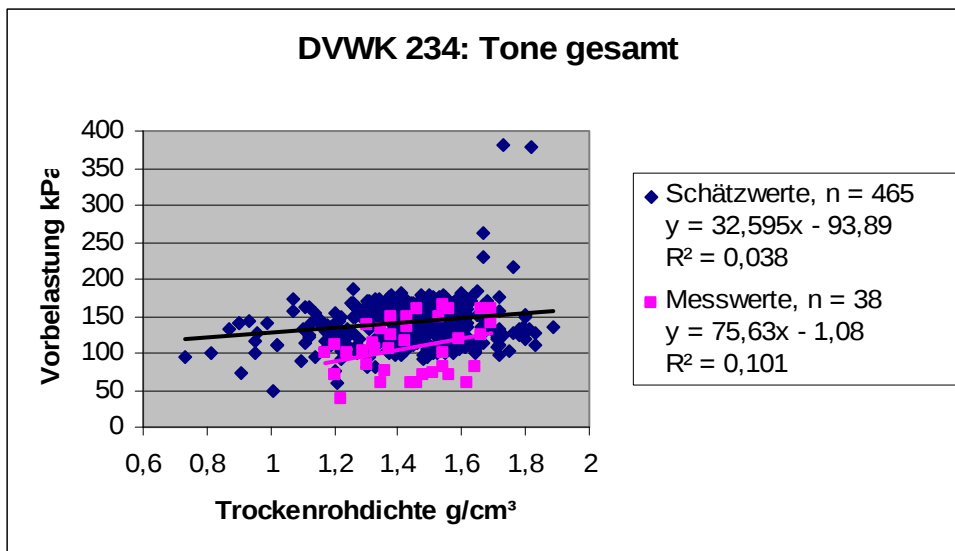


Abbildung 14: Vergleich der Schätzwerte für die Vorbelastung bei pF 1,8 der verschiedenen Regressionsmodelle mit den Referenzmesswerten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für Tone (gesamt)

Bei den Reinsanden und Lehmsanden der Bodenartenuntergruppen Ss, St2, Sl2, Su2 wird die Ausgleichsgerade der Messwerte durch die entsprechende Pedotransferfunktion des Merkblattes DVWK 234 fast exakt getroffen (Abb. 10). Die Schätzwerte liegen allerdings etwas enger um ihre Ausgleichsgerade als die Messwerte. Die Ansätze DIN V und DVWK 901 unterschätzen hier die Vorbelastung stark bei höheren Trockenrohdichten. Ein anderes Bild zeigt sich bei den Schluffsand und Sandlehmen, einschließlich der Bodenart Sl3 (Abb. 11). Hier überschätzt der Ansatz DVWK 234 bei hohen Trockenrohdichten stark und unterschätzt entsprechend bei geringen Trockenrohdichten. Die exakteste Übereinstimmung liefert die DIN Vornorm.

Bei den Schluffen trifft ebenfalls die DIN V am besten die Erwartungstrends (Abb. 12). Es ergibt sich allerdings durch die wesentlich weitere Spanne von Trockenrohdichten bei den Schätzwerten für die Vorbelastung eine geringere Steigung mit der Trockenrohdichte, gegenüber den Messwerten. Der Ansatz nach DVWK 234 überschätzt die Vorbelastungen bei den Schluffen im Vergleich zu den Messwertetendenzen. Bei den Berechnungen mit DVWK 234 wurde für die Schluffe eine Korrektur vorgenommen. Die Bodenartenuntergruppe Ut4 wurde wie in der Originalarbeit nach Lebert (1989) der Gleichung (4) für die übrigen Schluffen zugeordnet anstatt der Gleichung (5). Ohne diese Korrektur würde der Ansatz DVWK 234 deutlichere Abweichungen bei den Schluffen zeigen.

Bei den Lehmen ergeben sich beim Ansatz DVWK 234 extreme Abweichungen zwischen den Erwartungstrends und den Schätzwerten (Abb. 13). Dies liegt zum einen an der beschriebenen Veränderung in der Zuordnung der Bodenartenuntergruppen Tu3 und Lts zur Gleichung (6) im Gegensatz zur Aufteilung in die Gleichungen 5 und 6, je nach Tongehalt nach Lebert (1989). Der Ansatz DVWK 901 zeigt zwar etwa die gleiche Steigung der Ausgleichsgeraden, allerdings liegen die Schätzwerte insgesamt auf einem niedrigeren Niveau, als es die Messwertetrends erwarten lassen. Die DIN V trifft die Erwartungstrends bei den Lehmen am ehesten. Der überwiegende Messwertpulk wird von den Schätzwerten abgebildet, allerdings zeigen die Messwerte größere Abweichungen oberhalb der Ausgleichsgeraden. Die Ausgleichsgerade der Schätzwerte ist steiler als diejenige der Messwerte, was aber angesichts des größeren Spektrums an sehr hohen und sehr geringen Trockenrohdichten eine realistische Korrektur der Erwartungstrends darstellen kann, da diesen entsprechende Stützpunkte fehlen.

Bei den Tonen überschätzt der Ansatz DVWK 234 die Messwertetrends (Abb. 14). Starke Ausreißer sind wieder in den veränderten Zuordnungen zu den Gleichungen (5) und (6) begründet. Der Ansatz DVWK 901 unterschätzt die Messwertetrends klar und zeigt kaum einen Zusammenhang zwischen Vorbelastung und Trockenrohdichte. Am besten werden die Trends bei den Tonen von der DIN V getroffen. Leichte Abweichungen können auch hier durch die größere Variabilität der Schätzwertböden bedingt sein. Allerdings zeigt sich auch hier, wie bei den Lehmen, dass die Variabilität bei hohen Vorbelastungswerten nicht ganz getroffen wird. Die Abweichungen sind bei den Schätzwerten geringer als bei den Messwerten.

Aus der Gegenüberstellung von messwertbasierten Erwartungstrends und den Schätzwerten durch die verschiedenen Regressionsansätze können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Für Reinsande und Lehmsande (ohne Sl3) liefert der Ansatz DVWK 234 plausible Ergebnisse. Für alle anderen Bodenarten eignet sich die DIN V 19688 für die Prognose der Vorbelastung (Tab. 7).

Tabelle 7: Für die Ackerböden Deutschlands geeignete Regressionsansätze zur Schätzung der Vorbelastung bei pF 1,8 in Abhängigkeit von der Bodenart

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartenuntergruppe	Geeigneter Ansatz
Sand	Ss, Sl2, Su2, St2	DVWK 234
	Sl3,4, Su3,4, Slu, St3	DIN V 19688
Schluff	alle Schluffe	DIN V 19688
Lehm	alle Lehme	DIN V 19688
Ton	alle Tone	DIN V 19688

Tabelle 8 zeigt die statistischen Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen der mit den nach Tabelle 7 als geeignet befundenen Pedotransferfunktionen geschätzten Vorbelastung bei pF 1,8 und der Trockenrohdichte. Die Standardfehler der Regression liegen auf einem etwa einheitlichen Niveau um 20 kPa. Sie sind damit geringer als bei den Regressionen zwischen den Messwerten der Vorbelastung und der Trockenrohdichte (vgl. Tab. 6). Die Regressionen weisen auch insgesamt ein höheres Signifikanzniveau auf als bei den Messwerten. Dieser Befund lässt sich dadurch erklären, dass die Anzahl n der Wertepaare bei den Berechnungen mit Pedotransferfunktionen viel höher ist als bei den Messwerten, so dass auch die schwächeren Beziehungen von Vorbelastung und Trockenrohdichten bei den Lehmen und Tonen hochsignifikant sind. Man kann daraus schlussfolgern, dass die Signifikanzniveaus bei den Messwerten auch mit steigender Anzahl n der Wertepaare größer würden.

Tabelle 8: Statistische Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen den Schätzwerten der Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 nach den Pedotransferfunktionen aus Tabelle 7 und der Trockenrohdichte (TRD)

Bodenarten	Regression Pv (kPa) =	n	R²	Standardfehler (kPa)	Signifikanz- niveau
Ss, Sl2, Su2, St2	453,25 TRD – 558,34	786	0,856	22	< 0,001
Sl3,4, Slu, Su3,4	129,20 TRD – 104,00	478	0,553	21	< 0,001
U	169,59 TRD – 150,15	873	0,453	24	< 0,001
L	121,20 TRD – 94,59	772	0,600	18	< 0,001
T	65,53 TRD + 2,22	465	0,273	19	< 0,001

3.1.2. Schätzung der Vorbelastung mit Pedotransferfunktionen

Im Folgenden wird die Vorbelastung bei pF 1,8 als Schätzwert mit den über die Plausibilitätsprüfung als geeignet identifizierten Pedotransferfunktionen aus Tabelle 7 berechnet. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte (LD). Die effektive Lagerungsdichte ersetzt ab hier bei der Auswertung die Trockenrohdichte aus zwei Gründen: zum einen erlaubt die effektive Lagerungsdichte bei gleicher Klasse einen Vergleich über alle Bodenarten (KA5, 2005) und zum anderen ist eine Regionalisierung über die effektive Lagerungsdichte eher möglich, da sie in den Legenden der Leit- und Begleitprofile von Bodenarten aufgeführt ist. Die Umrechnung der Trockenrohdichte (TRD) in die effektive Lagerungsdichte (LD) erfolgt über folgende Gleichung nach Renger (1970):

$$LD (-) = TRD (g/cm^3) + 0,009 \times \text{Tongehalt (Masse \%)} \quad (13)$$

Die Berechnung und Darstellung erfolgt nicht für jede Bodenart einzeln, sondern es werden Gruppen von Bodenarten in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5, 2005) auf dem Niveau der Bodenarten-Gruppe zusammengefasst (Tab. 9). In Abweichung zur KA5 wird allerdings die Bodenart Sl3 nicht den Lehmsanden zugeordnet, sondern den Sandlehmen, da sie anhand der Plausibilitätsprüfung bei hoher Trockenrohdichte eine geringere Vorbelastung hat, als die übrigen Lehmsande.

Tabelle 9: Gruppierung der Bodenarten für die Auswertung in Bodenarten-Gruppen (* = Abweichung gegenüber KA5, 2005)

Bodenarten-Gruppe	Bodenarten-Untergruppe	Anzahl Datensätze
Reinsande	Ss	453
Lehmsande	Sl2, Su2, St2	334
Schluffsande	Su3, Su4	79
Sandlehme	Slu, Sl3*, Sl4, St3	398
Sandschluffe	Us, Uu	36
Lehmschluffe	Ut2, Ut3, Uls	479
Tonschluffe	Ut4, Lu	579
Normallehme	Ls2, Ls3, Ls4, Lt2	431
Tonlehme	Lts, Ts3, Ts4	50
Schlufftone	Tu4, Tu3, Lt3	365
Lehmtone	Tu2, Tl, Ts2, Tt	170

Die Abbildungen 15 bis 25 zeigen die Ergebnisse der Vorbelastungsberechnungen. Sie zeigen sowohl die Einzelergebnisse als auch die Ausgleichsgeraden, welche für die weiteren Auswertungen wichtig sind.

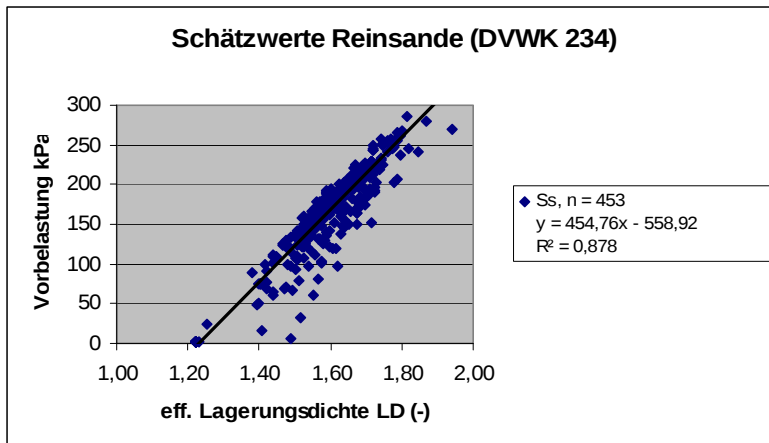


Abbildung 15: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Reinsande in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

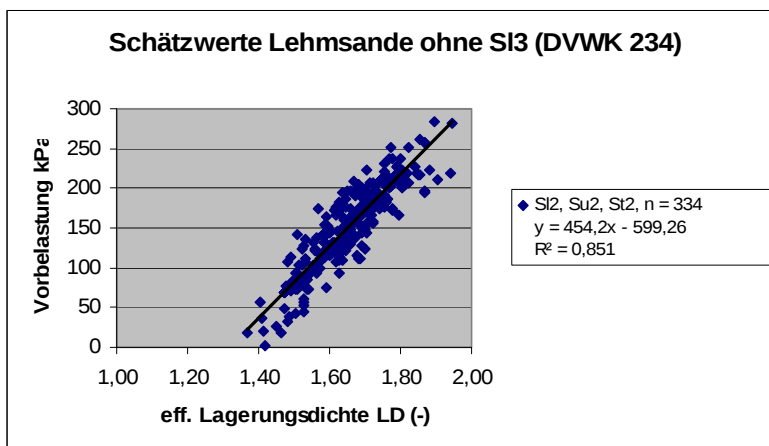


Abbildung 16: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Lehmsande (ohne SI3) in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

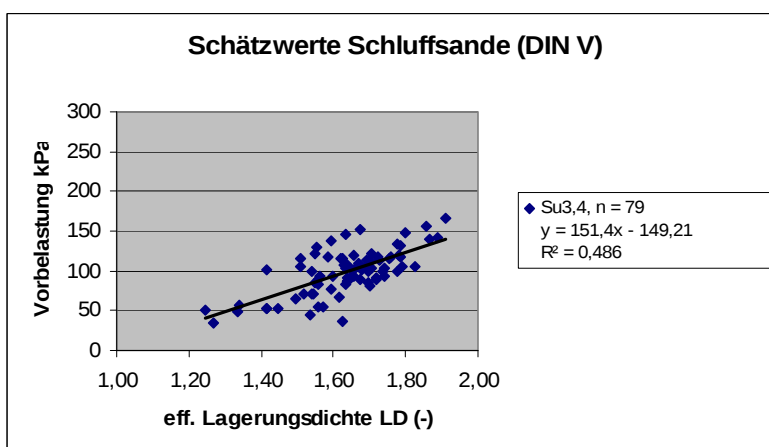


Abbildung 17: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Schluffsande in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

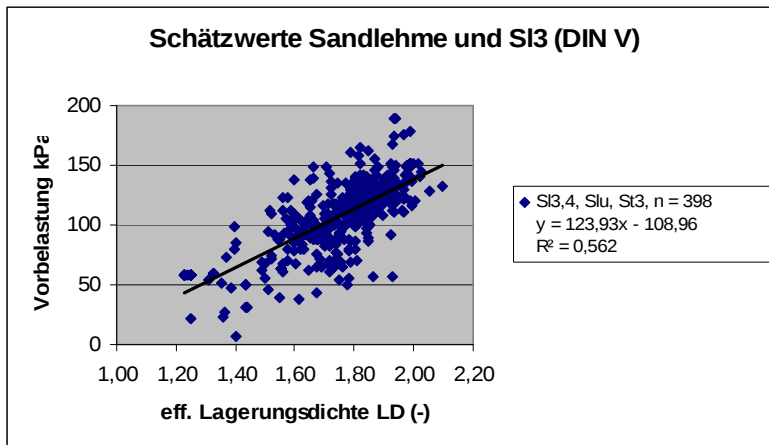


Abbildung 18: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Sandlehme und SI3 in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

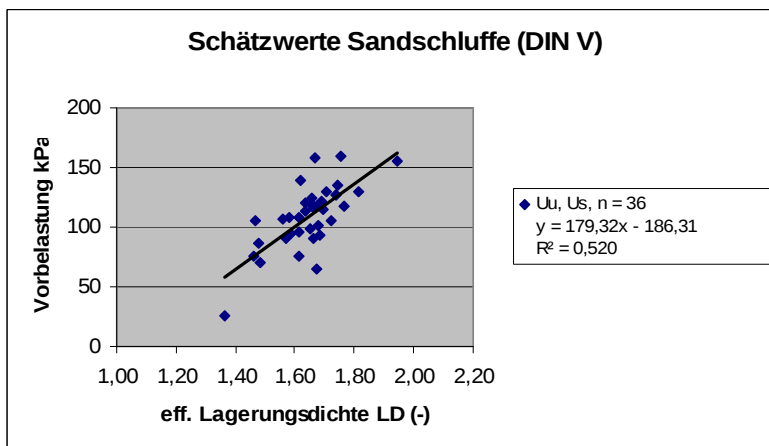


Abbildung 19: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Sandschluffe in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

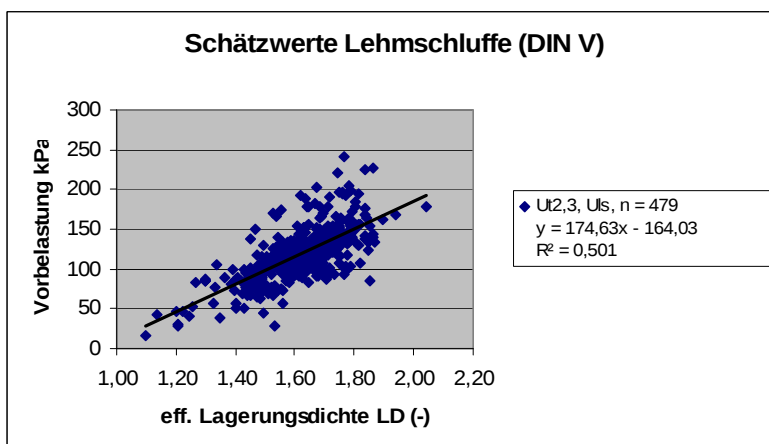


Abbildung 20: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Lehmschluffe in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

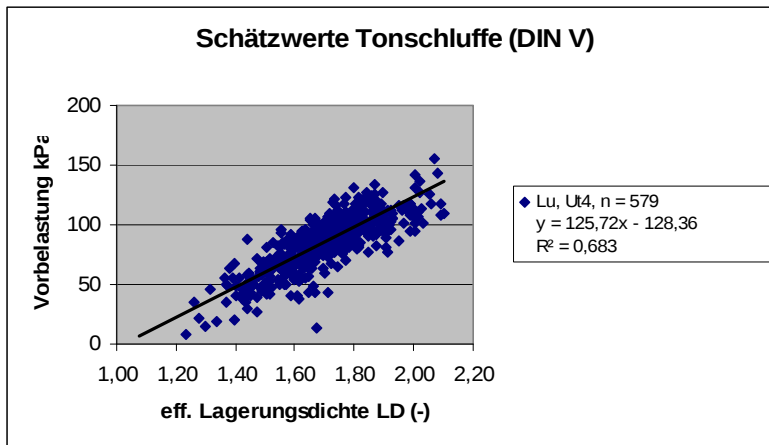


Abbildung 21: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Tonschluffe in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

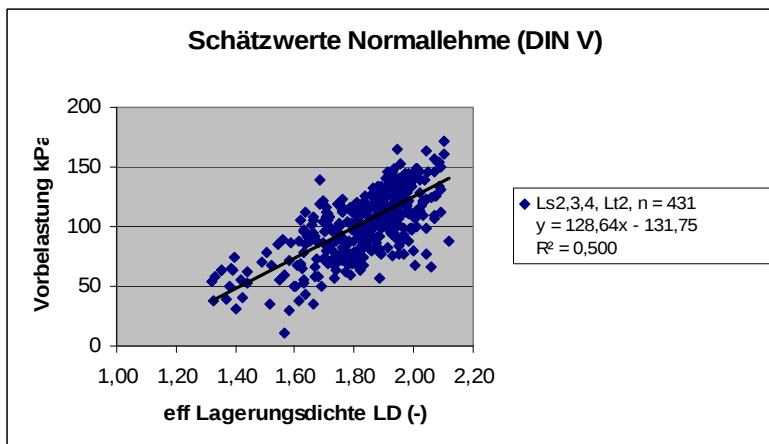


Abbildung 22: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Normallehme in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

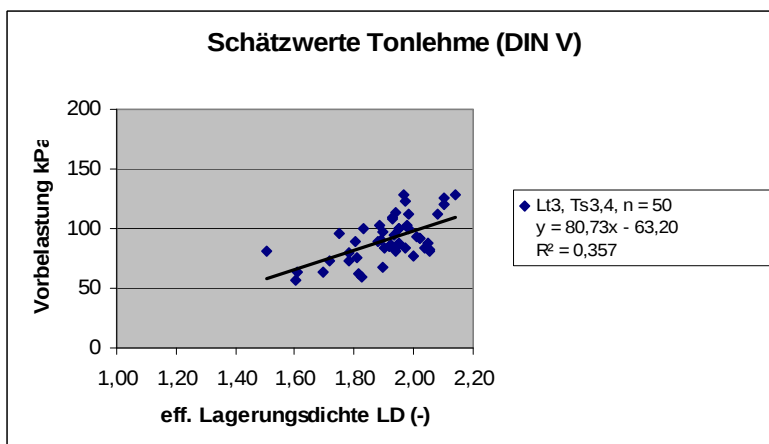


Abbildung 23: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Tonlehme in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

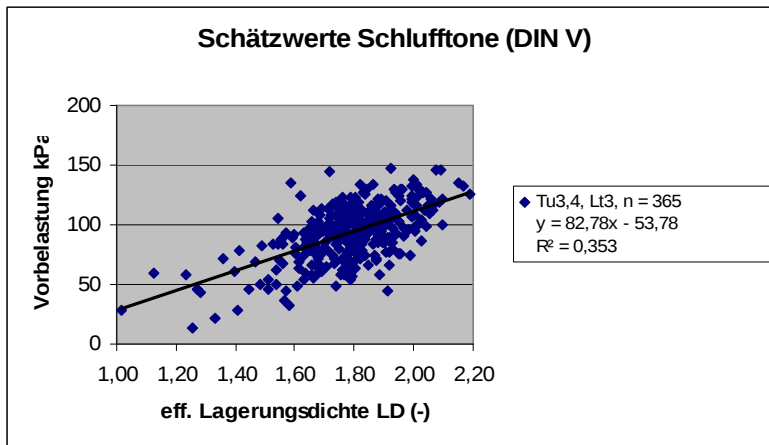


Abbildung 24: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Schlufftone in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

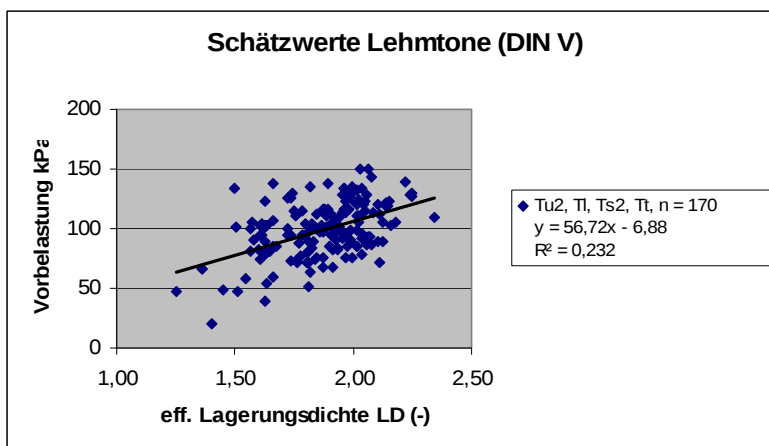


Abbildung 25: Schätzwerte für die Vorbelastung (kPa) bei pF 1,8 für Lehmtonen in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (LD)

Tabelle 10 zeigt die statistischen Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen den mit Pedotransferfunktionen nach Tabelle 7 geschätzten Vorbelastungen bei pF 1,8 und den effektiven Lagerungsdichten. Die Beziehungen sind alle hochsignifikant und der Standardfehler der Schätzungen beläuft sich im Durchschnitt etwa auf 20 kPa.

