

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz
Fachbereich Bodenwissenschaften

**Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und
Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden
in Nordrhein-Westfalen**

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 7. Februar 2006

von

Dipl.-Ing. agr. Benedikt Cramer

aus

Düren

Referent: Priv.-Doz. Dr. Johannes Botschek
Korreferenten: Prof. Dr. Werner Buchner
Prof. Dr. Thomas Weyer
Tag der mündlichen Prüfung: 05.05.2006

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Erscheinungsjahr 2006

D98

Meinen Eltern

Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen

Kurzfassung

Zur Vermeidung schädlicher Bodenveränderungen stehen Prognosekonzepte („Schadverdichtungsgefährdungsklassen“, „Vorbelastung“, „Druckbelastungsquoziient“) zur Verfügung, die auf eine bodengefügeschonende Landbewirtschaftung abzielen. Das „Indikatorenmodell“ soll die eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung im Sinne des Vollzuges nach §8 Bundesbodenschutzgesetz ermöglichen.

Aufgrund der kontroversen Diskussion zur Bodenschadverdichtung wurde in einem Forschungsvorhaben der Gefügestand von Ackerböden in NRW quantifiziert. Die Verifizierung der Modelle zur Vorsorge und Identifikation schädlicher Bodenveränderungen sowie die Entwicklung eines Bewertungsmaßstabes zur Beurteilung landwirtschaftlicher Maschineneinsätze war ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit.

In einem Zeitraum von 3 Jahren wurden bodenphysikalische, -mechanische und -chemische Untersuchungen auf insgesamt 46 landwirtschaftlichen Nutzflächen unter verschiedenen Standort- und Nutzungsbedingungen durchgeführt. Beprobte wurden die Krume (ca. 15 cm), die Krumbasis (ca. 35 cm) und der Unterboden (ca. 50 cm).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterböden der untersuchten Flächen derzeit ihre Funktion der Wasser- und Luftführung erfüllen. Im Krumbasis- und nicht gelockerten Krumbereich sind die Böden jedoch stärker verdichtet. Die Feldgefügeansprachen und die geringen Luftkapazitätswerte deuten hier auf schädliche Bodengefügeveränderungen hin.

Die Anwendung des Indikatorenmodells ermöglicht grundsätzlich die Identifikation einer Schadverdichtung. Problematisch scheinen die Festsetzung der Schadschwelle auf 5 Vol.-% Luftkapazität für Sandböden und die Schwankungsbreiten der Wasserleitfähigkeit zu sein.

Das Konzept „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ eignet sich nicht zur Vorbeugung vor Schadverdichtungen, da der Parameter Lagerungsdichte nicht die Funktionsfähigkeit der Böden beschreibt. Zusammenhänge der Lagerungsdichte zur Luftkapazität wurden allenfalls für Böden gleicher Entstehung festgestellt. Außerdem wurden in diesem Modell Drucksetzungsversuche ohne Berücksichtigung der Aggregation durchgeführt.

Das Konzept „Vorbelastung“ beschreibt die Druckstabilität der Böden und lässt einen wirkungsvollen Beitrag zum Schutz des Bodengefüges erwarten. Bei einer Überschreitung dieser muss langfristig mit einer Degradierung und Funktionseinschränkung der Böden gerechnet werden. Die Vorhersage mittels multipler Regression ist nicht möglich.

Das Konzept „Druckbelastungsquoziient“ eignet sich aufgrund der Festsetzung der Luftkapazitätsgrenze auf 5 Vol.-% nicht. Man bewegt sich mit 5 Vol.-% im absoluten Grenzbereich einer schädlichen Bodenveränderung, was im Widerspruch zu dem generellen Ziel eines Gefahrenabwehrkonzepts steht.

Durch die Gegenüberstellung der Druckbelastbarkeit mit