Die Ergebnisse aus den Abbildungen 15 bis 25 können zur Übersicht in Tabellenform dargestellt werden, in dem für die Mittelwerte der Klassen für die effektive Lagerungsdichte der jeweilige Vorbelastungswert aus den Ausgleichsgeraden abgeleitet wird. Die effektive Lagerungsdichte wird nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, 2005) in 5 Klassen eingeteilt (Tab. 11). Vor einer Zuordnung muss jedoch geprüft werden, ob der Klassenmittelwert für die entsprechende Klasse für die effektive Lagerungsdichte bei den jeweiligen Bodenarten-Gruppen auch repräsentativ ist. Bei den Sanden kommt die höchste Klasse LD 5 gar nicht vor (Tab. 12). Auch bei der Klasse LD 4 liegen die Reinsande und Lehmsande schwerpunktmäßig im unteren Bereich, so dass der Klassenmittelwert von LD = 1,90 nicht repräsentativ ist. Das gleiche gilt auch für die Lehmschluffe. Die kleinste Klasse LD 1 kommt insgesamt nicht sehr

Tabelle 10: Statistische Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen Schätzwerten zur Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 nach den geeigneten Pedotransferfunktionen aus Tabelle 7 und der effektiven Lagerungsdichte (LD)

Bodenarten-Gruppe	Regression Pv (kPa) =	n	R²	Standardfehler (kPa)	Signifikanz- niveau
Reinsande	454,76 LD – 558,92	453	0,787	20	< 0,001
Lehmsande (ohne SI3)	454,20 LD – 599,26	334	0,851	22	< 0,001
Schluffsande	151,40 LD – 149,21	79	0,486	21	< 0,001
Sandlehme (mit) SI3	123,93 LD – 108,96	398	0,562	21	< 0,001
Sandschluffe	179,32 LD – 186,31	36	0,520	19	< 0,001
Lehmschluffe	174,63 LD – 164,03	479	0,501	23	< 0,001
Tonschluffe	125,72 LD – 128,36	579	0,683	13	< 0,001
Normallehme	128,64 LD – 131,75	431	0,500	20	< 0,001
Tonlehme	80,73 LD – 63,20	50	0,357	14	< 0,001
Schlufftone	82,78 LD – 53,78	365	0,353	18	< 0,001
Lehmtone	56,72 LD – 6,88	170	0,232	20	< 0,001

häufig vor, ist aber mit Ausnahme der Tonlehme in allen Bodenarten-Gruppen vertreten. Für die Zuordnungen zu dieser Klasse wird ein mittlerer Wert von LD = 1,30 eingesetzt. Bei den LD-Klassen 2 und 3 können die Klassenmittelwerte (LD = 1,50 und 1,70) durchgängig für alle Bodenarten-Gruppen als repräsentativ angesehen werden. Für LD-Klasse 4 erfolgt die Zuordnung für Reinsande, Sandlehme und Lehmschluffe nach den realen, in Tabelle 12 angegebenen Mittelwerten. Für die übrigen Bodenarten-Gruppen wird der Klassenmittelwert von LD = 1,90 als repräsentativ angenommen. Für die Zuordnungen in LD-Klasse 5 wird ein mittlerer Wert von 2,05 angesetzt.

Tabelle 11: Einstufung und Klassenmittelwerte der effektiven Lagerungsdichte von Mineralböden nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, 2005).

Bezeichnung	Stufe	effektive Lagerungsdichte LD (-)	Klassenmittelwert LD
sehr gering	1	< 1,4	
gering	2	1,4 bis < 1,6	1,50
mittel	3	1,6 bis < 1,8	1,70
hoch	4	1,8 bis < 2,0	1,90
sehr hoch	5	≥ 2,0	

Tabelle 12: Mittelwerte der effektiven Lagerungsdichte der Untersuchungsböden in den verschiedenen Klassen für die effektive Lagerungsdichte (* = Klassenmittelwert nach Tabelle 8 nicht repräsentativ)

Bodenarten-Gruppe	Mittelwerte der effektiven Lagerungsdichte in der Klasse				
	LD 1	LD 2	LD 3	LD 4	LD 5
Reinsande	1,24 n = 18	1,53 n = 165	1,67 n = 262	1,84* n = 8	
Lehmsande ohne SI3	1,38 n = 1	1,52 n = 101	1,70 n = 201	1,84* n = 30	
Schluffsande	1,30 n = 4	1,53 n = 23	1,69 n = 46	1,86 n = 6	
Sandlehme und SI3	1,28 n = 30	1,53 n = 42	1,71 n = 145	1,88 n = 172	2,02 n = 9
Sandschluffe	1,36 n = 1	1,52 n = 8	1,68 n = 25	1,88 n = 2	
Lehmschluffe	1,28 n = 20	1,52 n = 163	1,69 n = 267	1,84* n = 8	2,05 n = 1
Tonschluffe	1,30 n = 15	1,52 n = 113	1,71 n = 314	1,87 n = 118	2,04 n = 19
Normallehme	1,36 n = 9	1,51 n = 10	1,71 n = 109	1,91 n = 242	2,04 n = 52
Tonlehme		1,50 n = 1	1,71 n = 7	1,92 n = 30	2,06 n = 12
Schlufftone	1,24 n = 9	1,52 n = 25	1,72 n = 152	1,88 n = 147	2,05 n = 32
Lehmtone	1,32 n = 3	1,52 n = 10	1,68 n = 37	1,90 n = 75	2,09 n = 45

Die Berechnungen der Vorbelastungen bei den entsprechenden Klassenmittelwerten für die effektive Lagerungsdichte zeigt Tabelle 13. Wie schon anhand der Auswertungen in der Plausibilitätsprüfung und anhand der Ergebnisdarstellungen in den Abbildungen 15 bis 25 zu erwarten war, weisen die Reinsande und Lehmsande bei höherer Dichte die höchsten Vorbelastungen auf. Die Schluffsande und Sandlehme erreichen allerdings keine vergleichbar hohen Vorbelastungen und werden bei den LD-Klassen 3 und 4 von den Sand- und Lehmschluffen leicht übertroffen. Der Grund hierfür kann im höheren Ungleichförmigkeitsgrad der Schluffsande und Sandlehme liegen, die dadurch ein höheres Verdichtungspotenzial bei gleichem Druck haben. Die geringsten Vorbelastungen, auch bei hoher effektiver Lagerungsdichte, weisen die Tonschluffe, Normallehme, Tonlehme, Schlufftone und Lehmtone auf. Diese Ergebnisse stimmen mit Untersuchungen von Lebert und Schäfer (2005) an niedersächsischen Böden weitgehend überein.

Tabelle 13: Aus den Ausgleichsgeraden der Abbildungen 15 bis 25 berechnete Vorbelastung bei pF 1,8 in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte (LD), durch Einsetzen des repräsentativen LD-Wertes der jeweiligen LD-Klasse

Bodenarten-Gruppe	Vorbelastung (kPa) bei verschiedenen LD-Klassen				
	LD 1	LD 2	LD 3	LD 4	LD 5
Reinsande	32	123	214	278	
Lehmsande ohne SI3		82	173	236	
Schluffssande	48	78	108	138	
Sandlehme und SI3	52	77	102	127	145
Sandschluffe	47	83	119	154	
Lehmschluffe	63	98	133	157	
Tonschluffe	35	60	85	111	129
Normallehme	35	61	87	113	132
Tonlehme		58	74	90	102
Schlufftone	54	70	87	104	116
Lehmtone	67	78	90	101	109

3.1.3. Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit

3.1.3.1. Klassifizierung

Für eine Ableitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit aus der Vorbelastung muss zunächst eine Klassifizierung vorgenommen werden. Klassifizierungsvorschläge für die Vorbelastung sind in der DIN Vornorm 19688 und im Merkblatt DVWK 234 vorhanden (Tab. 14). In der DIN V richtet sich die Klasseneinteilung nach dem Modalwert für die Vorbelastung bei pF 1,8, der für die zugrunde liegenden Messwerte etwa bei 100 kPa liegt. Es werden Klassenbreiten von 20 kPa festgelegt und die Klasse „mittel“, welche den Modalwert enthält, hat eine Spanne von 90 – 110 kPa. Bei einer Gesamtzahl von 5 Klassen entspricht die Klasse „sehr hoch“ Vorbelastungen von größer 130 kPa. Darüber findet keine Differenzierung statt. Im Merkblatt DVWK 234 sind die Klassenbreiten auf 30 kPa festgelegt. Klasse „mittel“ entspricht Vorbelastungen von 60 – 90 kPa, Klasse „sehr hoch“ Vorbelastungen von 120 – 150 kPa und Vorbelastungen über 150 kPa enthält die Klasse „extrem hoch“.

Bei Auswertungen größerer Datensätze aus Niedersachsen und deren kartographischer Darstellung stellten Lebert und Schäfer (2005 und 2007) fest, dass die Klasseneinteilungen beider Richtlinien dem Gesamtspektrum von häufig vorkommenden Vorbelastungen nicht gerecht wird. Bei Sanden treten häufig Werte von über 200 kPa auf. Bei tonigen Böden hingegen treten bei mittlerer Dichtlagerung häufig Vorbelastungen von kleiner 80 kPa auf. Die Autoren schlugen deshalb vor, die Grenzen für sehr hohe Vorbelastung bei 200 kPa und für sehr geringe Vorbelastung bei 80 kPa zu ziehen. Um den relativ hohen Streubreiten der Vorbelastungen Rechnung zu tragen, wurden die Klassenbreiten auf 40 kPa festgelegt.

Tabelle 14: Einstufungen der Vorbelastung nach DIN Vornorm 19688 und DVWK Merkblatt 234

DIN Vornorm 19688		Merkblatt DVWK 234	
Vorbelastung kPa	Einstufung	Vorbelastung kPa	Einstufung
< 70	sehr gering	< 30	sehr gering
70 - < 90	gering	30 - 60	gering
90 - < 110	mittel	60 - 90	mittel
110 - < 130	hoch	90 - 120	hoch
≥ 130	sehr hoch	120 - 150	sehr hoch
		> 150	extrem hoch

Im Vorhaben wird der Klassifizierungsvorschlag von Lebert und Schäfer (2005) übernommen. Die Festsetzung der Klassenbreiten auf 40 kPa erfährt im Vorhaben dadurch eine Bestätigung, dass die Standardfehler der Schätzung im Mittel etwa 20 kPa betragen (vgl. Tab.10). Es ergeben sich somit 6 Klassen für die Vorbelastung und die daraus resultierende mechanische Verdichtungsempfindlichkeit (Tab. 15). Diese Klassifizierung entspricht auch dem Spektrum von vertikalen Druckbelastungen im Unterboden bei Befahrungen mit landwirtschaftlichen Maschinen, die Werte von über 200 kPa erreichen können (Stahl et al., 2005). Dieser Sachverhalt ist wichtig für die Gegenüberstellung von Druck und Vorbelastung in weiter führenden Konzepten zum Bodenschutz.

Tabelle 15: Einstufung der Vorbelastung und Ableitung von Klassen der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit (nach Lebert und Schäfer, 2005)

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

3.1.3.2. Schätzrahmen nach Bodenart und effektiver Lagerungsdichte

Ordnet man die Vorbelastungen nach Tabelle 13 den Klassifizierungen in Tabelle 15 zu, so kann die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit in Klassen aus der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte hergeleitet werden. Tabelle 16 stellt einen vereinfachten Schätzrahmen zur Ermittlung von Vorbelastung und mechanischer Verdichtungsempfindlichkeit dar, im Vergleich zur aufwändigeren Ermittlung der gleichen Größen über die Pedotransferfunktionen aus Tabelle 4. Der Schätzrahmen erleichtert die Anwendung des Vorbelastungskonzeptes und erlaubt eine unkomplizierte Herleitung über Bodenkarten. Mithilfe dieser Zusammenstellung kann für jeden beliebigen Ackerboden in Deutschland die mechanische Verdich-

tungsempfindlichkeit bei pF 1,8 abgeleitet und regionalisiert werden. Es müssen allerdings noch weitere, bodenkundliche Kriterien berücksichtigt werden.

Tabelle 16: Schätzrahmen für die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 für Ackerböden in Deutschland in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte LD (in Klammern: extrapolierte Werte, die im Datenbestand nicht vorkommen)

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

3.1.3.3. Zu- und Abschlüsse nach bodenkundlichen Kriterien

Bei der Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit nach Tabelle 16 müssen zusätzliche bodenkundliche Aspekte berücksichtigt werden. Die Vorbelastung beschreibt das mechanische Verhalten von Granulaten, deren Einzelteile zum überwiegenden Teil Festkörpereigenschaften haben müssen. Das trifft generell nicht für organische Böden zu. Hoch- und Niedermoore, Hortisole und Horizonte aus organischen Mudden müssen deshalb von der Zuordnung ausgeschlossen werden.

Die Pedotransferfunktionen nach DIN V 19688 und DVWK M 234 wurden anhand von Messdaten aus Böden erstellt, die keine Skelettgehalte von über 25 Vol.% und keine Verfestigungsgrade höher als Vf2 nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, 2005) aufweisen. Beide Größen haben aber einen Einfluss auf die Vorbelastung. In Abhängigkeit von Skelettgehalt und Verfestigungsgrad werden deshalb pauschale Abschlüsse auf die jeweilige Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit nach Tabelle 16 erhoben (Tab. 17). Hohe Verfestigungsgrade können bei Gleyen und Podsolon auftreten und betreffen häufig sandige Böden.

Die Gesetzmäßigkeiten der Pedotransferfunktionen gelten nur für Mineralböden aus natürlichem Ausgangsgestein. Für Böden aus technogenen Substraten, wie Bauschutt oder Müll, sind sie nicht anwendbar. Für Herleitungen zu technogen umgelagerten, natürlichen Materialien, wie z.B. Kippen oder tiefumgebrochene oder tiefgelockerte Böden haben die Pedotransferfunktionen nur eingeschränkt Gültigkeit. Gestörte, nicht natürlich gelagerte Bodengefüge

haben bei gleicher Lagerungsdichte eine verringerte Scherfestigkeit. Für solche Böden wird deshalb pauschal ein Zuschlag von einer Klasse auf die jeweilige Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit nach Tabelle 16 erhoben. Zu- und Abschlüsse werden nur erhoben, solange die höchste und die kleinste Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit noch nicht erreicht sind.

Tabelle 17: Zu- und Abschlüsse in Klassen auf die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit nach Tabelle 16

Betroffene Böden	Zu- und Abschlüsse in Klassen
umgelagerte Böden, Tiefumbruchböden	+1
Böden mit Skelettgehalten	
25 - < 50 Vol. %	-1
50 - < 75 Vol. %	-2
≥ 75 Vol. %	-3
Böden mit Verfestigungsgrad	
Vf3	-1
Vf4 und Vf5	-2

3.1.3.4. Zu- und Abschlüsse nach Bodenwassergehalt

Die bisher beschriebenen Betrachtungen zur Vorbelastung und zur mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit beziehen sich auf den Bodenwassergehalt von pF 1,8. Ein Prüfkonzept zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung muss jedoch über die gesamte Spanne von Wassergehalten anwendbar sein, bei denen nutzungsbedingte Verdichtungen zu erwarten sind. Das Konzept muss deshalb um die Einflüsse des Wassergehaltes auf die Vorbelastung und die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit erweitert werden. Im Vorhaben wird ein Ansatz von Rücknagel (2006) verwendet, der einen Korrekturfaktor für die Vorbelastung bezogen auf den Ausgangswert bei pF 1,8 errechnet hat (Abb. 26). Grundlage des Korrekturfaktors nach Rücknagel sind Literaturangaben von Bradford und Gupta (1986), Horn (1986), Lebert (1989), Nissen (1999), Arvidsson (2001), Arvidsson et al. (2003), Berli et al. (2003) und Keller et al. (2004) für Vorbelastungswerte, die bei unterschiedlichen Wassergehalten ermittelt wurden. Die Formel für den Korrekturfaktor k_w lautet:

$$k_w = 2,834 - 0,927 \cdot \log \text{Vorbelastung (kPa)} - 0,028 \cdot \% \text{ FK} + 1,67 \cdot 10^{-7} \cdot \% \text{ FK} + 0,009 \cdot \log \text{Vorbelastung (kPa)} \cdot \% \text{ FK} \quad (14)$$

Mithilfe des Korrekturfaktors wurde im Vorhaben die Veränderung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Anfangswert der Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 und dem Wassergehalt in % Feldkapazität (FK) berechnet (Tab. 18). Es werden nur Abschlüsse auf die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bis zur Klasse 1 (= „sehr gering“) erhoben, aber nicht darüber hinaus. So erreicht ein Boden mit der Anfangsklasse 5 für die Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 (= sehr hoch) erst bei einer Austrocknung auf 50% Feldkapazität durch Abschlüsse von 4 Klassen die Klasse 1 (= sehr gering).

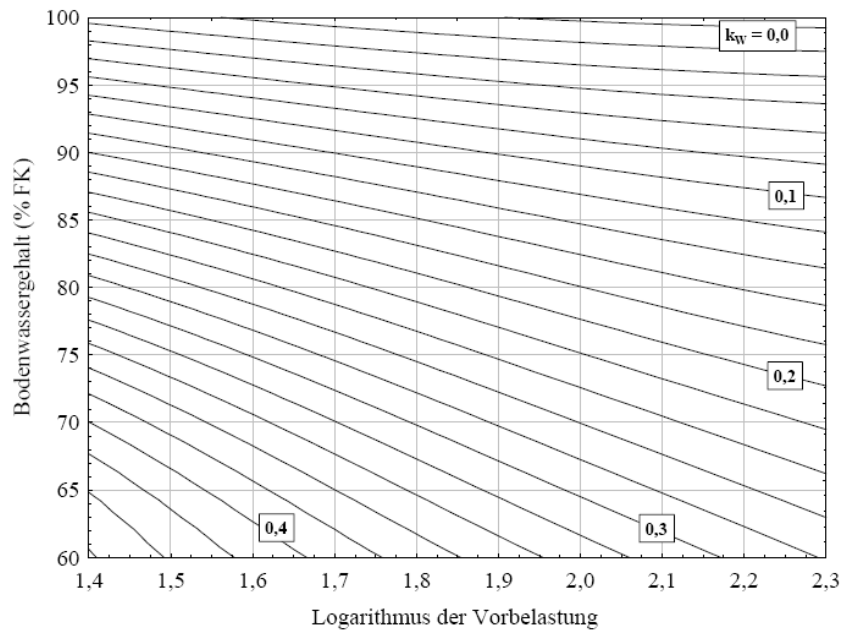


Abbildung 26: Korrekturfaktor für die Berechnung der Vorbelastung bei unterschiedlichen Wassergehalten auf der Basis der Vorbelastung bei pF 1,8 (aus Rücknagel, 2006)

Für Böden die feuchter sind als pF 1,8 und demzufolge einen Wassergehalt von größer 100 % Feldkapazität aufweisen, wird ein pauschaler Zuschlag auf die Verdichtungsempfindlichkeit von 1 Klasse erhoben. Betroffen sein können alle Böden nach lang anhaltenden, heftigen Niederschlägen, oder Böden mit hohem Grundwasserstand. Zuschläge werden nicht über die geringste Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit hinaus erhoben.

Tabelle 18: Abschläge in Klassen auf die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 nach Tabelle 16 in Abhängigkeit vom Wassergehalt in % Feldkapazität (FK)

Klasse bei pF 1,8	Zu- und Abschläge in Klassen in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt bei					
	> 100 % FK	90 % FK	80 % FK	70 % FK	60 % FK	50 % FK
6	0	0	-1	-1	-2	-3
5	+1	-1	-1	-2	-3	-4
4	+1	-1	-1	-2	-3	-3
3	+1	-1	-2	-2	-2	-2
2	+1	-1	-1	-1	-1	-1
1	+1	0	0	0	0	0

3.1.4. Regionalisierung

Mit den Zuordnungen in den Tabellen 16, 17 und 18 kann die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit in Bodenkarten dargestellt werden. Die Darstellung ist grundsätzlich für jeden Maßstab möglich. Im Vorhaben erfolgt die Darstellung über die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000 N, 2007). Bei den Einstufungen über die BÜK 1000 ist die maßstabsbedingte, relativ starke Generalisierung der Bodenformen zu berücksichtigen. Da die Einstufungen von den Zuordnungen der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte in der Bodenkarte abhängen, sind Abweichungen bei Darstellungen über Karten im größeren Maßstab, wie z.B. 1:50.000 (BÜK 50 / BK 50) oder die Bodenschätzung (1:5.000) möglich. Die Darstellung über die BÜK 1000 gibt jedoch einen Überblick über die mechanische Beschaffenheit der Bodenlandschaften, die eine sehr differenzierte Verdichtungsempfindlichkeit aufweisen.

Karte 2 zeigt die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 nach den Zuordnungen aus den Tabellen 16 und 17. Eine sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit (Klasse 5) weisen die Marschen der Küstenregion, Böden aus Tuffen und tonigen Fluss- und Auensedimenten auf. Eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit (Klasse 4) haben die Geschiebelehme der Jungmoränenlandschaft, Böden der Lössgebiete und des Tertiärhügellandes mit Tonschluffen und Schlufftonen als vorherrschende Bodenarten, Flussauen aus Sandlehmen und Böden aus tonig verwitternden Gesteinen.

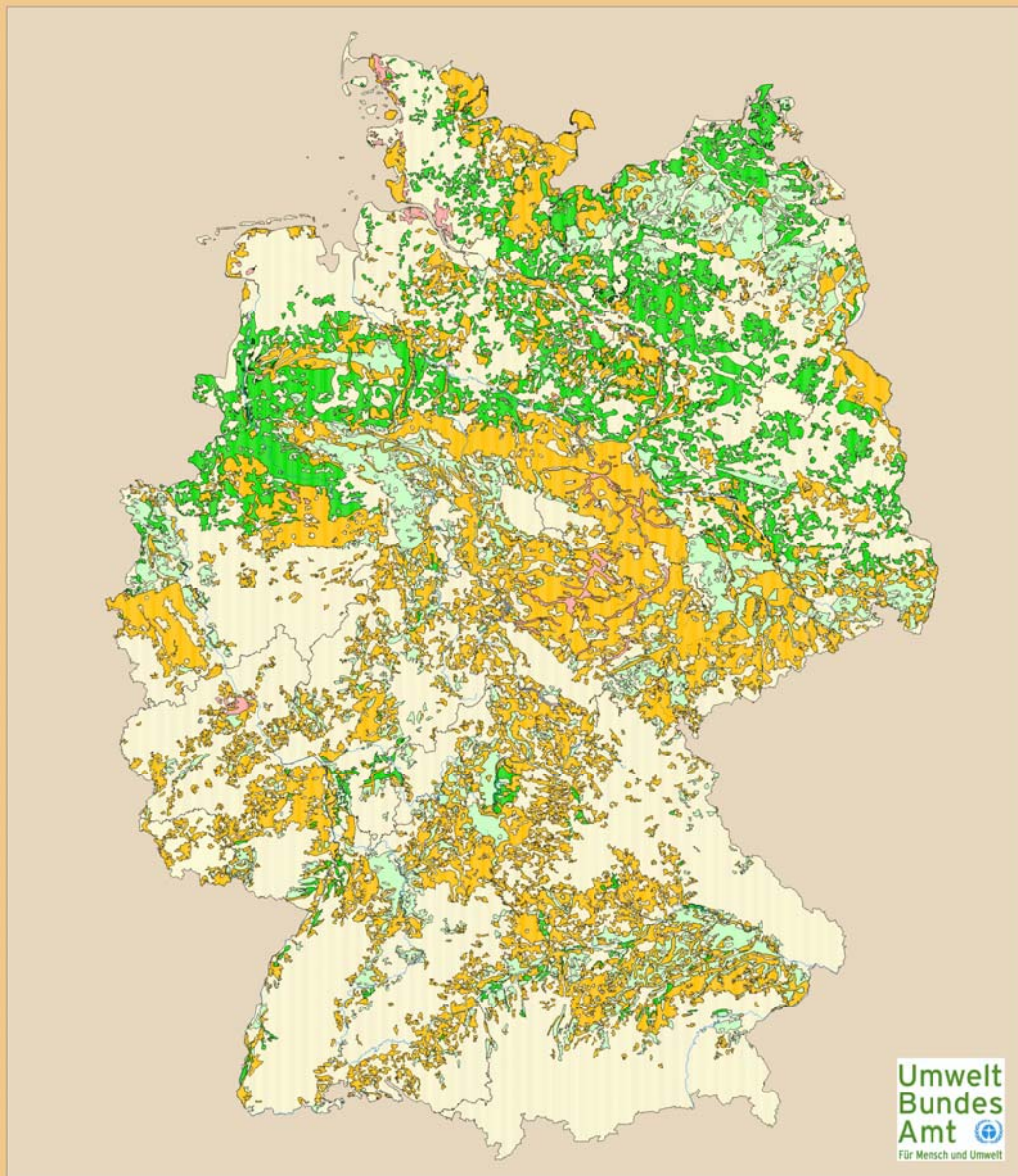
Mittlere Verdichtungsempfindlichkeit (Klasse 3) weisen die Sandlehme der Jungmoränenlandschaft, die Sandlössgebiete und die Lössgebiete mit Lehmschluffen als dominierende Bodenart und mit Verwitterungsbeimischungen auf.

Geringe mechanische Verdichtungsempfindlichkeit (Klasse 2) besteht in den sandigen Landschaften der Altmoränengebiete und in sandigen Terrassenablagerungen.

Sehr geringe mechanische Verdichtungsempfindlichkeit (Klasse 1) käme vorwiegend auf den Böden aus Reinsand vor, die jedoch über die BÜK 1000 N (Version 2007) kaum ausgewiesen werden.

Die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei einer Bodenfeuchte von pF 1,8 wird im Vorhaben als potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit bezeichnet, da sie einem hohen Bodenwassergehalt von 100 % Feldkapazität entspricht. Als potenzielle Betrachtung enthält Karte 2 eine Ausweisung von höher und geringer empfindlichen Gebieten und gibt einen Überblick der entsprechenden Flächenverteilung. Bei einer hohen Bodenfeuchte von pF 1,8 überwiegen mit einem Anteil von 54 % die Flächen mit hoher Verdichtungsempfindlichkeit. Das ist auch zu erwarten, denn es ist allgemeiner Konsens, dass Böden im feuchten Zustand grundsätzlich verdichtungsempfindlicher sind als im trockenen Zustand. Dennoch gibt es bei dieser Feuchte deutliche Unterschiede zwischen den Böden. Das Ergebnis zeigt, wie wichtig es ist, Bodenunterschiede bei der Erstellung von Bodenschutzkonzepten gegen Verdichtungen zu berücksichtigen. In den Karten 3 bis 5 ist die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei geringeren Bodenwassergehalten dargestellt. Bei Austrocknung verändern sich die Flächenanteile gemäß der Abschlüsse aus Tabelle 18 in Richtung geringerer Verdichtungsempfindlichkeit. Bei 80 % Feldkapazität ist eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit kaum noch vorhanden (Karte 3). Die Flächen, die bei pF 1,8 eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit hatten, sind jetzt in der Klasse „mittel“. Der Anteil an Flächen mit sehr geringer Verdichtungsempfindlichkeit beträgt 42 %. Bei weiterer Austrocknung auf 70 % Feldkapazität steigt der Anteil gering verdichtungsempfindlicher Flächen weiter an (Karte 4). Die Böden haben bei diesem Wassergehalt nur noch eine geringe bis sehr geringe Verdichtungsempfindlichkeit. Bei 60 % Feldkapazität sind fast alle Flächen sehr gering verdichtungsempfindlich (Karte 5).

Potentielle mechanische Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen bei pF 1,8



Einstufung

- sehr gering
- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch
- keine Ackernutzung

Flächenanteile

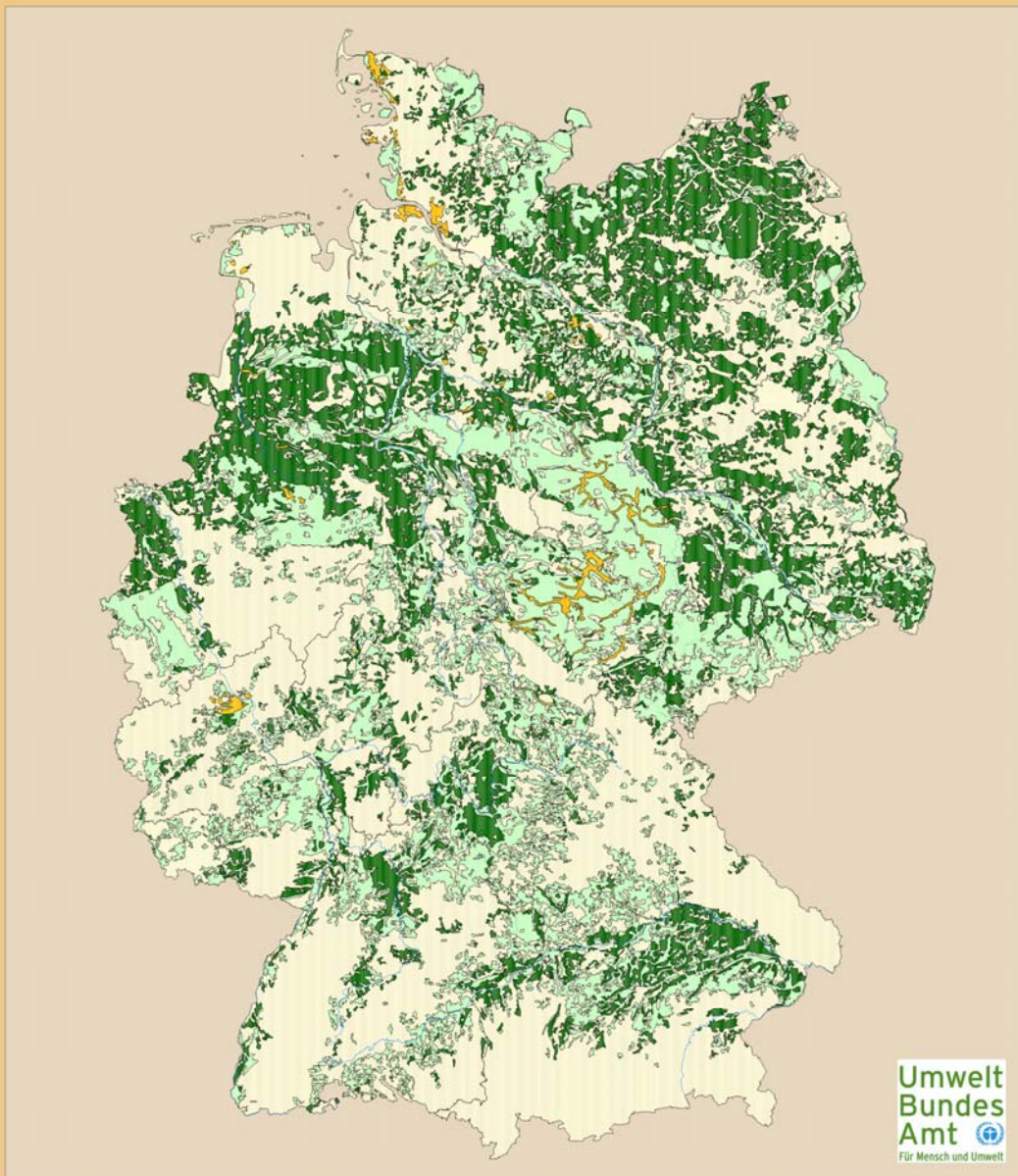
	0
	22
	20
	52
	2

(in % Ackerfläche)

Kartengrundlage:
Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte
der Bundesrepublik Deutschland - BÜK 1000 N,
Bundesanstalt f. Geowissenschaften und
Rohstoffe, Hannover 2007

Karte 2: Darstellung der potenziellen, mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen bei 80% FK



Einstufung

- sehr gering
- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch
- keine Ackernutzung

Flächenanteile

sehr gering	42
gering	0
mittel	52
hoch	2
sehr hoch	0
keine Ackernutzung	0

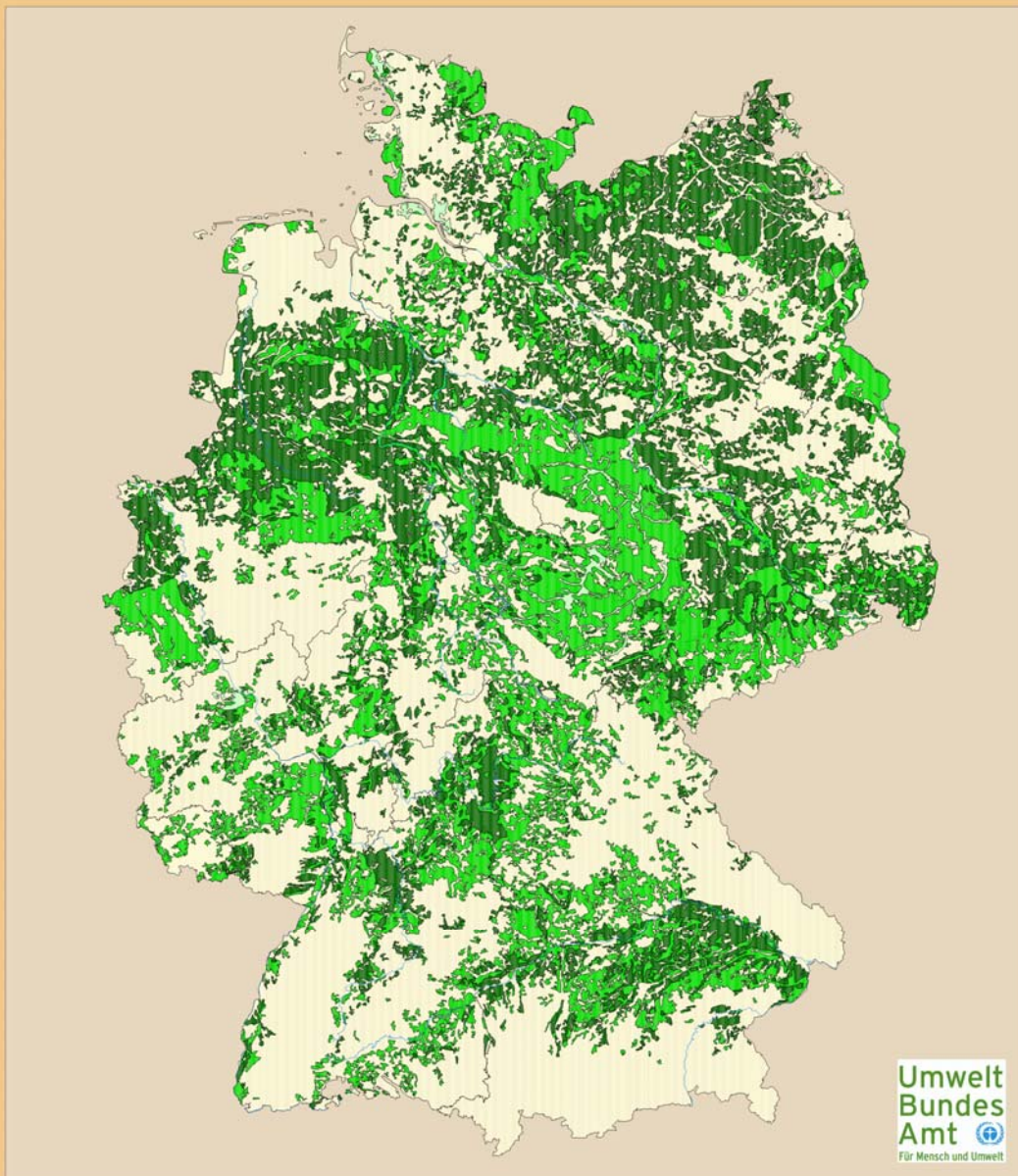
(in % Ackerfläche)

Kartengrundlage:
Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte
der Bundesrepublik Deutschland - BÜK 1000 N,
Bundesanstalt f. Geowissenschaften und
Rohstoffe, Hannover 2007

Umwelt
Bundes
Amt
Für Mensch und Umwelt

Karte 3: Darstellung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik bei einem Bodenwassergehalt von 80% Feldkapazität (FK) über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen bei 70% FK



Einstufung

- sehr gering
- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch
- keine Ackernutzung

Flächenanteile

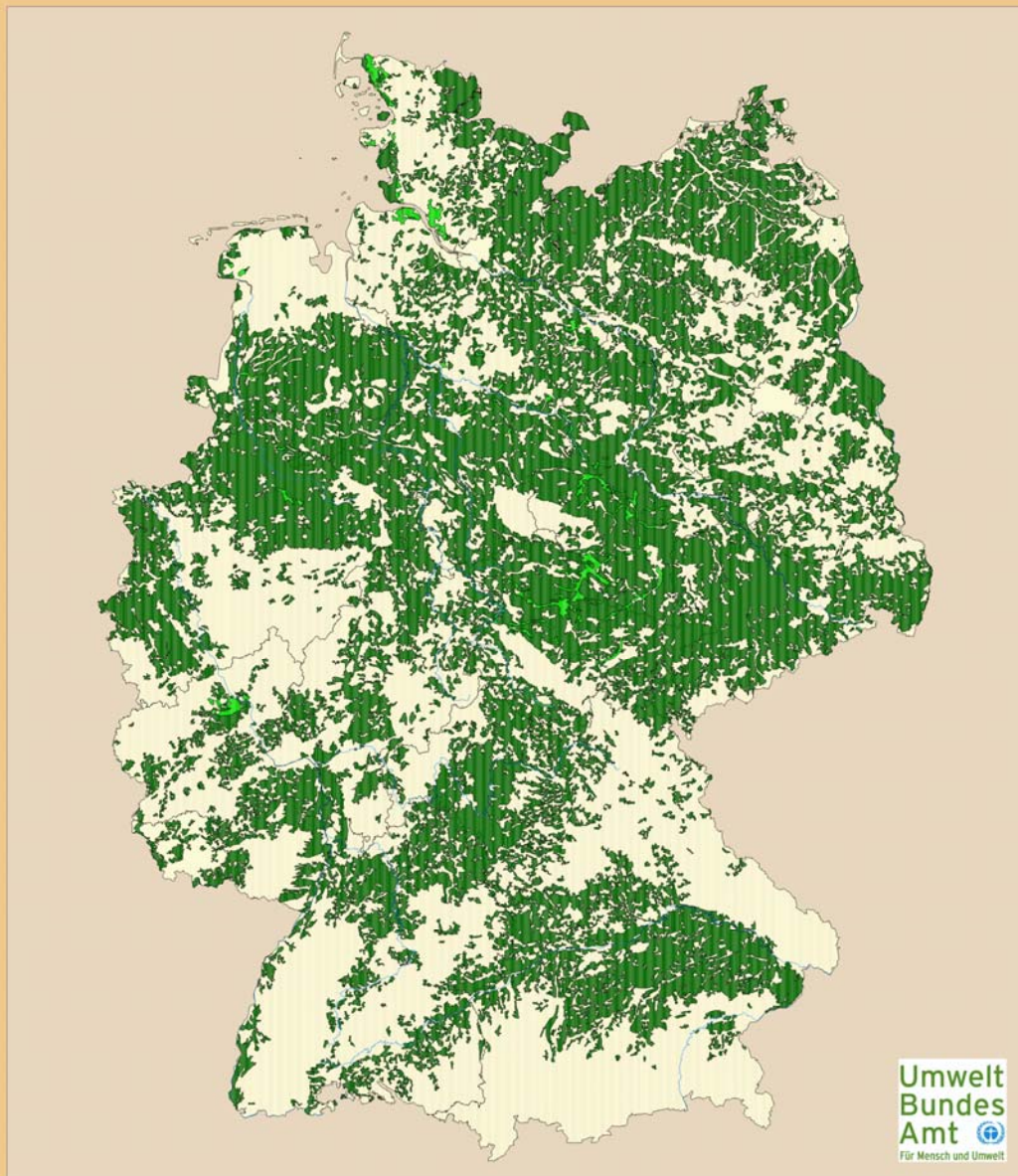
■	42
■	52
■	2
■	0
■	0

(in % Ackerfläche)

Kartengrundlage:
Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte
der Bundesrepublik Deutschland - BÜK 1000 N,
Bundesanstalt f. Geowissenschaften und
Rohstoffe, Hannover 2007

Karte 4: Darstellung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik bei einem Bodenwassergehalt von 70% Feldkapazität (FK) über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen bei 60% FK



Einstufung

- sehr gering
- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch

keine Ackernutzung

Flächenanteile

94
2
0
0
0

(in % Ackerfläche)

Kartengrundlage:

Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte
der Bundesrepublik Deutschland - BÜK 1000 N,
Bundesanstalt f. Geowissenschaften und
Rohstoffe, Hannover 2007

Karte 5: Darstellung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik bei einem Bodenwassergehalt von 60% Feldkapazität (FK) über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

Tabelle 19 zeigt die Flächenanteile noch einmal in der Übersicht. Die Gesamtsumme der in den Karten belegten Ackerfläche beträgt 96 %. Nicht berücksichtigt wurden Hochmoore, Niedermoore und Kippenflächen, die in der Summe etwa 4 % der Ackerfläche ausmachen.

Tabelle 19: Flächenanteile der verschiedenen Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit bei unterschiedlichem Bodenwassergehalt

Verdichtungs- empfindlichkeit	Anteil in % der Ackerfläche bei einem Wassergehalt von			
	100 % FK (= pF 1,8)	80 % FK	70 % FK	60 % FK
sehr gering	0	42	42	94
gering	22	0	52	2
mittel	20	52	2	0
hoch	52	2	0	0
sehr hoch	2	0	0	0

3.2. Gefügeeigenschaften

Für eine Bewertung der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung reicht die bisherige Betrachtung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit nicht aus. Neben der Empfindlichkeit für zusätzliche Verdichtung ist es für die Funktionsbewertung wichtig, die verdichtungsrelevanten Gefügeeigenschaften der Böden zu berücksichtigen. Es ist deshalb erforderlich, Kriterien für die Bewertung und Darstellung der Gefügeeigenschaften zu klassifizieren und herzuleiten.

3.2.1. Klassifizierung und Herleitung

Als ein erster Anhaltspunkt für die Bewertung der Gefügeeigenschaften können die Schadenskriterien aus dem UBA-Vorhaben FKZ 200 71 245 (Lebert et al., 2004) dienen (Tab. 20). Wenn gleichzeitig bei einem Bodengefüge im Unterboden eine Luftkapazität kleiner 5 Vol.% und eine gesättigte Wasserleitfähigkeit von kleiner 10 cm/Tag vorliegen und zusätzlich die Feldgefügeansprache nach einer der drei aufgeführten Verfahren die Klassen 4 oder 5 ausweist, dann kann man nach bodenkundlichen Maßstäben vom Vorliegen eines Gefügeschadens ausgehen.

Der Gefügeschaden ist allerdings ein zu vermeidender Zustand, so dass zu einer Bewertung der Gefügeeigenschaften eine abgestufte Klassifizierung erforderlich ist, deren schlechteste Einstufung der Gefügeschaden ist. Für die Vorgehensweise im Vorhaben wurde das Ziel gesetzt, die Klassifizierung der Parameter möglichst eng an die Einteilungen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, 2005) zu binden. Die Luftkapazität, die gesättigte Wasserleitfähigkeit und die Feldgefügeansprache sind in der Bodenkundlichen Kartieranleitung nach Funktionskriterien klassifiziert. Die Feldgefügeansprache kann im Vorhaben jedoch nicht bewertet werden, da sie für die verwendeten Datenbestände größtenteils nicht vorliegt. Er-

satzweise wird deshalb die effektive Lagerungsdichte aus Gleichung (13) nach Renger (1970) verwendet. Die Klassifizierungen in der Bodenkundlichen Kartieranleitung für die drei Kenngrößen zeigt Tabelle 21.

Tabelle 20: Kriterien für einen Gefügeschaden nach Lebert et al. (2004)

Parameter	Schwellenwerte	Quellen
Luftkapazität	< 5 Vol. %	(Blume, 1968; Flühler, 1973; Dumbeck, 1986; Werner und Paul, 1999)
gesättigte Wasserleitfähigkeit	< 10 cm d ⁻¹	(Blume, 1968; Zakosek, 1960; DVWK R 136, 1999; Werner und Paul, 1999)
Feldgefügeansprache: - effektive Lagerungsdichte - Packungsdichte - Spatendiagnose	Stufen 4 und 5	(KA5, 2005) (DIN 19682-10, 1998) (Diez und Weigelt, 1997)

Im Folgenden wurden die vorhandenen Datenbestände für den Unterbodenbereich von 30 – 60 cm Bodentiefe im Hinblick auf die Kriterien und deren Einstufung nach Tabelle 21 ausgewertet. Für Sande zeigen sich mittlere Werte für die effektive Lagerungsdichte von 1,61 bei Reinsanden, die mit abnehmendem Sandgehalt zunehmen bis zu 1,73 bei Sandlehmen (Tab. 22). Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit sind bei Reinsanden sehr hoch bzw. extrem hoch und nehmen mit abnehmendem Sandgehalt ab, bis in die Klassen „mittel“ bei Sandlehmen. Bei den Reinsanden wurden alle geologischen Entstehungsformen zusammengefasst. Bei den übrigen Sanden wurden die Geschiebesande gesondert ausgewertet, da bei diesen, mit Ausnahme der Reinsande, deutlich höhere LD-Werte und deutlich geringere Werte für LK und kf vorliegen (Tab. 23). Geschiebelehme und -tone weisen sehr hohe LD- und sehr geringe LK- und kf-Werte auf.

Tabelle 21: Klassifizierungen der Parameter effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, 2005)

LD (-)	Klasse LD	LK (Vol.%)	Klasse LK	kf (cm/d)	Klasse kf
≥ 2,0	sehr hoch	< 2	sehr gering	< 1	sehr gering
1,8 - < 2,0	hoch	2 - < 5	gering	1 - < 10	gering
1,6 - < 1,8	mittel	5 - < 13	mittel	10 - < 40	mittel
				40 - < 100	hoch
1,4 - < 1,6	gering	13 - < 26	hoch	100 - < 300	sehr hoch
< 1,4	sehr gering	≥ 26	sehr hoch	≥ 300	extrem hoch

Tabelle 22: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Sanden

Sande	n	LD (-)	LK (Vol. %)	kf (cm/d)
Reinsande	256	1,61 ± 0,10	26,2 ± 6,4	309 + 415; - 177
Lehmsande (ohne Geschiebe)	295	1,66 ± 0,12	15,0 ± 5,8	79 + 166; - 54
Schluffsande (ohne Geschiebe)	37	1,62 ± 0,13	9,8 ± 5,3	35 + 130; - 28
Sandlehme (ohne Geschiebe)	79	1,73 ± 0,14	9,0 ± 4,7	26 + 115; - 21

Tabelle 23: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Geschieben

Geschiebe	n	LD (-)	LK (Vol. %)	kf (cm/d)
Lehmsande	26	1,77 ± 0,11	11,2 ± 5,6	51 + 178; - 40
Schluffsande	10	1,72 ± 0,09	8,6 ± 5,9	55 + 362; - 48
Sandlehme	42	1,80 ± 0,22	7,4 ± 6,2	11 + 140; - 10
Normallehme und Tonlehme	96	1,93 ± 0,08	4,4 ± 2,3	4 + 19; - 3
Schlufftone und Lehmtone	10	1,81 ± 0,20	2,3 ± 1,5	1 + 10; - 1

Bei den Fluss-, Auen- und Terrassenablagerungen haben die Schluffe eine geringe LD, und die LK- und kf-Werte sind als „mittel“ bzw. „hoch“ einzustufen (Tab. 24). Die Lehme und Schlufftone dieser Gruppe weisen für alle drei Kriterien mittlere Werte auf, während die Lehmtone geringe Werte für LK und kf haben. Böden aus Hochflut- und Deckablagerungen haben in den gleichen Bodenarten-Gruppen deutlich höhere LD-Werte und deutlich geringere Werte für LK und kf als die Böden der Fluss-, Auen- und Terrassenablagerungen (Tab. 25). Die Gründe hierfür liegen in den unterschiedlichen physikalischen Bedingungen bei der Ablagerung. Die Unterschiede kommen aber für LD und LK in den Klassifizierungen nach Tabelle 21 oft nicht zum Ausdruck.

Tabelle 24: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Fluss-, Auen- und Terrassenablagerungen

Fluss-, Auen- und Terrassenablagerungen	n	LD (-)	LK (Vol.%)	Kf (cm/d)
Lehmschluffe	28	1,54 ± 0,16	9,2 ± 5,6	46 + 285; - 39
Tonschluffe	35	1,58 ± 0,16	9,1 ± 4,2	54 + 186; - 42
Normallehme und Tonlehme	44	1,66 ± 0,14	12,3 ± 5,0	39 + 93; - 27
Schlufftone	59	1,70 ± 0,16	7,9 ± 4,8	35 + 165; - 29
Lehmtone	41	1,75 ± 0,17	3,0 ± 2,2	5 + 19; - 4

Tabelle 25: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Hochflut- und Deckablagerungen

Hochflut- und Deckablagerungen	n	LD (-)	LK (Vol.%)	Kf (cm/d)
Lehmschluffe	41	1,60 ± 0,19	8,4 ± 5,7	38 + 231; - 33
Tonschluffe	12	1,76 ± 0,13	5,5 ± 2,5	12 + 43; - 10
Normallehme und Tonlehme	30	1,85 ± 0,11	5,8 ± 2,9	8 + 39; - 7
Schlufftone	13	1,91 ± 0,12	4,1 ± 3,7	7 + 6; - 3
Lehmtone	32	1,96 ± 0,11	3,1 ± 3,1	3 + 9; - 2

Böden aus Verwitterungen und Hangablagerungen weisen mittlere bis hohe Werte für die effektive Lagerungsdichte auf (Tab. 26). Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit liegen überwiegend im mittleren Bereich. Hervorzuheben ist, dass die Tone trotz hoher LD-Werte eine mittlere Luftkapazität aufweisen, die eine Klasse höher liegt als bei vergleichbaren Böden aus Geschieben oder Hochflut- und Deckablagerungen. Begründungen für diesen Sachverhalt sind sicher der höhere Skelettgehalt bei Verwitterungen und Hangablagerungen, sowie die Umlagerungsprozesse.

Tabelle 26: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Verwitterungen und Hangablagerungen

Verwitterungen und Hangablagerungen	n	LD (-)	LK (Vol.%)	kf (cm/d)
Lehmschluffe	14	1,63 ± 0,08	8,3 ± 2,3	40 + 75; - 26
Tonschluffe	12	1,77 ± 0,14	7,1 ± 6,0	11 + 64; - 10
Normallehme	46	1,74 ± 0,19	8,7 ± 6,0	30 + 99; - 28
Tonlehme	7	1,94 ± 0,16	5,3 ± 1,7	8 + 3; - 2
Schlufftone	39	1,85 ± 0,14	6,0 ± 4,0	10 + 29; - 8
Lehmtone	37	1,93 ± 0,16	5,1 ± 5,1	6 + 10; - 4

Tabelle 27: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Löss- und Lösslehm

Löss und Lösslehm	n	LD (-)	LK (Vol.%)	kf (cm/d)
Lehmschluffe ohne TT	80	1,62 ± 0,10	6,3 ± 2,8	17 + 42; - 12
Tonschluffe ohne TT	99	1,73 ± 0,09	5,5 ± 3,0	14 + 42; - 11
Schlufftone ohne TT	68	1,80 ± 0,10	6,0 ± 4,4	11 + 31; - 8
Lehmschluffe mit TT	30	1,55 ± 0,09	8,2 ± 3,1	46 + 168; - 36
Tonschluffe mit TT	92	1,60 ± 0,11	7,7 ± 3,8	46 + 109; - 32
Schlufftone mit TT	23	1,72 ± 0,14	7,4 ± 4,1	25 + 75; - 19

Bei den Böden aus Löss- und Lösslehm zeigt sich, dass Böden mit Schwarzerdmerkmalen (TT) eine deutlich geringere effektive Lagerungsdichte, eine höhere Luftkapazität und eine höhere gesättigte Wasserleitfähigkeit aufweisen als Böden ohne Schwarzerdmerkmale (Tab. 27). Die Gründe für diesen Sachverhalt liegen zum einen in der pedogenetischen Entwicklung der Böden und zum anderen im höheren Gehalt an organischer Substanz der Böden mit Schwarzerdmerkmalen. Allerdings weist die Klassifizierung nach Tabelle 16 oft keinen Klassenunterschied aus, insbesondere bei der Luftkapazität, aber auch bei der effektiven La-

gerungsdichte. Beide Kenngrößen liegen nach Tabelle 21 überwiegend einheitlich im mittleren Bereich. Lediglich die gesättigte Wasserleitfähigkeit wird bei den Böden mit TT aus Schluffen in Klasse „hoch“ und bei Böden ohne TT in Klasse „mittel“ eingestuft.

Tabelle 28: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus verschiedenen Lössvariationen

Lössvariationen	n	LD (-)	LK (Vol.%)	kf (cm/d)
Sandlöss und Lösssand	54	1,67 ± 0,12	8,6 ± 4,4	40 + 126; - 30
Lösslehm mit Beimischungen	53	1,68 ± 0,14	7,4 ± 4,0	35 + 211; - 30
Lössfließerde LM Lage, periglazial	56	1,91 ± 0,13	2,5 ± 2,1	1 + 6; - 1
Gebirgslöss LH Lage, periglazial	54	1,62 ± 0,15	5,7 ± 3,4	19 + 81; - 16

Böden aus Sandlöss und Lösssand sowie Lössböden mit Beimischungen weisen Gefügeeigenschaften auf, die etwa denen der Löss- und Lösslehme mit Schwarzerdmerkmalen vergleichbar sind (Tab. 28). Die Werte liegen überwiegend im mittleren Bereich. Lössfließerden aus periglazialen Mittellagen haben eine sehr hohe effektive Lagerungsdichte und sehr geringe Werte für die Luftkapazität und die gesättigte Wasserleitfähigkeit. Die Gefügeeigenschaften von Gebirgslöss aus periglazialen Hauptlagen sind eine Klasse günstiger und vergleichbar mit denen von Löss und Lösslehm ohne Schwarzerdmerkmale.

Tabelle 29: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Schwemm- und Kolluvialablagerungen

Schwemm- und Kolluvialablagerungen	n	LD (-)	LK (Vol.%)	kf (cm/d)
Lehmschluffe	45	1,59 ± 0,12	7,1 ± 4,0	22 + 78; - 17
Tonschluffe	27	1,66 ± 0,12	7,8 ± 3,0	32 + 78; - 23
Normallehme	13	1,71 ± 0,13	8,4 ± 3,2	13 + 84; - 12
Schlufftone	12	1,77 ± 0,11	5,7 ± 2,7	11 + 19; - 7

Bei den Böden aus Schwemm- und Kolluvialablagerungen finden sich unter den Schluffen größtenteils lössbürtige Böden. Die Gefügeeigenschaften sind für LD und LK vergleichbar

mit den Böden aus Löss und Lösslehm mit Schwarzerdmerkmalen (Tab. 29). Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist aber eine Klasse geringer, was sicher eine Folge des Umlagerungsprozesses ist. Die Eigenschaften der Lehme und Tone dieser Böden sind etwas günstiger als diejenigen von Hochflut- und Deckablagerungen, aber ungünstiger als diejenigen von Fluss-, Auen- und Terrassenablagerungen.

Böden aus Becken- und Seeablagerungen fallen durch eine sehr hohe effektive Lagerungsdichte und sehr geringe Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit auf (Tab. 30). Es handelt sich überwiegend um tonige und schluffige Böden. Marschen weisen eine mittlere LD, aber ebenfalls sehr geringe LK- und kf-Werte auf. Bei den Marschen streut die Bodenart über einen weiteren Bereich als bei den Becken- und Seeablagerungen. Sowohl tonige als auch schluffige und sandige Marschen kommen vor. LD- und LK-Werte streuen deshalb auch stärker, die kf-Werte aber nicht. Letztere sind bei Marschen durchgängig sehr niedrig, weshalb auch keine Aufteilung nach Bodenarten-Gruppen vorgenommen wurde.

Böden mit der Bodenarten-Gruppe Sandschluff kommen insgesamt nicht sehr häufig vor, deshalb wurde auf eine Differenzierung nach geologischer Herkunft verzichtet. Die ausgewerteten Sandschluffe haben eine mittlere effektive Lagerungsdichte, eine geringe Luftkapazität und eine geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit.

Tabelle 30: Gefügeeigenschaften effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden aus Meeres-, Becken- und Seeablagerungen sowie aus Sandschluffen

Böden verschiedener Herkunft	n	LD (-)	LK (Vol.%)	kf (cm/d)
Sandschluffe	17	1,61 ± 0,10	5,9 ± 3,7	13 + 29; - 9
Becken- und Seeablagerungen	16	1,85 ± 0,14	3,1 ± 2,0	6 + 29; - 5
Marschen	35	1,67 ± 0,16	4,2 ± 3,5	2 + 11; - 1

Die Ergebnisse der Gefügebrauswertungen zeigen, dass Unterböden gleicher Bodenarten-Gruppen je nach geologischer Entstehung sehr unterschiedliche Gefügeeigenschaften haben. Bei Böden aus Löss- und Lösslehm spielt außerdem die pedogene Entwicklung eine wichtige Rolle.

Die Klassifizierung nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung spiegelt die Bandbreite für die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit ausreichender Sensibilität wider (vgl. Tab. 21). Dies gilt jedoch nicht für die Luftkapazität und für die effektive Lagerungsdichte LD. Bei der Luftkapazität ist die Klasse „mittel“ sehr weit gefasst, so dass vorhandene, funktional bedeutsame Unterschiede in dieser Klasse unerkant bleiben. Auch innerhalb der mittleren Klasse für die effektive Lagerungsdichte gibt es signifikante Unterschiede bei gleicher Bodenart in Abhängigkeit von der geologischen Entstehung, die über eine Klassifizierung nach KA5 (2005) aber nicht erfasst werden können. Für eine Bewertung der Verdichtungsgefährdung von Unterböden muss für beide Kriterien die mittlere Klasse noch weiter differenziert werden. Es ist deshalb erforderlich eine Klassifizierung der Gefügeeigenschaften zu erstellen, die von den Ein-

teilungen der Bodenkundlichen Kartieranleitung geringfügig abweicht. Anhand der Datenauswertung werden im Vorhaben folgende Festlegungen getroffen (Tab. 31):

- Die ursprünglichen Klassen „sehr hoch“ für $LD \geq 2,0$ und „sehr gering“ für $LK < 2$ Vol.% sowie für $k_f < 1$ cm/d nach KA5 (2005) entfallen, da sie im Datenbestand für Unterböden ackerbaulich genutzter Flächen nicht vorkommen, zumindest nicht als Mittelwerte. Die Klassengrenzen für „sehr hohe“ effektive Lagerungsdichte LD, „sehr geringe“ Luftkapazität LK und sehr geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit k_f werden neu festgesetzt, auf $LD \geq 1,8$ und $LK < 5$ Vol.% und $k_f < 10$ cm/d respektive. Diese Klassen kennzeichnen jeweils sehr ungünstige Gefügeeigenschaften.
- Die weiteren Intervalle für die Klasse der Gefügeeigenschaften orientieren sich für die k_f -Wert an den Einteilungen der Bodenkundlichen Kartieranleitung.
- Für die Größen LD und LK werden die ursprünglichen Intervalle für die Klasse „mittel“ differenziert in $LD 1,7 - < 1,8$ = gering und $LD 1,6 - < 1,7$ = mittel, sowie in $LK 5 - < 7$ Vol.% = gering und $LK 7 - < 13$ Vol.% = mittel.
- Den Klassen werden Nummern zugeordnet, die aber nicht mehr identisch sind mit den Einteilungen der Bodenkundlichen Kartieranleitung.
- Die Gesamtklasse der Gefügeeigenschaften errechnet sich als aufgerundeter, arithmetischer Mittelwert aus den drei Kriterien durch Verwendung der Klassennummern.

Tabelle 31: Klassifizierung der Gefügeeigenschaften im Vorhaben im Hinblick auf die Verdichtungsgefährdung von Unterböden ackerbaulich genutzter Flächen (modifizierte Klasseneinteilung der KA 5)

LD (-)	LK (Vol.%)	k_f (cm/d)	Gefügeeigenschaften	Klasse Nr.
$\geq 1,8$	< 5	< 10	sehr ungünstig	5
$1,7 - < 1,8$	$5 - < 7$	$10 - < 40$	ungünstig	4
$1,6 - < 1,7$	$7 - < 13$	$40 - < 100$	mittel	3
$1,4 - < 1,6$	$13 - < 26$	$100 - < 300$	günstig	2
$< 1,4$	≥ 26	≥ 300	sehr günstig	1

Tabelle 32 zeigt die Zuordnungen und Herleitungen der Klasse der Gefügeeigenschaften in der Übersicht. Es muss daraufhin gewiesen werden, dass bei Böden, die nach allen drei Kriterien in die Klasse für sehr ungünstige Gefügeeigenschaften (Klasse 5) eingestuft werden, durch diese Klassifizierung kein Gefügeschaden ausgewiesen wird. Das wäre nur der Fall, wenn die effektive Lagerungsdichte auch durch die Durchführung der Feldgefügeansprache in Klasse 4 oder 5 eingestuft würde. Die effektive Lagerungsdichte als Feldgefügeansprache liefert nicht das gleiche Ergebnis wie die Berechnung der effektiven Lagerungsdichte nach Gleichung (13).

Tabelle 32: Herleitung der Gesamtklasse der Gefügeeigenschaften aus den Klassen für die effektive Lagerungsdichte (LD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der untersuchten Böden nach Tabelle 31

Böden	LD Klasse	LK Klasse	kf Klasse	Gesamtklasse	
				berechnet	gerundet
Reinsande (alle)	3	1	1	1,67	2
Lehmsande (ohne Geschiebe)	3	2	3	2,67	3
Schluffssande (ohne Geschiebe)	3	3	4	3,33	3
Sandlehme (ohne Geschiebe)	4	3	4	3,67	4
Sandschluffe (alle)	3	4	4	3,67	4
Geschiebe:					
Lehmsande	4	3	3	3,33	3
Schluffssande	4	3	3	3,33	3
Sandlehme	5	3	4	4,00	4
Normal- und Tonlehme	5	5	5	5,00	5
Schluff- und Lehmtone	5	5	5	5,00	5
Fluss-, Auen- und Terrassen- ablagerungen:					
Lehmschluffe	2	3	3	2,67	3
Tonschluffe	2	3	3	2,67	3
Normal- und Tonlehme	3	3	4	3,33	3
Schlufftone	4	3	4	3,67	4
Lehmtone	4	5	5	4,67	5
Hochflut- und Deckablagerungen:					
Lehmschluffe	3	3	4	3,33	3
Tonschluffe	4	4	4	4,00	4
Normal- und Tonlehme	5	4	5	4,67	5
Schlufftone	5	5	5	5,00	5
Lehmtone	5	5	5	5,00	5
Verwitterungs- und Hangablage- rungen:					
Lehmschluffe	3	3	3	3,00	3
Tonschluffe	4	3	4	3,67	4
Normallehme	4	3	4	3,67	4
Tonlehme	5	4	5	4,67	5
Schlufftone	5	4	4	4,33	4
Lehmtone	5	4	5	4,67	5
Löss und Lösslehme:					
Lehmschluffe ohne TT	3	4	4	3,67	4
Tonschluffe ohne TT	4	4	4	4,00	4
Schlufftone ohne TT	5	4	4	4,33	4
Lehmschluffe mit TT	2	3	3	2,67	3
Tonschluffe mit TT	3	3	3	3,00	3
Schlufftone mit TT	4	3	4	3,67	4

Tabelle 32: Fortsetzung

Böden	LD	LK	kf	Gesamtklasse	
	Klasse	Klasse	Klasse	berechnet	gerundet
Sandlöss und Lösssand	3	3	3	3,00	3
Lösslehm mit Beimischungen	3	3	4	3,33	3
Lösslehm periglaziale Mittellagen	5	5	5	5,00	5
Lösslehm periglaziale Hauptlagen	3	4	4	3,67	4
Schwemm- und Kolluvialablagerungen:					
Lehmschluffe	2	3	4	3,00	3
Tonschluffe	3	3	4	3,33	3
Normallehme	4	3	4	3,67	4
Schlufftone	4	4	4	4,00	4
Becken- und Seeablagerungen	5	5	5	5,00	5
Marschen	3	5	5	4,33	4

3.2.2. Regionalisierung

Karte 6 zeigt die Darstellung der Gefügeeigenschaften von Unterböden der Bundesrepublik im Maßstab 1:1.000.000 über die BÜK 1000 N.

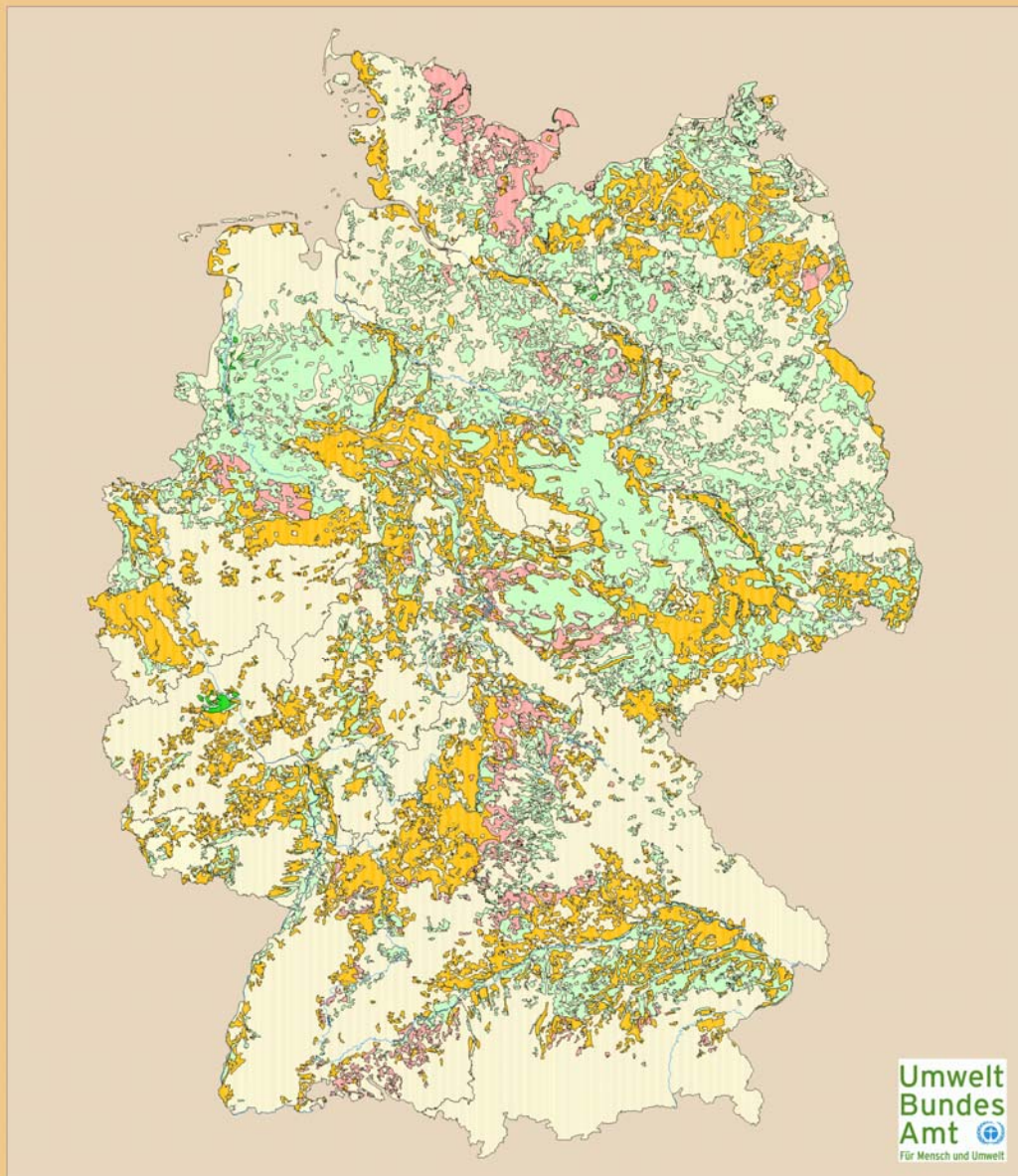
Sehr ungünstige Gefügeeigenschaften weisen in der Nordhälfte Böden aus Geschiebelehm und lehmigen Geschiebemergeln und in der Südhälfte Böden mit hohem Tongehalt, insbesondere Lehmtone auf.

Ungünstige Gefügeeigenschaften haben Böden der Jungmoränenlandschaften aus Sandlehm, Lössböden ohne Schwarzerdemerkmale, die tonreicheren Böden der Flusslandschaften und Lehme sowie Tone der Verwitterungsböden in Süddeutschland.

Mittlere Gefügeeigenschaften haben die sandigen Böden der Altmoränenlandschaften, Sandlöss und Lössböden mit Schwarzerdemerkmalen.

Die Klassen für günstige und sehr günstige Gefügeeigenschaften kommen bei der Darstellung über die BÜK 1000 N kaum vor. Die Ursache wurde bereits bei den Beschreibungen zu Karte 2 erwähnt: eine geringe Repräsentanz von Rein- und Lehmsanden in der BÜK 1000 N (Version 2007). Bei großmaßstäbigeren Karten würden die beiden Klassen jedoch auftreten und die Anteile der Klasse „mittel“ würden entsprechend reduziert.

Gefügeeigenschaften von Unterböden der Ackerflächen unter dem Aspekt der Verdichtung



Einstufung

- sehr günstig
- günstig
- mittel
- ungünstig
- sehr ungünstig
- keine Ackernutzung

Flächenanteile

■	0
■	0
■	50
■	38
■	8

(in % Ackerfläche)

Kartengrundlage:
Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte
der Bundesrepublik Deutschland - BÜK 1000 N,
Bundesanstalt f. Geowissenschaften und
Rohstoffe, Hannover 2007

Karte 6: Gefügeeigenschaften der Unterböden von Ackerflächen der Bundesrepublik, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

3.3. Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung

Die Bewertung der Gefährdung von Bodenfunktionen geschieht im Vorhaben durch eine kombinierte Bewertung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit und der Gefügeeigenschaften.

3.3.1. Klassifizierung und Herleitung

Die Klassifizierung erfolgt durch eine Kombination der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit mit den Gefügeeigenschaften (Tab. 33). Die Klassen für beide Größen werden gleich gewichtet. Die Klassifizierung wird dadurch vereinfacht, dass für die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit und für die Gefügeeigenschaften Klassen gebildet wurden, die einander in Bezug auf die Gefährdung von Bodenfunktionen entsprechen. Bei sehr hoher Verdichtungsempfindlichkeit und gleichzeitig sehr ungünstigen Gefügeeigenschaften ist die Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung sehr hoch, da bereits bei relativ geringen Belastungen eine Verdichtung zu erwarten ist und die ohnehin schon sehr ungünstigen Gefügeeigenschaften dadurch noch ungünstiger werden können. Umgekehrt ist die Gefährdung sehr gering, wenn gleichzeitig die Verdichtungsempfindlichkeit sehr gering und die Gefügeeigenschaften sehr günstig sind. In diesem Fall sind nutzungsbedingte, zusätzliche Verdichtungen kaum zu erwarten und wenn doch, dann ist aufgrund der sehr günstigen Gefügeeigenschaften nicht damit zu rechnen, dass die Verdichtung bereits eine Gefährdung der Bodenfunktionen hervorruft.

Tabelle 33: Klassifizierung der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung anhand der Verdichtungsempfindlichkeit und den Gefügeeigenschaften

Verdichtungs- empfindlichkeit Klasse	Gefüge- eigenschaften Klasse	Gefährdung von Bodenfunktionen Klasse	Klasse Nr.
sehr hoch	sehr ungünstig	sehr hoch	5
hoch	ungünstig	hoch	4
mittel	mittel	mittel	3
gering	günstig	gering	2
sehr gering	sehr günstig	sehr gering	1

Die Herleitung der Klassifizierung der Gefährdung von Bodenfunktionen ist in Tabelle 34 noch einmal beispielhaft dargestellt. Ausgehend von der Vorbelastung, die zunächst nach Tabelle 16 aus der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte hergeleitet wird, erfolgt zunächst die Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei p_F 1,8. Dann erfolgt gegebenenfalls eine Korrektur in Abhängigkeit vom Skelettgehalt, vom Verfestigungsgrad und der Bodenform nach Tabelle 17. Eine weitere Korrektur wird in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt in % Feldkapazität nach Tabelle 18 vorgenommen. Nach Abschluss der Korrekturen ist die Gesamtklasse der Verdichtungsempfindlichkeit bestimmt.

Danach erfolgt die Ermittlung der Klasse der Gefügeeigenschaften für den jeweiligen Boden in gleicher Zeile anhand von effektiver Lagerungsdichte, Luftkapazität und gesättigter Wasserleitfähigkeit nach den Tabellen 31 und 32. Aus den drei Größen wird die Gefügekasse als

Durchschnittswert berechnet und auf ganze Klassen gerundet. Hier sei noch einmal daraufhin gewiesen, dass den LD- und LK-Klassen eine eigenständige Klassifizierung zugrunde liegt, die nicht mehr mit der Bodenkundlichen Kartieranleitung voll übereinstimmt.

Zum Schluss werden die Gesamtklassen der Verdichtungsempfindlichkeit und der Gefügeeigenschaften 1:1 miteinander verrechnet, gemittelt und gerundet, woraus sich die Klasse der Gefährdung von Bodenfunktionen ergibt.

Tabelle 34: Beispiele für die Herleitung der Klasse der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung

a) Verdichtungs- empfindlichkeit bei pF 1,8 (Tab. 16) Klasse	b) Skelett- gehalt Vol. %	c) Abschlag Skelett- gehalt (Tab. 17) Klassen	d) Wasser- gehalt % FK	e) Abschlag Wasser- gehalt (Tab. 18) Klassen	f) Verdichtungs- empfindlichkeit (a+c+e) Gesamtklasse
5	30	-1	100	0	4
4	40	-1	70	-2	1
3	10	0	90	-1	2
g) LD (Tab. 32) Klasse	h) LK (Tab. 32) Klasse	i) kf (Tab. 32) Klasse	j) Gefüge (g+h+i)/3 gerundete Klasse	Gefährdung von Boden- funktionen (f+j)/2 gerundete Klasse	
4	3	4	4	4	
3	2	3	3	2	
3	3	3	3	3	

3.3.2 Regionalisierung

Die Gefährdung von Bodenfunktionen kann nun klassifiziert in Karten dargestellt werden, indem den Legendeneinheiten der Bodenkarte die entsprechenden Gefährdungsklassen zugeordnet werden. Karte 7 zeigt die Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von pF 1,8. Sehr hohe Gefährdung liegt in den Unterböden von etwa 8 % der bundesweiten Ackerflächen vor. Betroffen sind Geschiebelehme der weichselzeitlichen Jungmoränenlandschaft im Norden, der saalezeitlichen Geschiebelehme der Altmoränenlandschaft, der würmzeitlichen Geschiebelehme im Süden, Teile der Marschen des Küstenholozäns und Böden aus tonigen Verwitterungsprodukten von Mergel- und Tongesteinen.

Den weitaus größten Flächenanteil belegen Böden mit hoher Gefährdung (Klasse 4). Betroffen sind Sandlehme der Jungmoränenlandschaften, Teile der Marschen, tonige, lehmige und schluffige Flussablagerungen, die gesamte Lösslandschaft mit Ausnahme der Sandlöss- und lehmige und tonige Schutt- und Verwitterungsböden.

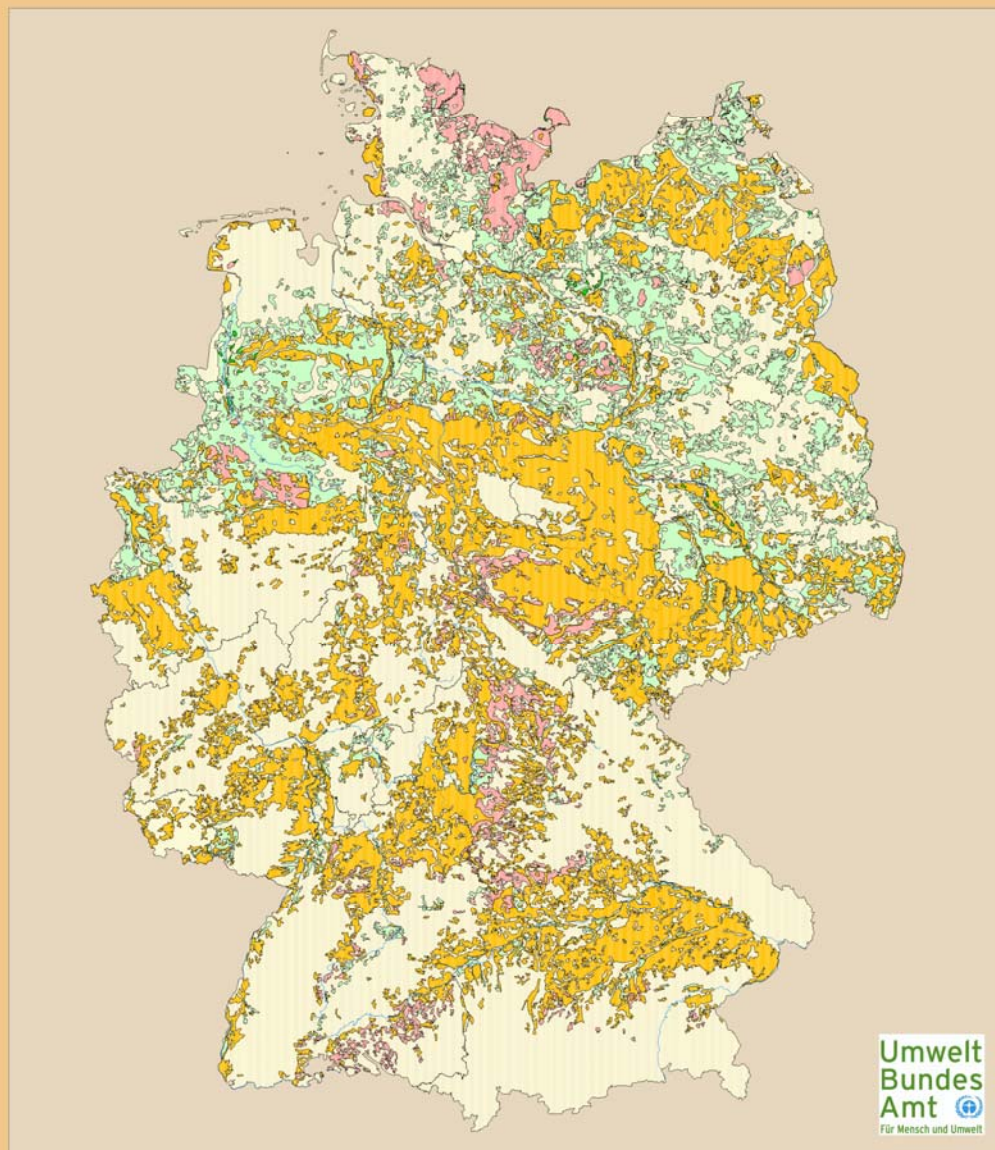
Mittlere Gefährdung (Klasse 3) liegt vor in weiten Teilen der sandigen Altmoränenlandschaft, sandigen Terrassenablagerungen, den Sandlössgebieten und Gebieten aus Löss mit Beimengungen von Verwitterungsmaterial.

Wie schon bei den Gefügeeigenschaften und teilweise auch bei der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit, gilt auch für die Gefährdung von Bodenfunktionen bei einem Wassergehalt von pF 1,8, dass die Klassen für geringe und sehr geringe Gefährdung kaum belegt sind. Der Grund ist auch hier der gleiche: die Böden mit Reinsanden und schwachlehmigen Sanden sind in der BÜK 1000 N (Version 2007) flächenmäßig nicht häufig ausgewiesen. In großmaßstäbigeren Karten würden diese Klassen aber vorkommen.

In Karte 7 fällt auf, dass eine hohe bis sehr hohe Gefährdung der Bodenfunktionen durch Verdichtung auf einem erheblich großen Flächenanteil von 68% auftritt. Der zugrunde liegende Bodenwassergehalt von pF 1,8 ist eine für Befahrungen sehr hohe Bodenfeuchte, aus der auch in Kombination mit ungünstigen, aber auch mit mittleren Gefügeeigenschaften eine hohe Gefährdung der Bodenfunktionen resultieren muss. In den nachfolgenden Karten werden die Betrachtungen auf geringere Bodenwassergehalte erweitert.

Bei einer Austrocknung des Bodens auf 80% Feldkapazität kommt eine sehr hohe Gefährdung nicht mehr vor (Karte 8). Der Flächenanteil der Böden mit hoher Gefährdung reduziert sich auf 32%. Betroffen sind immer noch die Geschiebelehme der Jungmoränenlandschaften, die Marschen, lehmige und tonige Flussablagerungen, Böden aus toniger Verwitterung und die Lössböden bei denen Tonschluffe und Schlufftone die dominierende Bodenarten-Gruppe darstellen, sowohl mit als auch ohne Schwarzerdemerkmale. Lössböden mit Lehmschluffen als dominierende Bodenart und Lössböden mit Beimischungen von Verwitterungsprodukten sind jetzt in die Klasse für mittlere Gefährdung eingestuft, ebenso wie die Sandlehme der Jungmoränenlandschaft. Geringe Gefährdung weisen die sandigen Böden der Altmoränenlandschaft auf sowie der sandigen Terrassen- und Flussablagerungen. Bei einem Bodenwassergehalt von 80% Feldkapazität bilden die Klassen für geringe, mittlere und hohe Gefährdung jeweils etwa ein Drittel der Ackerfläche ab.

Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen durch Verdichtung bei pF 1,8



Gefährdungsklassen

- sehr gering
- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch
- keine Ackernutzung

Flächenanteile

■	0
■	0
■	28
■	60
■	8

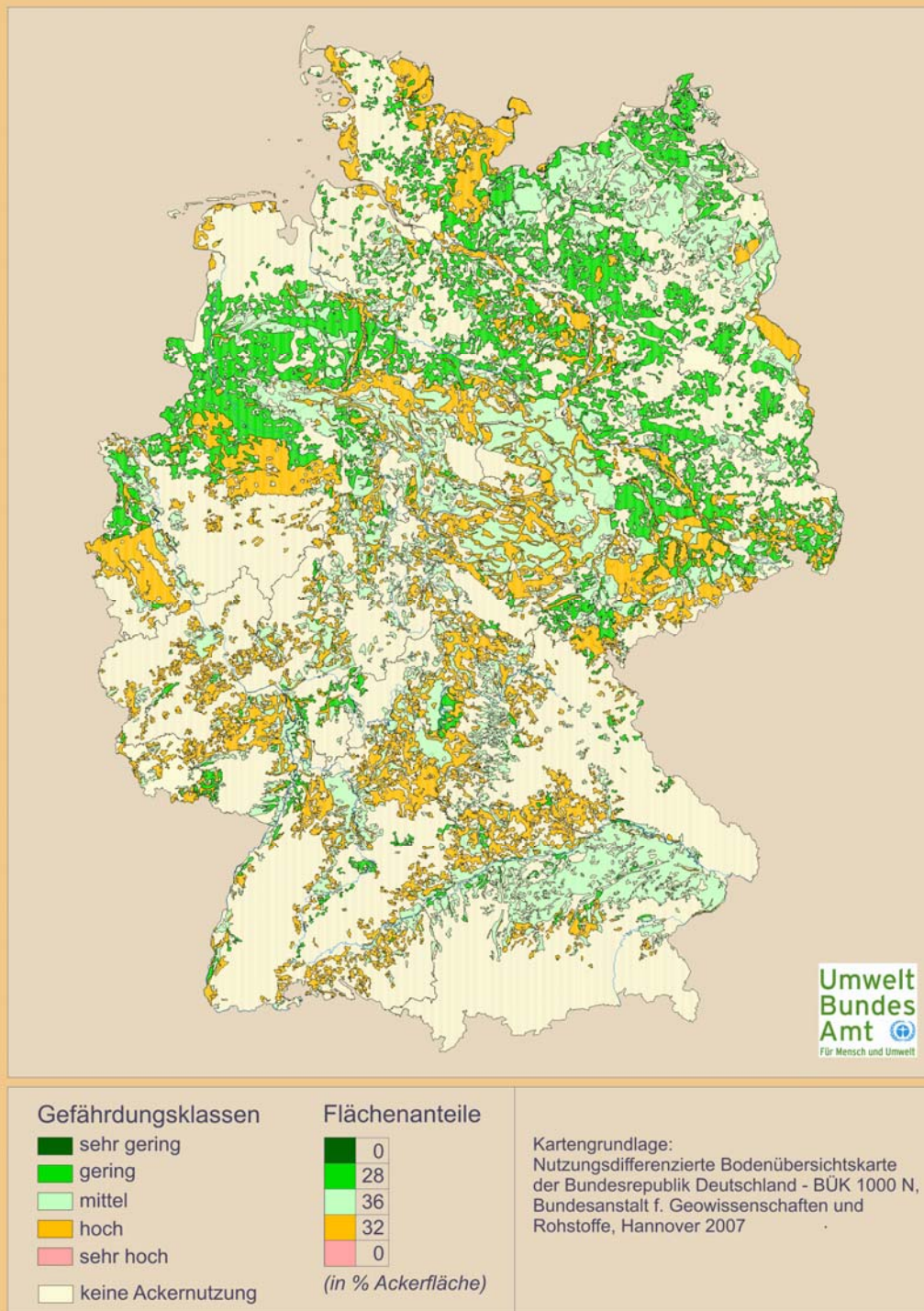
(in % Ackerfläche)

Kartengrundlage:
Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte
der Bundesrepublik Deutschland - BÜK 1000 N,
Bundesanstalt f. Geowissenschaften und
Rohstoffe, Hannover 2007

**Umwelt
Bundes
Amt**
Für Mensch und Umwelt

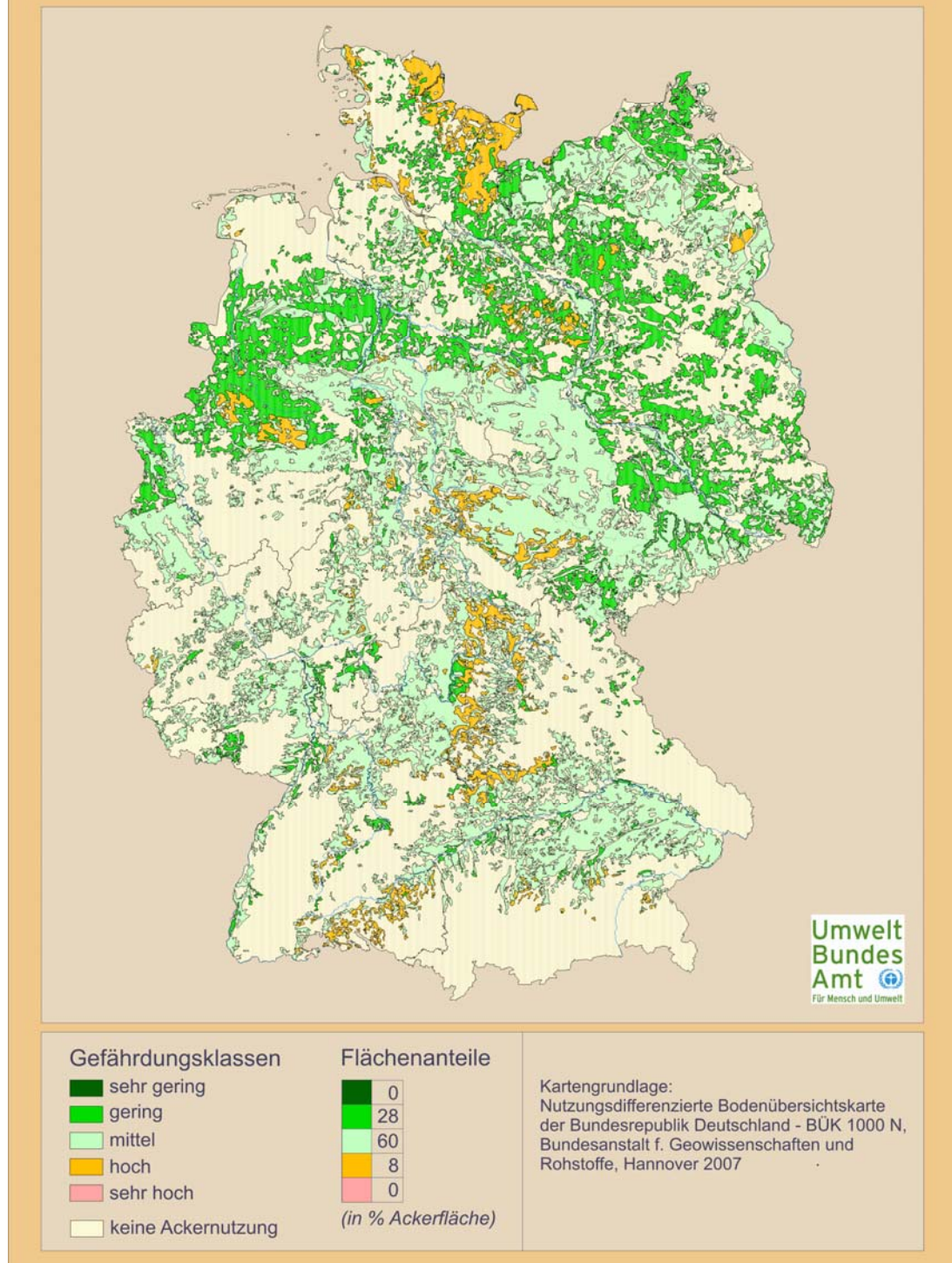
Karte 7: Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von pF 1,8, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen durch Verdichtung bei 80% FK



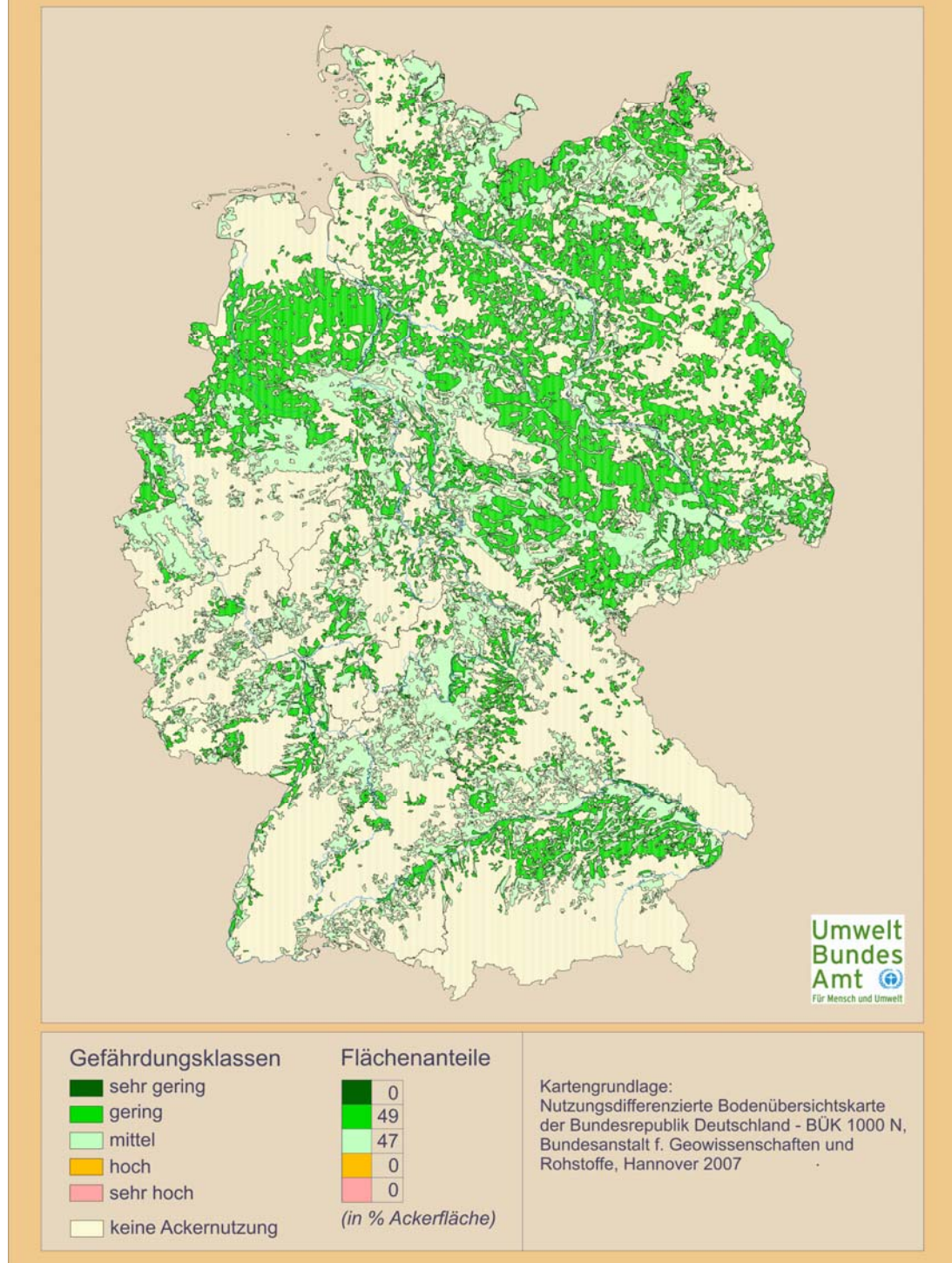
Karte 8: Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von 80% Feldkapazität, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen durch Verdichtung bei 70% FK



Karte 9: Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von 70% Feldkapazität, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen durch Verdichtung bei 60% FK



Karte 10: Gefährdung der Bodenfunktionen von Unterböden der Ackerflächen der Bundesrepublik durch Verdichtung bei einem Bodenwassergehalt von 60% Feldkapazität, dargestellt über die Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK 1000 N (2007, Maßstab im Original: 1:1.000.000)

Bei weiter steigender Austrocknung nehmen die Flächenanteile für geringe Gefährdung immer weiter zu und die Anteile für hohe Gefährdung immer weiter ab. Bei 70 % Feldkapazität liegt eine hohe Gefährdung nur noch auf etwa 8 % der Ackerfläche vor (Karte 9). Betroffen sind noch die Geschiebelehme und die tonigen Verwitterungsböden. Die Böden der Lösslandschaften sind bei diesem Wassergehalt komplett im mittleren Gefährdungsbereich, der jetzt insgesamt etwa 60 % der Ackerfläche ausmacht. Bei einer Austrocknung auf 60% der Feldkapazität liegen nur noch geringe und mittlere Gefährdungen zu etwa gleichen Flächenanteilen vor (Karte 10).

Tabelle 35 zeigt die Flächenanteile noch einmal in der Übersicht. Die Klasse für sehr geringe Gefährdung von Bodenfunktionen kommt bei Auswertungen über die BÜK 1000 N gar nicht vor. Bei Auswertungen über kleinmaßstäbigere Karten würde sie aber vorkommen, vor allem bei Reinsanden.

Tabelle 35: Flächenanteile der verschiedenen Klassen der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung bei unterschiedlichem Bodenwassergehalt

Gefährdung von Bodenfunktionen der Unterböden	Anteil in % der Ackerfläche bei einem Wassergehalt von			
	100 % FK (= pF 1,8)	80 % FK	70 % FK	60 % FK
sehr gering	0	0	0	0
gering	0	28	28	49
mittel	28	36	60	47
hoch	60	32	8	0
sehr hoch	8	0	0	0

3.4. Druckbelastung im Unterboden durch Landmaschinen

Die bisherigen Betrachtungen konzentrieren sich auf die Bewertung und Beschreibung von bodeninternen Stabilitäts- und Gefügeeigenschaften. Ein Prüfkonzept zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung von Böden muss zusätzlich die Auswirkungen der Druckbelastungen von landwirtschaftlichen Maschinen und Geräten auf den Boden berücksichtigen. Die zukünftige Gefügeentwicklung resultiert aus dem Zusammenspiel der Verdichtungsgefährdung mit dem Bodendruck, der zusätzliche Verdichtungen auslösen kann. Im Folgenden wird das Vorbelastungskonzept um die Abschätzung der Druckbelastungen erweitert. Da im Vorhaben die Unterbodenverdichtung im Fokus steht, ist es auch erforderlich die Druckbelastung im Unterboden zu berücksichtigen.

3.4.1. Theoretische Hintergründe

Für die Berechnung der Unterbodenbeanspruchung durch Belastungen von Radreifen an der Bodenoberfläche ist bis heute das Modell von Söhne (1953) aktuell (u.a.: Trautner und Arvidsson, 2003; Van den Akker, 2004; Schjønning et al., 2006, Keller et al., 2007). Mit diesem Modell wird die Druckausbreitung im Boden unter einem landwirtschaftlichen Reifen berechnet. Söhne nahm an der Bodenoberfläche eine elliptische Reifenkontaktfläche an und teilte diese in einzelne Segmente auf. Basierend auf der Elastizitätstheorie nach Boussinesq (1885) berechnete Söhne die Druckausbreitung unter jedem Segment bis zu einem beliebigen Punkt im Boden unterhalb der Kontaktfläche. Die an einem bestimmten Punkt im Boden ankommenden Drücke aus den verschiedenen Segmenten wurden zu einem Gesamtdruck addiert. Die Berechnungen überprüfte Söhne mit Spannungsmessungen im Boden. Die vertikale Druckausbreitung des Modells wurde unter Verwendung von Konzentrationsfaktoren nach Fröhlich (1934) an die Messungen angepasst.

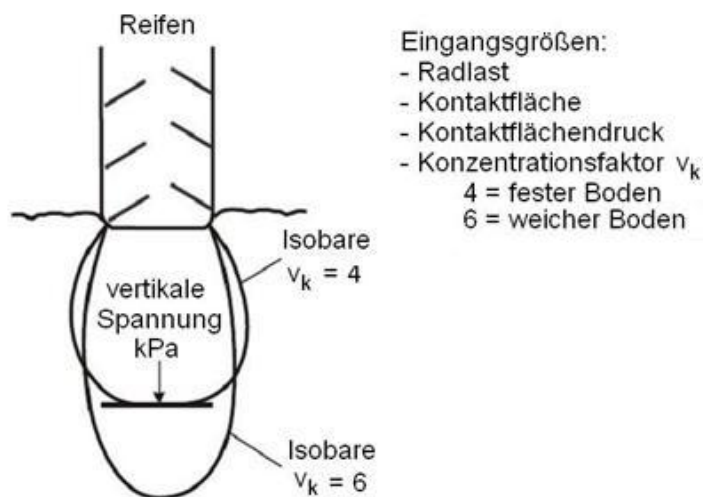


Abbildung 27: Vereinfachtes Spannungsmodell nach Söhne (1953) für den Unterboden

Ein wesentliches Forschungsergebnis von Söhne's Arbeiten ist, dass die Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche im oberflächennahen Boden große Bedeutung hat, aber mit fortschreitender Tiefe an Bedeutung verliert. Söhne fand heraus, dass für Druckberechnungen im

Unterboden auch ersatzweise mit dem durchschnittlichen, mittleren Kontaktflächendruck gerechnet werden kann, so dass die aufwändige Segmentierung entfällt. Auch kann ersatzweise die Kontaktfläche nicht als Ellipse, sondern als Kreis angenommen werden, was die Berechnungen noch weiter vereinfacht. Diese Art der Berechnung ist identisch mit dem Verfahren nach Newmark (1935). Für eine Spannungsberechnung nach dem vereinfachten Modell nach Söhne werden folgende Eingangsgrößen benötigt: Radlast, Kontaktfläche, Kontaktflächendruck und ein Konzentrationsfaktor (Abb. 27).

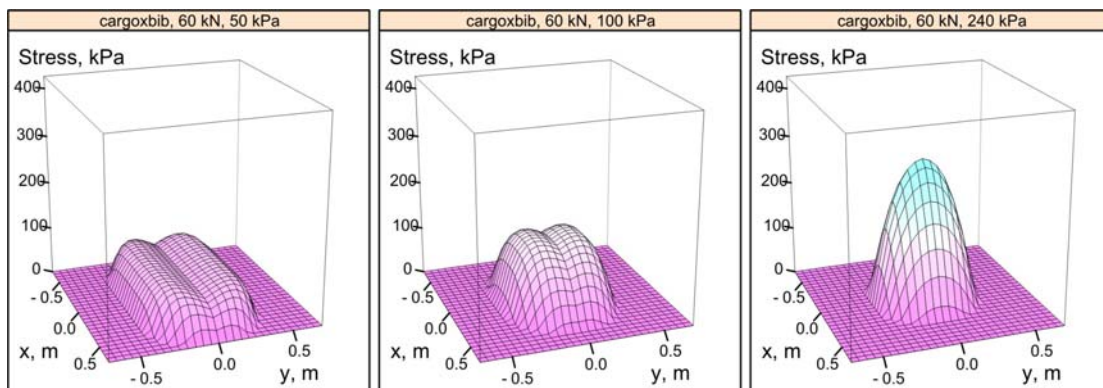


Abbildung 28: Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche eines Radialreifens (650/65R30.5) bei einer Radlast von 60 kN in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck (50, 100 und 240 kPa, aus Schjönning et al., 2008)

Söhne verwendete für sein aufwändigeres Segment-Modell eine parabolische Druckverteilung innerhalb der Reifenkontaktfläche. Eine solche Druckverteilung war Standard im Zeitraum von Söhnes Forschungen. Moderne Radialreifen haben jedoch Druckverteilungen an der Bodenoberfläche, die von der parabolischen Form abweichen können (Abb. 28). Bei reduziertem Luftdruck platten moderne Reifen stärker ab und die Druckverteilung wird gleichmäßiger und kann auch zweigipflige Verteilungen annehmen. Klassische, parabolische Druckverteilungen gibt es bei Radialreifen nur noch bei hohem Reifeninnendruck. Neuere Modelle zur Druckfortpflanzung berücksichtigen diese Veränderungen, lehnen sich aber trotzdem weiterhin an das Additionsprinzip nach Söhne an (Keller, 2005).

Neuere Ergebnisse von Keller (2005) bestätigen diese Ergebnisse von Söhne auch für moderne Landtechnik (Abb. 29). Das vereinfachte Söhne Verfahren unterschätzt zwar unter Verwendung einer kreisförmigen Kontaktfläche mit gleichmäßigem Kontaktflächendruck den realen Druck im Oberboden, liefert jedoch ab ca. 40 cm Bodentiefe etwa gleiche Resultate wie das aufwändigere Segmentmodell. Für den Bodenschutz bedeutet dieser Sachverhalt, dass über eine Luftdruckabsenkung im Reifen zwar der Oberboden erheblich geschont werden kann, der Unterboden aber weniger.

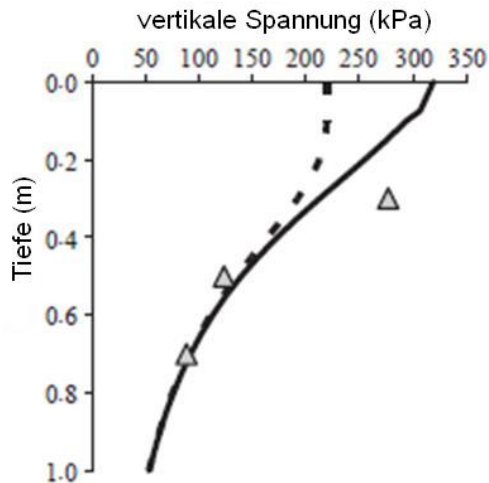


Abbildung 29: Gemessene vertikale Spannungen (Dreiecke) im Vergleich zu berechneten Werten mit (durchgezogen) und ohne (gestrichelt) Berücksichtigung der Spannungsverteilung innerhalb der Reifenkontaktfläche (Reifen: 800/60-38, Radlast: 80 kN, Reifeninnendruck: 220 kPa, nach Keller, 2005)

Ein weiteres, wichtiges Ergebnis von Söhne's Forschungen ist, dass bei einer Vergrößerung der Kontaktfläche und gleich bleibendem Kontaktflächendruck, wie es z.B. bei einer Radlasterhöhung und entsprechender Reifenverbreiterung der Fall ist, der Druck tiefer in der Unterboden fortgepflanzt wird (Abb. 30). Oder anders ausgedrückt, in einer gleich bleibenden Referenztiefe im Unterboden, z.B. 40 cm Tiefe, steigt der Druck mit steigender Radlast an, auch wenn der mittlere Kontaktflächendruck an der Bodenoberfläche gleich bleibt. Für den Bodenschutz bedeutet dieses Ergebnis, dass die Bodenbelastungen im Unterboden vorrangig durch die Radlast bestimmt werden, und weniger durch oberflächennahe Maßnahmen, wie eine Luftdruckabsenkung oder eine Reduzierung des mittleren Kontaktflächendrucks.

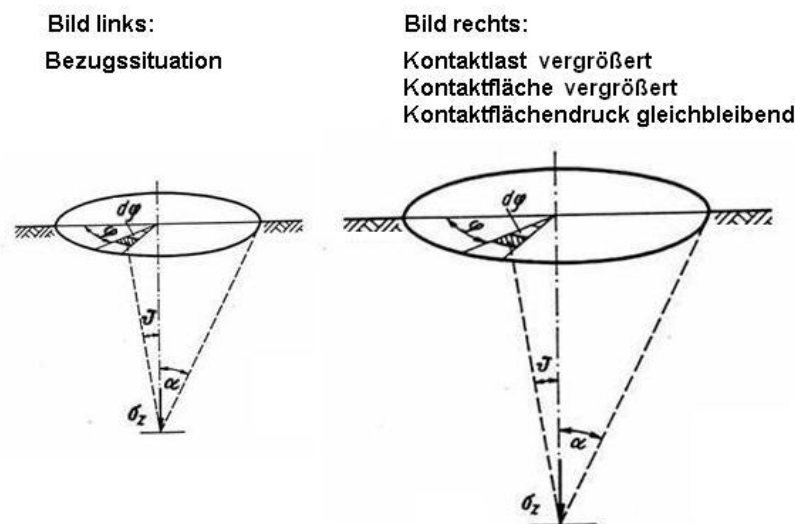


Abbildung 30: Geometrische Komponenten zur Berechnung des vertikalen Druckes (σ_z) unter der Lotrechten einer kreisrunden Kontaktfläche nach dem vereinfachten Modell von Söhne (1953) und nach Newmark (1935) und deren Konsequenzen bei einer Erhöhung der Radlast bei gleich bleibendem Kontaktflächendruck

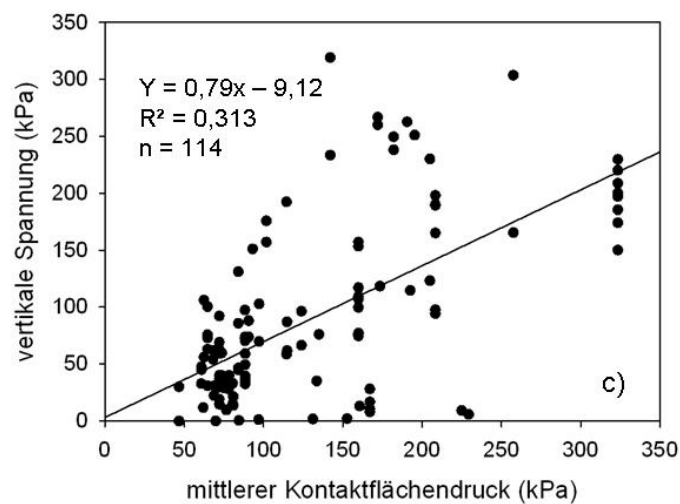
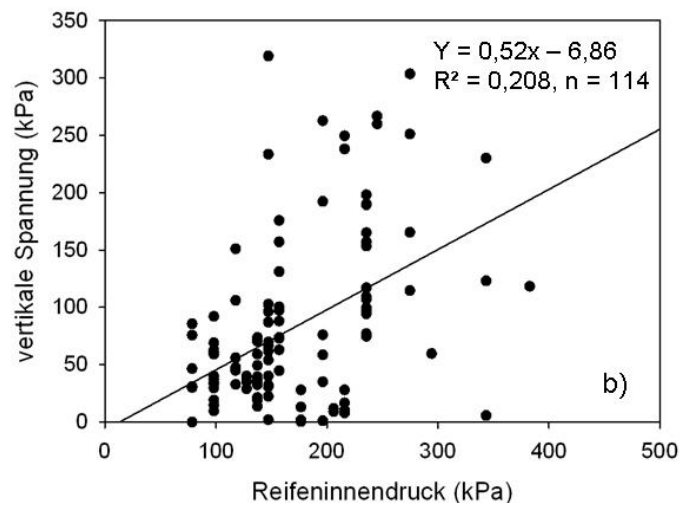
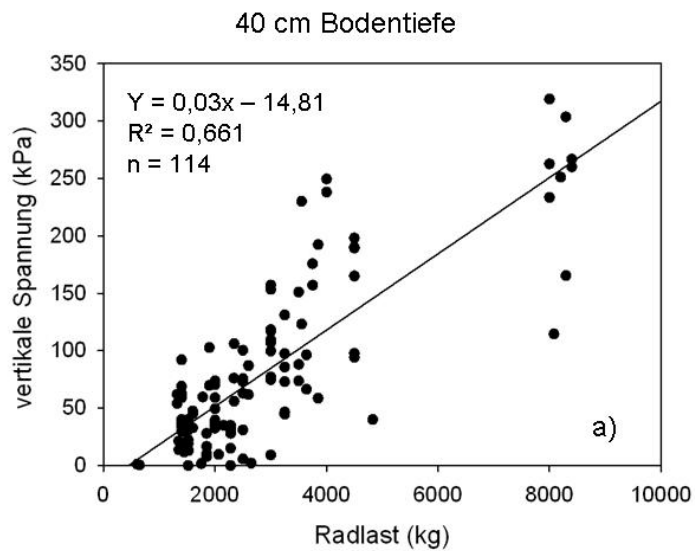


Abbildung 31: Gemessene vertikale Spannungen in 40 cm Bodentiefe, dargestellt in Abhängigkeit von a) Radlast (kN), b) Reifeninnendruck (kPa) und c) mittlerem Kontaktflächendruck (kPa) (nach Stahl et al., 2005)

Dieser Befund spiegelt sich auch in aktuellen Untersuchungen zur Druckfortpflanzung unter Praxisbedingungen in Deutschland wider. Stahl et al. (2005) beschreiben Spannungsmessungen, die mit berechneten Werten nach dem vereinfachten Söhne/Newmark Ansatz gut übereinstimmen, wenn ein Konzentrationsfaktor von 3,0 verwendet wurde. Die Ergebnisse von Stahl et al. bestätigen, dass auch bei Verwendung von modernen Radialreifen die Radlast der bestimmende Parameter für die Druckfortpflanzung in den Unterboden ist (Abb. 31). Im Unterboden ist die Beziehung zwischen Radlast und Bodendruck unter üblichen Praxisbedingungen deutlich enger als die Beziehungen von mittlerem Kontaktflächendruck und Reifeninnendruck zum Bodendruck. Das liegt daran, dass in der Beziehung zwischen der Radlast und dem Unterbodendruck der Einfluss der Kontaktfläche ebenfalls auf der Radlastachse integriert ist, da höhere Radlasten auch auf breitere Reifen abgestützt werden. Beim Reifeninnendruck und dem Kontaktflächendruck ist das nicht der Fall. Steigende Werte für beide Größen können sowohl mit steigenden als auch mit fallenden Radlasten und Kontaktflächen einhergehen.

3.4.2. Abschätzung der Unterbodenbelastung für das Vorbelastungskonzept

Im Vorhaben wurden keine Berechnungen zur Druckbelastung im Unterboden durchgeführt. Zur Abschätzung der nutzungsbedingten Lasteinträge wird auf Literaturdaten zurückgegriffen. Die neuesten Untersuchungen zur Druckfortpflanzung im Bundesgebiet sind die bereits beschriebenen von Stahl et al. (2005). Die Autoren haben für sächsische Betriebe die typische, verfahrensabhängige Unterbodenbelastung zusammengestellt. Die Erhebungen basieren auf Berechnungen nach dem vereinfachten Söhne-Modell, bei denen der Konzentrationsfaktor durch Messungen der vertikalen Spannungskomponente angepasst wurde. Diese für typische sächsische Betriebe ermittelten vertikalen Spannungen in 40 cm Bodentiefe werden im Vorhaben als Orientierungswerte für verfahrensabhängige Druckbelastungen im Unterboden verwendet.

Das komplette Vorbelastungskonzept mit allen erforderlichen Komponenten für eine bodenphysikalisch basierte Verdichtungsprognose zeigt Abbildung 32. Zur Darstellung wurde ein Treppenschema gewählt, in Anlehnung an Tijink und Spoor (2004). Auf den beiden Achsen des Treppenschemas werden die Vorbelastung (Y-Achse = Bodenachse) und der vertikale Bodendruck im Unterboden (X-Achse = Druckachse) einander gegenüber gestellt. Aus dem direkten Vergleich beider Größen kann abgeleitet werden, ob die Druckbelastung zu einer zusätzlichen Verdichtung führt oder nicht. Quantitative Aussagen über das Ausmaß der Verdichtung können nicht hergeleitet werden. Auf der Druckachse sind die verfahrenstypischen, vertikalen Bodenbelastungen in 40 cm Bodentiefe nach Stahl et al. (2005) aufgetragen. Auf der Bodenachse sind die Vorbelastung bei pF 1,8 und die zugehörige Klasse der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 aufgetragen, welche sich für einen konkreten Boden aus den Tabellen 16 und 17 ergeben. Auf die Klasse 6 für äußerst hohe Verdichtungsempfindlichkeit wurde verzichtet, da sie im Unterboden kaum vorkommt. Links neben der Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 sind die Zu- und Abschlüsse für die jeweilige Klasse in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt in % Feldkapazität aufgetragen, die sich aus Tabelle 18 ergeben. Für einen konkreten Boden kann so die Gesamtklasse der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Bodenart, der effektiven Lagerungsdichte, dem Skelettgehalt, dem Verfestigungsgrad und dem Bodenwassergehalt ermittelt und auf der Bodenachse festgelegt werden.

Das Vorbelastungskonzept in Abbildung 32 enthält die Informationen, die erforderlich sind, um das Verdichtungsverhalten der Böden qualitativ abzuschätzen. Es geht hier nur um die Frage: führen die Bodenbelastungen der entsprechenden Technik unter den gegebenen Boden- und Feuchtebedingungen zu zusätzlichen Verdichtungen, oder nicht. Das Vorbelastungskonzept ist also ein Vorsorgeinstrument der Beratung zur Vermeidung weiterer Verdichtungen. Deshalb sind die Gefügeeigenschaften und die Gefährdung der Bodenfunktionen in diesem Schema nicht berücksichtigt. Die Bewertung der Gefährdung von Bodenfunktionen ist im gesamten Prüfkonzept der Anwendung des Vorbelastungskonzeptes vorgeschaltet. Je höher in einer Region oder Legendeneinheit die Gefährdung der Bodenfunktionen ist, desto dringlicher wird die Vermeidung weiterer Verdichtungen im vorsorgenden Bodenschutz. Das Vorbelastungskonzept stellt hierfür einen Lösungsansatz dar, der alle erforderlichen Komponenten berücksichtigt: den Bodendruck, die bodeneigene Stabilität und den Bodenwassergehalt.

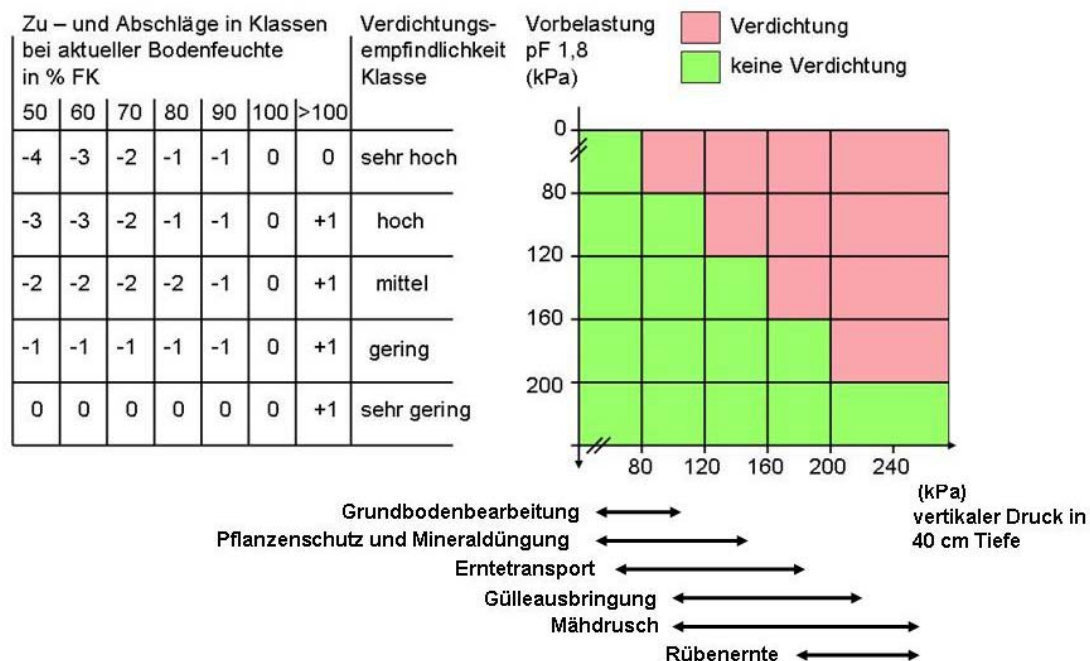


Abbildung 32: Darstellung des kompletten Vorbelastungskonzeptes als Treppenschema für die nutzungsabhängige Verdichtungsprognose in Abhängigkeit vom Bodendruck in 40 cm Tiefe und der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten (verfahrenstypischer, vertikaler Druck in 40 cm Tiefe nach Stahl et al., 2005)

Es ist zu erkennen, dass bei der Grundbodenbearbeitung relativ niedrige Bodenbelastungen im Unterboden entstehen, die auch bei einem hohen Wassergehalt von pF 1,8 nur in den Verdichtungsempfindlichkeitsklassen „sehr hoch“ und „hoch“ zusätzliche Verdichtungen erwarten lassen. Hier muss allerdings angemerkt werden, dass Stahl et al. (2005) keine Untersuchungen an Pflugverfahren mit Furchenbefahrung durchgeführt haben. Beim Pflanzenschutz und bei der Mineraldüngung können die Druckbelastungen etwas höher sein als bei der Grundbodenbearbeitung. Gülleausbringung und Erntetransport können je nach Ausstattung hohe Belastungen im Unterboden erzeugen. Die höchsten Belastungen im Unterboden treten bei der Rübenernte und beim Mähdrusch auf. Die Ergebnisse entsprechen größenordnungsmäßig den Untersuchungen internationaler Arbeitsgruppen, die mit neueren Modellen arbeiten (z.B. Keller, 2005). Bei der Rübenernte muss davon ausgegangen werden, dass sie nur auf sehr gering verdichtungsempfindlichen Böden ohne zusätzliche Verdichtungen möglich ist. In dieser Klasse finden sich bei pF 1,8 überwiegend Verwitterungsböden mit hohen Skelettgehalten,

Reinsande ab LD-Klasse 3 und Lehmsande ab LD-Klasse 4. Alle anderen Böden können die nach Abb. 32 für die Rübenenernte erforderliche Bodenstabilität nur durch Austrocknung erhalten.

Wie die erforderliche Austrocknung des Unterbodens für verdichtungsfreie Befahrungen ermittelt werden kann, ist beispielhaft in Abbildung 33 für die Rübenenernte dargestellt. Rüben stehen sehr häufig auf Lössböden. Lehmschluffe der LD-Klasse 3 würden nach Tabelle 16 bei $p_F 1,8$ in die Klasse „mittel“ der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit eingestuft. Für eine verdichtungsfreie Rübenenernte wäre eine Austrocknung bis auf 80 % Feldkapazität notwendig, um die erforderliche Klasse für sehr geringe Verdichtungsempfindlichkeit zu erreichen. Tonschluffe der LD-Klasse 3, die nach Tabelle 16 bei $p_F 1,8$ in die Klasse für hohe Verdichtungsempfindlichkeit eingestuft sind, würden für eine Rübenenernte ohne zusätzliche Verdichtungen eine Austrocknung bis 60% Feldkapazität benötigen.

Die Belastungsdaten enthalten aber Spannweiten, die einen Spielraum lassen, um durch eine Fahrwerksoptimierung die Unterbodenbeanspruchung zu reduzieren. Entsprechende Effekte beschreiben Chamen et al. (2003) und Tijink und Spoor (2004).

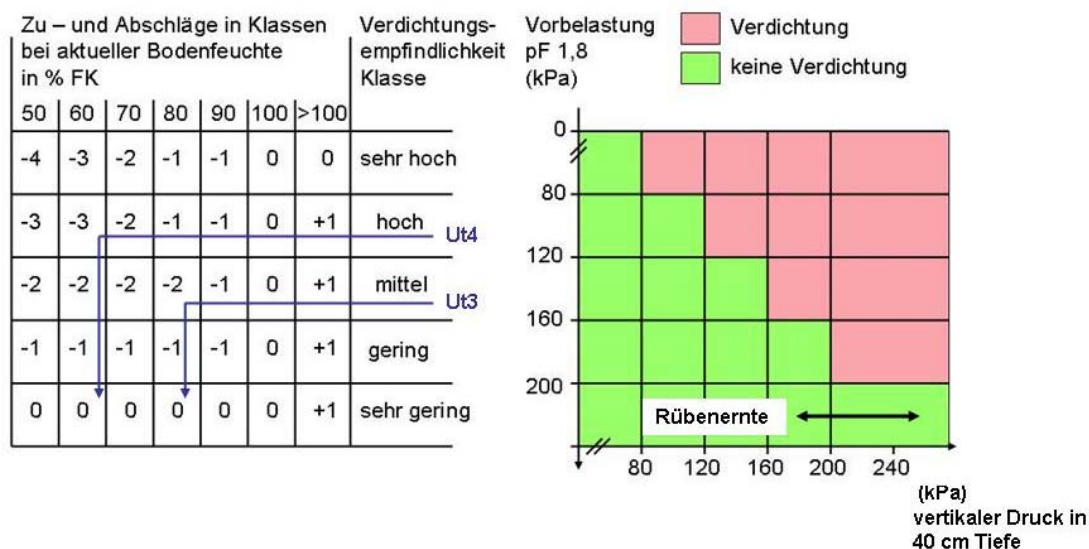


Abbildung 33: Beispiel für die Herleitung der für eine verdichtungsfreie Rübenenernte notwendigen Austrocknung von Parabraunerden aus Löß mit unterschiedlicher Bodenart (Ut3, Ut4) anhand des Vorbelastungskonzeptes

Abbildungen 32 und 33 zeigen Wege auf, wie einerseits die Technik an den Boden angepasst werden kann und andererseits optimale Zeiträume oder Bedingungen für den Technikeinsatz ermittelt werden können. Die erforderlichen Informationen auf der Bodenachse können über die im Vorhaben entwickelten Algorithmen aus Bodenkarten hergeleitet werden. Die Zuordnungen auf der Druckachse müssen als Beispiele für mögliche Spannweiten betrachtet werden, da sie nur einen Teil des gesamten Technikspektrums wider geben. Systematische Erhebungen zum Unterbodendruck für bundesweit repräsentative Technik fehlen.

4. Diskussion

Das Prüfkonzzept zur Ermittlung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung von Ackerflächen orientiert sich an einer Methode von Lebert und Schäfer (2005), die im Vorhaben weiter entwickelt wurde.

Eine Komponente der im Vorhaben verwendeten Methode ist die Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei einer Bodenwasserspannung von pF 1,8. Eine wesentliche Säule dieser Herleitung ist die Plausibilitätsprüfung der Pedotransferfunktionen. Hierzu ist anzumerken, dass es sich um eine indirekte Validierung handelt. Die Schätzwerte wurden nicht mit Messwerten der gleichen Böden verglichen, da diese nicht vorliegen. Für die Plausibilitätsprüfung wurde ein Bestand an Referenzmesswerten für die Vorbelastung verwendet, der vom Autor als repräsentativ für bundesdeutsche Böden eingestuft wurde. Der Abgleich erfolgte anhand der korrelativen Beziehung zwischen Vorbelastung und Trockenrohdichte. Die Herleitung der Verdichtungsempfindlichkeit über einen vereinfachten Schätzrahmen erfolgt ebenfalls über die Beziehung dieser beiden Größen, wobei die Trockenrohdichte aus pragmatischen Gründen durch die effektive Lagerungsdichte ersetzt wurde. Die Pedotransferfunktionen beschreiben die Vorbelastung anhand von multipler Regression. Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Regressionen variieren bei den verwendeten Gleichungen von $R^2 = 0,49$ bis $R^2 = 0,78$, bezogen auf die zugrunde liegenden Messwerte und die jeweilige Stratifizierung in Bodenarten-Untergruppen der Originalarbeiten. Bei einer Reduzierung der Variablen auf die Trockenrohdichte und die Ermittlung einer linearen Regression zwischen Vorbelastung und Trockenrohdichte geht zwangsläufig Schätzgenauigkeit verloren. Dieser Effekt ist aber bei den Böden in Abhängigkeit von der Bodenart unterschiedlich stark ausgeprägt. Generell gilt, dass je stärker der Einfluss der Aggregierung auf die Vorbelastung ist, desto geringer wird der Einfluss der Trockenrohdichte. Bei den Reinsanden und Lehmsanden ist die Korrelation zwischen Vorbelastung und Trockenrohdichte bei den Messwerten mit $R^2 = 0,54$ recht eng. Bei Schluffsand und Sandlehm ist sie mit $R^2 = 0,26$ geringer, da die Aggregierungseinflüsse zunehmen. Allerdings ist dieses geringere Bestimmtheitsmaß auch der geringeren Anzahl an zugrunde liegenden Wertepaaren geschuldet. Bei den Schluffen, wo die höchste Anzahl an Wertepaaren vorliegt, ist die Korrelation wieder höher, mit $R^2 = 0,48$. Lehme und Tone, bei denen Aggregierungseinflüsse am stärksten ausgeprägt sind, haben nur Bestimmtheitsmaße von etwa $R^2 = 0,10$, das heißt die Korrelation zwischen Vorbelastung und Trockenrohdichte erklärt nur etwa 10% der Varianz. Das ist sehr wenig und hat zur Folge, dass für diese Böden nur wenig Steigung der Vorbelastung mit der Trockenrohdichte erfolgt. Im vereinfachten Schätzrahmen liegen deshalb die tonreicheren Böden bei den am häufigsten vorkommenden effektiven Lagerungsdichten der Klassen LD3 und LD4 in einer Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit, zumeist in Klasse 4 (= hohe Verdichtungsempfindlichkeit). Bei Verwendung dieses Schätzrahmens wird also für tonreichere Böden mit einem Durchschnittswert für die Vorbelastung gearbeitet, der in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte kaum variiert. Bei Schluffen und Sanden ist das anders, hier gibt es deutlich signifikantere Unterschiede in der Vorbelastung bei unterschiedlicher effektiver Lagerungsdichte. Die Herleitung von bodenphysikalischen Eigenschaften über die Trockenrohdichte oder die effektive Lagerungsdichte ist in der Bodenkunde ein üblicher Vorgang. Auch die Herleitung von Luftkapazität, nutzbarer Feldkapazität und gesättigter Wasserleitfähigkeit in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, 2005) basieren auf diesem Prinzip. Die Differenzierung dieser Kenngrößen wird auch dort mit zunehmendem Tongehalt kleiner und die Kennwerte liegen oft bei unterschiedlicher effektiver Lagerungsdichte in einer Klasse. Wenn man, je nach Fragestellung, genauere Schätzungen für die Vorbelastung benötigt, dann muss man die Vorbelastung direkt durch Verwendung der originalen Pedotransferfunktionen herleiten,

da diese die Aggregierungseffekte besser beschreiben, die in der Zuordnung von mittleren Werten für die Vorbelastung und die effektive Lagerungsdichte über eine Ausgleichsgerade weniger zum Ausdruck kommen. Eine solche Berechnung setzt aber das Vorliegen der entsprechenden Eingangsvariablen voraus.

Eine weitere Komponente der vorgestellten Methodik ist die Herleitung der Einflüsse des Bodenwassergehaltes auf die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit. Im Vorhaben wird die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit nach einem von Rücknagel (2006) erstellten Korrekturfaktor an unterschiedliche Bodenwassergehalte angepasst. Der Korrekturfaktor wird bestimmt in Abhängigkeit von der Anfangsvorbelastung bei pF 1,8 und der Austrocknung des Bodens in % Feldkapazität. Bei dieser Bewertung bleibt aber der Einfluss der Wasserspannung bei gegebenem Wassergehalt auf die Vorbelastung unberücksichtigt. Bei gegebenem Wassergehalt bestimmt die pF -Kurve die jeweilige Wasserspannung. Bodeartspezifische Unterschiede der pF -Kurve und deren Einfluss auf die Vorbelastung können deshalb mit dem gewählten Ansatz nicht erfasst werden. Der im Vorhaben verwendete Algorithmus zur Herleitung des Einflusses vom Bodenwassergehalt in % Feldkapazität auf die Vorbelastung behandelt deshalb alle Bodenarten gleich. Es handelt sich um eine Schätzung, bei der nicht alle Einflussgrößen berücksichtigt werden können.

Eine weitere Komponente der Methode ist die Gefügebewertung anhand der effektiven Lagerungsdichte, der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit. Grundsätzlich wäre es möglich, diese Eigenschaften anhand der bereits oben erwähnten Schätztabelle der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, 2005) zu ermitteln. Der dort aufgeführte Schätzrahmen für die Luftkapazität und die gesättigte Wasserleitfähigkeit basiert auf Auswertungen von Krahmer et al. (1995) und beschreibt die statistische Abhängigkeit der beiden Größen von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte. Einen erweiterten Schätzrahmen schlagen Riek et al. (1995) vor, bei dem zusätzlich zu den Einflüssen von Bodenart und effektiver Lagerungsdichte auch geogene und pedogene Auswirkungen berücksichtigt werden. Die Betrachtung wird auf Substrathorizontgruppen ausgedehnt, d.h. bei gleicher Bodenart und effektiver Lagerungsdichte wird die Luftkapazität nach Horizonten und Ausgangsgesteinen differenziert. In der vorliegenden Arbeit kommt ein weiterer Aspekt hinzu: die Besonderheiten in dem bewirtschaftungsbedingt druckbeeinflussten Unterbodenbereich von 30 – 60 cm Tiefe auf Ackerstandorten. In dieser Bodentiefe sind geogene und pedogene Einflüsse durch anthropogene Einwirkungen überprägt. Aus diesem Grund wurden die Schätzrahmen nicht verwendet, sondern eigene Auswertungen mit Analysendaten nur aus diesem Tiefenbereich durchgeführt. Die Auswertungen geben den mittleren, in dieser Bodenschicht vorhandenen Gefügezustand anhand von aktuellen Daten wider. Der Grundsatz einer differenzierten Betrachtungsweise nach geogenen und pedogenen Merkmalen wurde dabei von Riek et al. (1995) übernommen. Bei der gewählten Klassifizierung der Gefügeeigenschaften ist stets zu berücksichtigen, dass es sich um eine Klassifizierung unter dem reinen Aspekt der Verdichtung handelt. Aus diesem Grund sind andere Aspekte der Gefügeeigenschaften ausgeklammert. Würde man die Gefügeeigenschaften z.B. auf die Wasserversorgung von Pflanzen beziehen, müsste die Klassifizierung geändert werden. Die Gefügeeigenschaften von Reinsanden mit sehr hoher Luftkapazität könnten dann aufgrund der geringen nutzbaren Feldkapazität nicht mehr als günstig oder sehr günstig bezeichnet werden. Umgekehrt würde ein Lössboden mit geringer Luftkapazität dann nicht mehr als ungünstig, sondern infolge der hohen nutzbaren Feldkapazität als günstig oder sehr günstig eingestuft.

Eine weitere Komponente der Methodik ist die Herleitung der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung. Diese Auswertung ist wichtig im Hinblick auf die Umsetzung des Bundes-Bodenschutzgesetzes, bei dem der Funktionsaspekt im Vordergrund steht. Im Vorha-

ben wird diese Herleitung über eine 1:1-Verrechnung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit mit der Klasse der Gefügeeigenschaften realisiert. Für einen großen Anteil sandiger Böden gilt, dass eine geringe Verdichtungsempfindlichkeit bei p_F 1,8 mit günstigen Gefügeeigenschaften einhergeht und dadurch die Gefährdung der Bodenfunktionen gering ist. Umgekehrt ist es bei vielen tonigen, lehmigen und schluffigen Böden so, dass eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit bei p_F 1,8 mit ungünstigen Gefügeeigenschaften zusammenfällt und dadurch die Gefährdung der Bodenfunktionen hoch ist. Die Darstellungen über die BÜK 1000 N für die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei p_F 1,8, die Gefügeeigenschaften und die Gefährdung von Bodenfunktionen bei p_F 1,8 sind sich deshalb über weite Flächenanteile ähnlich. Größere Unterschiede bei den Karten gibt es aber bei einer Austrocknung der Böden. Die Austrocknung hat auf die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit einen starken Effekt. So liegt der Anteil von hoch und sehr hoch verdichtungsempfindlichen Flächen bei 80 % Feldkapazität nur noch bei 2 % im Vergleich zu einem Anteil von 54% bei p_F 1,8. Bei der Gefährdung von Bodenfunktionen ist dieser Effekt weniger stark. Hier reduziert sich der Flächenanteil mit hoher bis sehr hoher Gefährdung von 68% bei p_F 1,8 auf 32% bei 80 % Feldkapazität. Auch bei sehr starker Austrocknung auf 60 % Feldkapazität sind deutliche Unterschiede zwischen den Klassifizierungen der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit und der Gefährdung von Bodenfunktionen zu erkennen. Während bei diesem Austrocknungsgrad die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei 94% der Flächen in der geringsten Stufe „sehr gering“ liegt, ist die Gefährdung von Bodenfunktionen zu 49% als gering und zu 47% als mittel eingestuft. Der Grund für diesen unterschiedlichen Gradienten beim Einfluss des Bodenwassergehaltes liegt darin, dass bei der Gefährdung von Bodenfunktionen die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit gleichwertig mit der Klasse der Gefügeeigenschaften verrechnet wird. Letztere ist aber unabhängig vom Bodenwassergehalt. Da sie immer gleich bleibt, wird bei einer 1:1-Verrechnung mit der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit der Einfluss des Wassergehaltes sozusagen halbiert. Für praktische Erwägungen bedeutet dieser Sachverhalt, dass eine Austrocknung zwar die Gefahr zusätzlicher Verdichtungen stärker mindert, die Gefährdung von Bodenfunktionen aber weniger stark, da ungünstige Gefügeeigenschaften durch Befahrungen im trockeneren Zustand nicht günstiger werden.

Eine weitere Komponente des Prüfkonzepes ist die Abschätzung der nutzungsbedingten Unterbodenbelastungen. Diese müssen bei einer Verwendung im Vorbelastungskonzep vertikal gerichtet sein, da auch die Vorbelastung als vertikal gerichtete Bodeneigenschaft ermittelt wird. Es ist nicht zulässig, einen anders gerichteten Druck mit der Vorbelastung zu vergleichen. Verwendet man z.B. den Bodendruck nach Bolling (1986), der mit Schlauchsonden gemessen wird, stimmen die mechanischen Randbedingungen für einen Vergleich mit der vertikalen Vorbelastung nicht überein. Ein Schlauchsondendruck ist ungerichtet und spiegelt einen durchschnittlichen, über alle Raumrichtungen gemittelten Druck wider. Er muss immer kleiner sein als die vertikale Spannungskomponente. Lediglich im sehr oberflächennahen Bodenbereich gleichen sich beide Werte an, da sich dort noch keine nennenswerten horizontalen Hauptspannungen aufbauen. Man kann zwar grundsätzlich den Schlauchsondendruck verwenden um Bodenbelastungen zu quantifizieren. Der Vergleich mit einer zugehörigen Bodensabilität muss dann aber mit einer hydrostatischen Vorbelastung erfolgen, die nur im Triaxialtest ermittelt werden kann. Für die Schätzung einer hydrostatischen Vorbelastung stehen aber keine Pedotransferfunktionen zur Verfügung.

Vertikal gerichtete Bodenspannungen im Unterboden können prinzipiell nach dem vereinfachten Söhne-Modell berechnet werden. Dazu ist es aber erforderlich, eine Validierung über Druckmessungen und eine Anpassung des Konzentrationsfaktors durchzuführen, um Schwachstellen des Modells auszugleichen. Die wesentlichen Schwachstellen sind:

- Die Reifenkontaktfläche, die effektiv Spannungen in den Boden überträgt, ist schwer zu bestimmen. Messungen der Kontaktfläche durch Umstäubungen führen häufig dazu, dass die effektiv Druck übertragende Kontaktfläche überschätzt wird, da Randbereiche miterfasst werden, die kaum Druck aufnehmen. Dadurch wird der mittlere Kontaktflächendruck unterschätzt.
- Der Spannungsabbau über die Tiefe erfolgt nicht einheitlich, da die Bodeneigenschaften variieren können, z.B. durch Bodenhorizonte mit unterschiedlicher Dichtlagerung und Stabilität, Pflugsohle, etc.
- Bei Festlegungen auf eine Referenztiefe, z.B. 40 cm, ist unklar, inwieweit die Abpufferung von Oberflächeneffekten, wie die Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche, bereits abgeschlossen ist.

In neueren, analytisch-empirischen Modellen wird versucht diese Schwachstellen zu eliminieren bzw. zu minimieren (Keller et al., 2007; Keller et al., 2009; Lamandé und Schjøning, 2009). Als Eingangsgröße für den Kontaktflächendruck wird hier nicht mehr eine empirisch ermittelte oder geschätzte Kontaktfläche verwendet, sondern der Reifentyp, die Reifenabmessungen und ein vom Reifeninnendruck abhängiges, oberflächennahes Druckverteilungsmuster (vgl. Abb. 28). Mit der Radlast und dem typischen Druckverteilungsmuster eines Reifens als Eingangsparameter wird dann anhand des Segmentmodells nach Söhne eine Druckfortpflanzung berechnet. Konzentrationsfaktoren werden schichtweise den jeweiligen Bedingungen angepasst.

Anhand der Karten für die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt lässt sich zwar erkennen, dass die Befahrbarkeit des Unterbodens mit zunehmender Austrocknung immer besser wird. Für die Gefügeentwicklung ist es aber entscheidend, mit welchem Druck der jeweilige Vorbelastungszustand belastet wird. Bei 80% Feldkapazität sind 43% der Ackerflächen nur noch sehr gering verdichtungsempfindlich. Auf den betreffenden Flächen sind durch Befahrungen keine zusätzlichen Verdichtungen zu erwarten. 52% der Flächen liegen bei dieser Austrocknung aber noch in der Klasse für mittlere Verdichtungsempfindlichkeit. Der Klasse „mittel“ kommt im üblichen Sprachgebrauch oft die Einstufung „neutral“ oder „unbedenklich“ zu. Durch die Verknüpfung von Verdichtungsempfindlichkeit und Vorbelastung sind den jeweiligen Klassen jedoch immer konkrete Zahlen für die Vorbelastung zugeordnet. Unbedenklich wäre das Befahren beim Vorliegen der Klasse „mittel“ nur mit Maschinen, die eine mittlere, vertikale Druckbelastung von 120 bis 160 kPa im Unterboden erzeugen. Befahrungen mit hohen und sehr hohen Druckbelastungen von über 160 kPa würden auf diesen Flächen immer noch zu Verdichtungen im Unterboden führen, wären also nicht unbedenklich.

Es existieren bereits von anderen Autoren veröffentlichte Karten zur Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden der Bundesrepublik (Horn et al., 2002 und 2005). Diese sind jedoch mit den im Vorhaben vorgestellten Karten für die Unterbodenverdichtung nicht direkt vergleichbar, da sowohl andere methodische Vorgehensweisen als auch andere Karten für die Darstellung zugrunde liegen. So haben Horn et al. (2002) die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für den Oberboden (0-30 cm Tiefe) ermittelt und über eine nicht nutzungsdifferenzierte Version der BÜK 1000 für das Bundesgebiet dargestellt. Horn et al. (2005) beschreiben die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden für Europa im Maßstab 1:1.000.000. Diese Darstellungen weichen für die Böden der Bundesrepublik teilweise stark von den im Vorhaben dargestellten Ergebnissen ab. Die Legendeneinheiten der von den Autoren verwendeten Europakarte sind jedoch nicht identisch mit denen der im Vorhaben benutzten Karte (BÜK 1000 N, 2007). Darüber hinaus haben Horn et al. (2002 und 2005) ausschließlich die Pedotransferfunktionen nach DVWK Merkblatt 234 benutzt, die im Vorha-

ben nur für Reinsande und Lehmsande verwendet und für alle anderen Bodenarten durch die DIN Vornorm 19688 ersetzt wurden.

Die im Vorhaben verwendete Methode eignet sich für Bewertungen der Verdichtungsgefährdung von Unterböden auf Ackerflächen. Die Gültigkeitseinschränkung für Ackerflächen resultiert daraus, dass die Pedotransferfunktionen zur Abschätzung der Vorbelastung bei pF 1,8 ausschließlich auf der Grundlage von Messdaten aus Ackerflächen erstellt worden sind. Die Einschränkung der Gültigkeit für Unterböden ist durch die ausschließliche Verwendung von Unterbodendaten für die Ermittlung der Gefügeeigenschaften bedingt, die in die Bewertung der Gefährdung von Bodenfunktionen eingehen. Die Ermittlung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit über Pedotransferfunktionen zur Vorbelastung als Teilkomponente der Gesamtmethodik ist grundsätzlich auch für Ackerkrumen anwendbar, da die bodenphysikalischen Besonderheiten der Ackerkrume über die entsprechenden Variablen, wie Trockenrohdichte oder Luftkapazität, berücksichtigt werden. Eine Anwendung des Vorbelastungskonzeptes für den Schutz der Ackerkrume ist jedoch nur eingeschränkt sinnvoll. Es würde z.B. wenig Sinn machen, über das Vorbelastungskonzept tolerable Bodenbelastungen zu ermitteln, die in einer frisch gelockerten Krume nicht zu einer Rückverdichtung führen. Der Boden wäre dann praktisch gar nicht befahrbar. Beim Schutz der gewendeten Ackerkrume steht nicht die Frage der Vermeidung von Rückverdichtungen im Vordergrund, sondern die Frage zu welchem optimalen Zeitpunkt die Krume wieder aus ökonomischen und ökologischen Gründen gelockert werden sollte. Für diese Fragen sind alternative Konzepte entwickelt worden, wie Schadverdichtungsgefährdungsklassen (Petelkau et al., 2000) und Druckbelastbarkeit nach Werner und Paul (1999). Diese Konzepte berücksichtigen sowohl die Belange der Rückverdichtung bei Lockerung, z.B. beim Pflügen, als auch die Belange des Erhalts einer funktionsfähigen Unterkrume bei konservierender Bodenbearbeitung. Für den Schutz des Unterbodens aber gibt das Vorbelastungskonzept eine klare Linie vor: Vermeidung von zusätzlicher Verdichtung. Theoretisch könnte es hier zwar auch zu einer unerwünschten Konservierung von bereits vorliegenden Gefügeschäden kommen. Nämlich dann, wenn die Vorbelastung durch die übermäßige Verdichtung sehr hoch ist und folglich auch entsprechend hohe Bodenbelastungen als unbedenklich eingestuft würden. Bei einer Verwendung des vereinfachten Schätzrahmens zur Herleitung der Vorbelastung aus Bodenart und effektiver Lagerungsdichte ist dieser Fall aber ausgeschlossen. Hier wird durch die Verwendung einer Ausgleichsgeraden für alle zu einer Bodenarten-Gruppe zugehörigen Böden von einem durchschnittlichen Gefügezustand ausgegangen, so dass durch mögliche Schadverdichtung extrem vorbelastete Böden gar nicht erfasst werden. Würde ein solcher Fall vorliegen, dann wäre die über den Schätzrahmen ermittelte durchschnittliche Vorbelastung geringer als die tatsächliche am konkreten Ort und die daraus abgeleiteten Bodenbelastungen für ein unbedenkliches Befahren würden dem geschädigten Bodengefüge gleichzeitig eine Regeneration ermöglichen.

Das gesamte Prüfkonzept zur Schutz des Unterbodens landwirtschaftlich genutzter Flächen ist so aufgebaut, dass zunächst einmal über eine kleinmaßstäbige Kartendarstellung für bestimmte Regionen oder Bodenlandschaften die tatsächliche Gefährdung der Bodenfunktionen ermittelt wird. Dies kann auf Basis der Bodenfeuchte von pF 1,8 als größtmögliches Risikoszenario geschehen, oder auf Basis von üblicherweise innerhalb einer Region und Jahreszeit vorliegenden Bodenwassergehalten. Damit können der Handlungsbedarf des Bodenschutzes und die Dringlichkeit der Anwendung von Bodenschutzkonzepten für den Unterboden abgeschätzt werden. Als Schutzkonzept zur Vermeidung weiterer Verdichtungen wird das Vorbelastungskonzept für die landwirtschaftliche Beratung empfohlen. Die Anwendung des Vorbelastungskonzeptes ist in einer Bodenlandschaft umso dringlicher, je höher die Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung ist. Das im Vorhaben um den Bodenwassergehalt erweiterte Vorbelastungskonzept berücksichtigt für die Vermeidung von Bodenverdichtungen die Bo-

denart, den Bodenwassergehalt und den durch landwirtschaftliche Maschinen verursachten Bodendruck, so wie es in § 17 BBodSchG gefordert ist.

5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird sowohl in der Anwendung der vorgestellten Methode gesehen als auch bei der weiteren Optimierung einzelner Komponenten.

Ein offenes Gebiet ist nach der Entwicklung des Prüfkzeptes zur Ableitung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung dessen Anwendung und Erweiterung. Für Anwendungen wäre es sinnvoll, die dargestellten Algorithmen auch für die Böden von kleinmaßstäbigeren Karten anzuwenden, z.B. im Maßstab 1:50.000. Damit würde die regionale Genauigkeit der Ergebnisse verbessert und regional typische Besonderheiten könnten stärker berücksichtigt werden, als es über die BÜK 1000 N möglich ist.

Für erweiterte Anwendungen wäre es sinnvoll, Gebiete mit typischen Fruchtfolgen und die dafür typische, angewandte Landtechnik zu identifizieren. So könnten auch die Bodenbelastungen in Karten dargestellt werden und flächenkonkrete Darstellungen für die Gefügeprognose könnten erfolgen. Dazu müsste auch die regionale und saisonale, mittlere klimatische Wasserbilanz berücksichtigt werden, um so eine für den Bearbeitungszeitraum repräsentative Korrektur der Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von Bodenwassergehalt durchführen zu können. Die Herleitung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung könnte so kartographisch auf eine Herleitung der tatsächlichen Verdichtung erweitert werden. Darüber hinaus wäre es wichtig, zukünftige Szenarien für den Bodenwasserhaushalt zu berücksichtigen, die sich durch den Klimawandel im Hinblick auf zu erwartende stärkere Niederschläge insbesondere im Winterhalbjahr ergeben. Stärkere Niederschläge in diesem Zeitraum können sich besonders auf die Verdichtungsgefährdung im späteren Herbst und im Frühjahr auswirken.

Die Vorgehensweise zur Korrektur der Vorbelastung bei $pF_{1,8}$ in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt könnte noch durch Berücksichtigung der Bodenart verfeinert werden. So könnten die Einflüsse der Porengrößenverteilung auf die Stabilität bei steigender Austrocknung ermittelt werden. Als mögliche Lösungswege werden Modellherleitungen als auch ein Messprogramm der Vorbelastung in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt an repräsentativen Böden gesehen.

Die Herleitung der Unterbodenbelastung durch landwirtschaftliche Verfahren und Maschinen könnte erleichtert werden. Die Herleitung nach dem vereinfachten Söhne-Modell, wie sie im Vorhaben dargestellt wird, ist durch das zusätzliche Erfordernis von Druckmessungen sehr aufwändig, so dass aktuell nur Ergebnisse für ein kleineres Spektrum der landtechnischen Verfahren und deren Varianten vorliegt. Eine systematische Herleitung der Unterbodenbeanspruchung (vertikale Spannung) durch übliche, aktuelle Landtechnik könnte mit modernen, anwenderfreundlichen Modellen erfolgen.

6. Schlussfolgerungen

Die im Vorhaben vorgestellte Methode liefert die Grundlagen für einen umfassenden Bodenschutz gegen Verdichtungen. Sie erfüllt die Anforderungen sowohl an eine überregionale Bodenschutzplanung, als auch an eine flächenkonkrete Umsetzung innerhalb der Bodenschutzberatung. Sie geht weit über bisherige Betrachtungsweisen von rein potenziellen Gefährdungen hinaus. Durch die kombinierte Berücksichtigung der bodenmechanischen Vorbelastung, den Gefügeeigenschaften und dem Bodenwassergehalt, liefert sie eine auf bodenphysikalischen Zusammenhängen aufbauende Herleitung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung von Böden.

Mithilfe des Prüfkonzepthes können diejenigen Flächen ausgewiesen werden, die besonders gefährdet sind und für die der Bodengefügeschutz eine entsprechende Priorität erhalten sollte. Handlungsbedarf ergibt sich vor allem dort, wo bodenbedingt eine hohe Gefährdung der Bodenfunktionen vorliegt und gleichzeitig ein hoher, nutzungsbedingter Belastungseintrag erfolgt. Es kann ferner hergeleitet werden, auf welchen Flächen die derzeit praktizierten Vorsorgemaßnahmen zum Bodenschutz ausreichen um die Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes zu erfüllen, und auf welchen Flächen die Vorsorge erweitert und konkretisiert werden sollte. Dass ein Handlungsbedarf besteht, den Bodenschutz gegen Verdichtungen zu konkretisieren, zeigen die Ergebnisse des Vorhabens eindeutig. Flächenanteile von 68 % tatsächlich hoch gefährdeter Ackerböden bei einer Bodenfeuchte von pF 1,8 und immer noch von 32 % bei einer Austrocknung auf 80 % Feldkapazität sind dafür ein klares Signal. Inwieweit Klimaveränderungen die aktuelle Situation modifizieren können, wäre bei der Entwicklung von zukünftigen Bodenschutzstrategien zu berücksichtigen.

Das Prüfkonzzept kann darüber hinaus im Rahmen der Bodenschutzberatung zur Schwachstellenanalyse auf Betriebsebene verwendet werden. Über das erweiterte Vorbelastungskonzzept und die zugrunde liegenden Algorithmen zur Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit und der typischen Druckbelastungen durch landwirtschaftliche Maschinen kann abgeschätzt werden, mit welcher Verfahrenstechnik eine standortgerechte Bewirtschaftung erfolgen und weiteren Bodenverdichtungen auf den gefährdeten Flächen effektiv vorgebeugt werden kann.

7. Zusammenfassung

Zur Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit wurden bodenphysikalische Datensätze von Böden aus dem gesamten Bundesgebiet bereitgestellt. Die Daten wurden auf ihre Qualität hin überprüft, gegebenenfalls korrigiert und ergänzt und für eine Auswertung zur Schätzung der Vorbelastung mit Pedotransferfunktionen aufbereitet. Für diese Schätzung konnten 3374 Datensätze von Unterbodenhorizonten aus ca. 1300 Böden verwendet werden.

Die Schätzwerte für die Vorbelastung wurden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. In der Plausibilitätsprüfung wurde ein Abgleich der Schätzwerte mit zu erwartenden Trends und Größenordnungen durchgeführt. Die Erwartungstrends wurden aus einem Referenzmesswertbestand hergeleitet. Für Reinsande und Lehmsande kann die Vorbelastung über Pedotransferfunktionen des Merkblattes DVWK 234 zuverlässig geschätzt werden. Für alle anderen Bodenarten-Gruppen eignen sich die Pedotransferfunktionen der DIN Vornorm 19688 für eine realistische Schätzung.

Die Vorbelastung wurde mit den geeigneten Pedotransferfunktionen für den gesamten Datenbestand geschätzt und in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte dargestellt. Die effektive Lagerungsdichte wurde als unabhängige Variable gewählt, da sie einen Vergleich über alle Bodenarten erlaubt und eine Darstellung über Bodenkarten erleichtert. Reinsande und Lehmsande zeigen einen starken Anstieg der Vorbelastung mit der effektiven Lagerungsdichte. Bei Schluffsanden und Sandlehmen ist dieser Anstieg weniger stark. Die Vorbelastungen dieser Böden liegen ebenso wie diejenigen der Sand- und Lehmschluffe bei hoher Dichte im mittleren Bereich. Den geringsten Anstieg der Vorbelastung mit der Dichtlagerung weisen die Tonschluffe, Normal- und Tonlehme, sowie Schluff- und Lehmtone auf.

Die Vorbelastungswerte wurden anschließend in Stufen für die Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit klassifiziert. Es wurde ein vereinfachter Schätzrahmen für die Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte (LD) erstellt, bei dem der jeweiligen LD-Stufe eine bodenartabhängige, mittlere Verdichtungsempfindlichkeit zugeordnet wird. Der Schätzrahmen wurde ergänzt durch Zu- und Abschlüge in Abhängigkeit von Skelett, Verfestigungsgrad, technogener Umlagerung und Tieflockerung. Zusätzlich wurden Zu- und Abschlüge auf die Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt in % Feldkapazität erhoben. Die Bewertungen der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit umfassen damit das gesamte Spektrum an Bodenwassergehalten im Boden, bei denen Verdichtungen zu erwarten sind. Über den Schätzrahmen erfolgt zunächst eine Herleitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 über die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000 N, Version 2007). Geringe mechanische Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 weisen die Reinsande und Lehmsande der norddeutschen Altmoränenlandschaften auf. Mittlere Verdichtungsempfindlichkeit haben die Sandlehme der norddeutschen Jungmoränenlandschaften, die Sandlössgebiete, Lössgebiete mit Verwitterungs- oder Tertiärbeimischungen und Teile der Lössgebiete mit Lehmschluffen als dominierende Bodenartengruppe im relevanten Tiefenbereich des Unterbodens. Hohe Verdichtungsempfindlichkeit bei pF 1,8 haben Geschiebelehme der Moränenlandschaften, bindige Böden der Flussauen, der überwiegende Teil der Lösslandschaften und Lehme und Tone aus Gesteinsverwitterung und Hangbildungen. Letztere weisen teilweise auch sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit auf, ebenso wie die Teile der Böden des Küstenholozäns. Bei steigender Austrocknung reduziert sich der Anteil an hoch verdichtungsempfindlichen Flächen sukzessive. Bei einer Austrocknung auf 60 % Feldkapazität sind 95 % der Flächen nur noch sehr gering verdichtungsempfindlich.

Die Bewertung der Gefügeeigenschaften unter dem Aspekt der Bodenverdichtung geschah durch Abgleich der Eigenschaften Luftkapazität, gesättigte Wasserleitfähigkeit und effektive Lagerungsdichte mit entsprechenden Schwellenwerten für einen Bodengefügeschaden. Für die Kriterien wurde ein Klassifizierungsschlüssel in Anlehnung an die Einteilungen der Bodenkundlichen Kartieranleitung erstellt, die allerdings bei den Kriterien Luftkapazität und effektiver Lagerungsdichte noch erweitert werden mussten. Aus den drei Einzelkriterien wurde eine durchschnittliche Gesamtnote errechnet, die die Gefügeeigenschaften unter dem Aspekt der Bodenverdichtung klassifiziert. Die Klasse der Gefügeeigenschaften wurde über das Ausgangsgestein der Böden unter Berücksichtigung der Bodenart und bei Lössböden zusätzlich des Bodentyps zugeordnet und über die BÜK 1000 N dargestellt. Mittlere Gefügeeigenschaften haben bei einer Herleitung über die BÜK 1000 N im wesentlichen die sandigen Böden der Altmoränenlandschaften, Sandlöss, Lössböden mit Beimischungen und Böden des Lössgürtels mit Schwarzerdemerkmalen im relevanten Tiefenbereich. Ungünstige Gefügeeigenschaften haben die Sandlehme der Jungmoränenlandschaften, große Teile der Flusslandschaften, Löss-Parabraunerden und Teile der lehmigen und tonigen Verwitterungsböden. Sehr ungünstige Gefügeeigenschaften haben Geschiebelehme und sehr tonreiche Böden.

Die Bewertung der Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung geschah durch Kombination der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit mit den Gefügeeigenschaften. Eine hohe Gefährdung weisen diejenigen Böden auf, die gleichzeitig über eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit und über ungünstige Gefügeeigenschaften verfügen. Umgekehrt sind Böden gering gefährdet, wenn sie gleichzeitig eine geringe Verdichtungsempfindlichkeit und günstige Gefügeeigenschaften aufweisen. Aus den verschiedenen Kombinationen ergaben sich für die untersuchten Böden insgesamt 5 Gefährdungsklassen. Bei einem Bodenwassergehalt von pF 1,8 weisen 68 % der Ackerflächen der Bundesrepublik im Unterboden eine hohe bis sehr hohe Gefährdung auf. Betroffen sind vor allem die Böden der Jungmoränenlandschaften, der Lössgebiete und der Landschaften aus lehmig, tonigem Verwitterungsmaterial. Die Bewertung der Verdichtungsgefährdung bei pF 1,8 stellt allerdings eine für Befahrungen sehr hohe Bodenfeuchte dar. Bei einem Bodenwassergehalt von 80 % Feldkapazität, der einem mittleren Bodenwassergehalt bei Befahrungen näher kommt, verteilen sich die Klassen für hohe, mittlere und geringe Gefährdung jeweils auf etwa ein Drittel der Ackerfläche der Bundesrepublik. Hohe Gefährdung liegt bei diesem Wassergehalt noch im Küstenholozän, den Geschiebelehmen der Jungmoränenlandschaften, in Teilen der Lössgebiete, Flussauen und bei Teilen der lehmig tonigen Verwitterungsböden vor. Mittlere Gefährdung liegt im überwiegenden Teil der Lössgebiete und bei den Sandlehmen der Jungmoränenlandschaften vor, während die Böden der Altmoränenlandschaften nur noch eine geringe Gefährdung aufweisen.

Im letzten Teilschritt wurden die nutzungsbedingten Aspekte für die Verdichtungsgefährdung hergeleitet. Der verfahrensabhängige, vertikale Bodendruck in 40 cm Bodentiefe wird im Vorhaben aus Untersuchungen an sächsischen Betrieben abgeleitet, die allerdings nicht das gesamte landtechnische Verfahrensspektrum darstellen können. Die höchsten mechanischen Belastungen im Unterboden stellt die Rübenenernte dar, mit einer vertikalen Druckspanne im Boden von 180 bis 250 kPa. Auch Mähdruschverfahren können eine sehr hohe Bodenbelastung mit Drücken von 100 – 250 kPa erreichen. Gülldüngung weist im Unterboden eine Druckspanne von 100 – 220 kPa und der Erntetransport erreicht Druckwerte von 50 – 180 kPa, je nach Maschinenausstattung. Verfahren des Pflanzenschutzes und der Mineraldüngung weisen eine Druckspanne von 40 – 150 kPa auf. Durch die Grundbodenbearbeitung (ohne Pflügen mit Furchenbefahrung) wird der Unterboden mit 40 – 100 kPa belastet. Der verfahrensabhängige Bodendruck im Unterboden wird zur Ermittlung des Verdichtungsverhaltens

zunächst der Vorbelastung bei pF 1,8 gegenübergestellt, die aber um den aktuellen Bodenwassergehalt korrigiert wird.

Die vier Hauptkomponenten des Prüfkonzeptes zur Ermittlung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung sind somit:

- Die Herleitung und Darstellung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit bei unterschiedlichem Bodenwassergehalt über die Vorbelastung
- Die Herleitung und Darstellung der Gefügeeigenschaften
- Die Herleitung und Darstellung der Gefährdung von Bodenfunktionen
- Die Herleitung des verfahrensabhängigen Bodendruckes im Unterboden zur Abschätzung des Verdichtungsverhaltens mit dem Vorbelastungskonzept

Das Prüfkonzept liefert durch die kombinierte Berücksichtigung der bodenmechanischen Vorbelastung, den Gefügeeigenschaften und dem Bodenwassergehalt eine auf bodenphysikalischen Zusammenhängen aufbauende Herleitung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung von Böden. Das gesamte Prüfkonzept zum Schutz des Unterbodens landwirtschaftlich genutzter Flächen ist so aufgebaut, dass zunächst einmal über eine kleinmaßstäbige Kartendarstellung für bestimmte Regionen oder Bodenlandschaften die tatsächliche Gefährdung der Bodenfunktionen ermittelt wird. Dies kann auf Basis der Bodenfeuchte von pF 1,8 als größtmögliches Risikoszenario geschehen, oder auf Basis von üblicherweise innerhalb einer Region und Jahreszeit vorliegenden Bodenwassergehalten. Damit können der Handlungsbedarf des Bodenschutzes und die Dringlichkeit der Anwendung von Bodenschutzkonzepten für den Unterboden abgeschätzt werden. Die großen Flächenanteile hoch verdichtungsgefährdeter Böden sind ein deutlicher Hinweis auf einen erweiterten Handlungsbedarf. Als Schutzkonzept zur Vermeidung weiterer Verdichtungen wird das Vorbelastungskonzept für die landwirtschaftliche Beratung empfohlen. Die Anwendung des Vorbelastungskonzeptes ist in einer Bodenlandschaft umso dringlicher, je höher die Gefährdung von Bodenfunktionen durch Verdichtung ist. Das im Vorhaben um den Bodenwassergehalt erweiterte Vorbelastungskonzept berücksichtigt für die Vermeidung von Bodenverdichtungen die Bodenart, den Bodenwassergehalt und den durch landwirtschaftliche Maschinen verursachten Bodendruck, so wie es in § 17 BBodSchG gefordert ist.

Literatur

- Arvidsson J. (2001): Subsoil compaction caused by heavy sugar beet harvesters in southern Sweden. I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil & Tillage Res.* 60, 67-78.
- Arvidsson J., Sjöberg E., Van den Akker J.J.H. (2003): Subsoil compaction by heavy sugar beet harvesters in southern Sweden. III. Risk assessment using a soil water model. *Soil & Tillage Res.* 73, 77-87.
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17.03.1998. BGBl. I S. 502.
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 16.06.1999, BGBl. I, 1554ff.
- Berli M., Kirby J.M., Springmann S.M., Schulin R. (2003): Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Res.* 73, 57-66.
- BGR (2007): Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Blume H.-P. (1968): Stauwasserböden. – Arbeiten der Universität Hohenheim (Landwirtschaftliche Hochschule) 42, Ulmer, Stuttgart.
- Bolling I.H. (1986): Beanspruchung des Bodens beim Schlepper- und Maschineneinsatz. *KTBL Schrift* 308 : Bodenverdichtungen, 49-71.
- Boussinesq J. (1885): Application des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Gauthier-Villais, Paris, France, 30 pp.
- Bradford J.M., Gupta S.C. (1986): Compressibility. In: Klute A. (Hrsg.): *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Second Edition*, 479-492.
- Casagrande A. (1936): The determination of pre-consolidation load and its practical significance. *Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Harvard University Cambridge, Mass, USA.* 3, 60-64.
- Chamen T., Alakukku L., Pires S., Sommer C., Spoor G., Tijink F., Weißkopf P. (2003): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2: Equipment and field practices. *Soil & Tillage Res.*, 73, 161 - 174.
- Cramer B. (2006): Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. *Bonner Bodenkundl. Abhandlungen*, 44, 198 pp.
- Cramer B., Botschek J., Weyer T. (2006): Untersuchung zur Bodenverdichtung nordrhein-westfälischer Böden. *Z Bodenschutz* 3/06, 64-71.
- Dias Junior M.S., Pierce F.J. (1995): A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology* 8, 139-151.
- Diez T., Weigelt H. (1997): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (Hrsg.). Sonderdruck dlz agrarmagazin, München, 2. geänderte Auflage.
- DIN V 19688 (2001): Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. DIN-Vornorm 19688, Deutsches Institut für Normung, Beuth, Berlin.
- DIN 19682-10 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Felduntersuchungen – Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges. Deutsches Institut für Normung, Beuth, Berlin.
- DIN 19683-9 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben. Deutsches Institut für Normung, Beuth, Berlin.

- DIN 19683-13 (2007): Bodenbeschaffenheit – Physikalische Laboruntersuchungen Teil 13: Bestimmung des Substanzanteils, des Porenanteils und der Porenziffer. Deutsches Institut für Normung. Beuth, Berlin.
- DIN-ISO 11272 (2001): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohdichte. Deutsches Institut für Normung. Beuth, Berlin.
- DIN-ISO 11274 (2001): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens, Laborverfahren. Deutsches Institut für Normung. Beuth, Berlin.
- Dumbeck G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Dissertation Universität Gießen, 216 pp.
- DVWK M 234 (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden - Teil 1: Mechanische Belastbarkeit. DVWK Merkblatt, ATV-DVWK, Hennef.
- DVWK M 235 (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden - Teil 2: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. DVWK Merkblatt, ATV-DVWK, Hennef.
- DVWK M 901 (2002): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden - Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. ATV-DVWK Merkblatt, ATV-DVWK, Hennef.
- DVWK R 136 (1999): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung. Teil II: Ableitungen zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden. DVWK-Regel, ATV-DVWK, Hennef.
- Eckert H., Breitschuh G., Sauerbeck D. (2002): Das Umweltsicherungssystem (USL) des VDLUFA – ein Baustein für Umweltmanagementsysteme. In Spindler (Hrsg.): Agrar-Öko-Audit, 72-88. DLG-Verlags-GmbH.
- Flühler H. (1973): Sauerstoffdiffusion im Boden. – Mitteilgn. schweiz. Anst. forstl. Versuchswesen 49, 125 – 250.
- Fröhlich O.K. (1934): Druckverteilung im Baugrunde. Springer Wien.
- Hartge K.H., Horn R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. 4.Auflage, Schweizerbarth, Stuttgart.
- Hennings V. (2001): Vergleichende Bewertung bestehender Pedotransferfunktionen zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.): Arbeitshefte Boden 2001/3, 5 – 22.
- Horn R. (1981a): Die Bedeutung der Aggregation von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrößen. Schriftenreihe FB 14 der TU Berlin 10, 200 pp.
- Horn R. (1981b): Eine Methode zur Ermittlung der Druckbelastung von Böden anhand von Drucksetzungsversuchen. Z. Kulturtech. u. Flurber. 22, 20-26.
- Horn R. (1986): Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 129, 9-18.
- Horn R., Lebert M., Burger N. (1991): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen. In: Materialien 73: Mechanische Belastbarkeit von Böden Bayerns. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen München.
- Horn R., Taubner H., Wuttke M., Baumgartl T. (1994): Soil physical properties related to soil structure. Soil & Tillage Res. 30, 187 - 216.
- Horn R., Simota C., Fleige H., Dexter A., Rajkai K., de la Rosa D. (2002): Prognose der mechanischen Belastbarkeit und der auflastabhängigen Änderung des Lufthaushaltes in Ackerböden anhand von Bodenkarten. J. Plant Nutr. Soil Sci. 165, 235-239.
- Horn R., Fleige H., Richter F.-H., Czyz E.A., Dexter A., Diaz-Pereira E., Dumitru E., Enache R., Mayol F., Rajkai K., de la Rosa D., Simota C. (2005): SIDASS project Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. Soil & Tillage Res. 82, 47-56.

- KA3 (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Auflage, Ad hoc AG Boden Hannover. In Kommission: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- KA4 (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage, Ad hoc AG Boden Hannover. In Kommission: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- KA5 (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Ad hoc AG Boden Hannover. In Kommission: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Keller T. (2005): A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering* 92 (1), 85-96.
- Keller T., Arvidsson J., Dawidowski J.B., Koolen A.J. (2004): Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Res.* 77, 97-108.
- Keller T., Défossez P., Weisskopf P., Arvidsson J., Richard G. (2007): SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Res.* 93, 391-411.
- Keller T., Stettler M., Arvidsson J., Lamandé M., Schjønning P., Berli M., Rydberg T. (2009): Stress propagation in arable soil: determination and estimation of the concentration factor. *Proceedings 18th Int. Conf. ISTRO*, June 14.-19.2009 Izmir, Turkey, T1, 045, 1-9 (CD ROM).
- Krahmer U, Hennings V., Müller U-, Schrey H.-P. (1995): Ermittlung bodenphysikalischer Kennwerte in Abhängigkeit von Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 158, 323-331.
- Lamandé M., Schjønning P. (2009): Stress transmission in soil: effect of soil water content. *Proceedings 18th Int. Conf. ISTRO*, June 14.-19.2009 Izmir, Turkey, T4, 007, 1-6 (CD ROM).
- Lebert M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. *Bayreuther Bodenkundl. Berichte Band 12*, 131 pp.
- Lebert M., Horn R. (1994): Drucksetzungsversuche auf landwirtschaftlich rekultivierten Flächen. Abschlussbericht Forschungsvorhaben Rheinbraun, unveröffentlicht.
- Lebert M., Brunotte J., Sommer C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr. *Texte Umweltbundesamt (Hrsg.)* 46/04, 122 pp.
- Lebert M., Böken H. (2004): Vermeidung von Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. *Z. Bodenschutz* 2/04, 36-43.
- Lebert M., Schäfer W. (2005): Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. *Z. Bodenschutz* 2/05, 42-46.
- Lebert M., Schäfer W. (2007): Vorstellung eines Regionalisierungsschlüssels zur Ausweisung von Risikoflächen für Bodenverdichtungen im Maßstab 1:50.000. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 110 (2), 507-508.
- Newmark N.M. (1935): Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. *Univ. Illinois Eng. Exp. Stat.* 24, 5-19. Urbana, Illinois.
- 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 (2004): Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.): Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS), Auswertungsmethoden im Bodenschutz, Hannover 2004.
- Paul R. (2004): Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbaulich genutzten Böden. *Zwischenbericht 46/02.*, Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt.

- Petelkau H., Seidel K., Frielinghaus Mo. (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.
- Quasem H., Attinger W., Berli M., Schulin R. (2000): Schlussbericht zum Forschungsprojekt: Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf der Trasse der Transitgasleitungen Däniken-Grimsel (TRG2) und Rodersdorf-Lostorf (TRG3), ETH Zürich, Switzerland.
- Renger M. (1970): Über den Einfluss der Dränung auf das Gefüge und die Wasserdurchlässigkeit bindiger Böden. – Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 11, 23 – 28.
- Riek W., Wessolek G., Renger M., Vetterlein E. (1995): Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität von Substrat-Horizontgruppen – eine statistische Auswertung von Labordatenbanken. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 158, 485-491.
- Rücknagel J. (2006): Entwicklung eines Modells zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten. Schriftenreihe Pflanzenbauwiss. Inst. f. Agrar- und Ernährungswiss., Martin-Luther-Univ. Halle, Band 1.
- Schäfer-Landefeld L., Brandhuber R. (2001): Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Vorbelastung von Böden – ein tragfähiges Konzept? Z. Bodenschutz 2/01, 48 – 52.
- Schjønning P., Lamandé M., Tøgersen F., Pedersen J., Møller Hansen P. (2006): Reduction of soil compaction. Magnitude and distribution of stress in the contact area between wheel and soil (danish, english summary). Danmarks JordbrugsForskning DJF rapport Markbrug nr. 127.
- Schjønning P., Lamandé M., Tøgersen F., Arvidsson J., Keller T. (2008): Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tire interface. Biosystems Engineering, Vol. 99, Issue 1, 119-133.
- Schlichting E., Blume H.-P., Stahr K. (1995): Bodenkundliches Praktikum, 2. Auflage. Blackwell, Pareys Studentexte 81.
- Söhne W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundle. d. Landtechnik 5, 49-63.
- Stahl H., Marschall K., Götze H. (2005): Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 10, Heft 15.
- Tijink F., Spoor (2004): Technische Leitlinien zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtung. Zuckerindustrie 129 (9), 647- 652.
- Trautner A., Arvidsson J. (2003): Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. Soil & Tillage Res. 73, 107-118.
- Van den Akker J.J.H. (2004): SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. Soil & Tillage Res. 79, 113-127.
- VDI Richtlinie 6101 (2007): Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. Verein Deutscher Ingenieure. Beuth, Berlin.
- VDLUFA (1991): Methodenbuch Band I: Die Untersuchung von Böden, 4. Auflage (wird fortlaufend ergänzt). VDLUFA Verlag, c/o LUFA Speyer.
- VDLUFA (2009): Methodenbuch Band I: Die Untersuchung von Böden, 4. Auflage. 6. Teillieferung: Paul R., Deller B.: Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit (Vorbelastung) von Böden. (In Vorbereitung). VDLUFA Verlag, c/o LUFA Speyer.
- Werner D., Paul R. (1999): Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. Wasser und Boden 51(12): 10-14.
- Zakosek H. (1960): Durchlässigkeitsuntersuchungen an Böden unter besonderer Berücksichtigung der Pseudogleye. Abhandl. Hess. Landesamt f. Bodenforschung, 32, Wiesbaden.

Anhang

Tabelle A1: Zuordnung von Scherparametern in Abhängigkeit von der Bodenart und der Gefügeform (Quellen: 1 = DIN V 19688, 2 = Lebert, 1989, 3 = Nissen, 1999)

Bodenart	Gefügeform	c (kPa)	phi (°)	Quellen
Ss, Su2,3,4	kru	10	35	2/3
	ein	8	35	2/3
	koh	14	35	2
	kit	14	35	2
	sub	15	35	2
Sl2,3,4	kru	15	34	2/3
	ein	8	35	2/3
	koh	13	35	2/3
	kit	13	35	2/3
	pri	10	32	2/3
	pol	23	36	2/3
	sub	23	36	2/3
Slu	kru	12	34	2/3
	koh	12	34	1
	pri	12	34	1
	pol	15	39	1
	sub	16	40	2/3
St2,3	ein	10	38	2/3
	koh	13	38	1
	kit	13	38	1
	pri	13	38	1
	pol	20	41	1
Uu	ein	2	29	1
	koh	8	30	2/3
	sub	12	35	2/3
Us	kru	8	37	1
	ein	2	29	1
	koh	10	35	1
	pri	10	35	1
	pol	14	35	2/3
	sub	15	35	2/3
Uls	ein	12	33	2/3
	kru	15	35	2/3
	koh	15	35	2/3
	pol	18	35	1
	sub	44	40	1
Ut2,3,4	kru	8	34	2/3
	koh	12	35	1
	pri	12	35	1
	pol	17	37	2/3
	sub	17	38	2/3
Ls2,3,4	kru	18	38	2/3
	ein	8	32	2/3
	koh	10	35	1/2/3

Bodenart	Gefügeform	c (kPa)	phi (°)	Quellen
	pri	10	35	1/2/3
	pol	28	37	2/3
	sub	28	38	2/3
Lts	kru	22	38	1
	koh	14	30	2/3
	pri	16	30	2/3
	pol	19	30	1
	sub	26	36	1
Lu	kru	12	34	2/3
	koh	10	30	1
	pri	12	35	1
	pol	16	35	1
	sub	34	38	1
Lt2,3	kru	15	22	2/3
	koh	15	28	1
	pri	15	32	1
	pol	30	36	1
	sub	46	30	1
Ts2,3,4	pol	50	44	1
	sub	50	44	1
Tu2,3,4	kru	20	31	2/3
	koh	32	22	1
	pri	32	28	1
	pol	40	30	1
	sub	45	36	1
Tl	koh	30	24	1
	pri	40	32	1
Tt	koh	30	24	1
	pri	40	32	1
	pol	45	34	2/3

Anschrift des Autors

Dr. Matthias Lebert
Ingenieurbüro für Bodenphysik
Gutenbergstr. 26
24118 Kiel
Email: Matthias.Lebert@t-online.de

Danksagung

Der Autor bedankt sich beim Umweltbundesamt für den Auftrag zur Durchführung des Vorhabens und die konstruktive Zusammenarbeit, insbesondere mit Herrn Stephan Marahrens und Herrn Dr. Frank Glante. Weiterer Dank gilt den Geologischen Diensten und Landwirtschaftseinrichtungen der Bundesländer für die Bereitstellung der Bodendaten und den Teilnehmern an den Projektsitzungen für ihre Arbeit und wertvollen Anregungen und Beiträge.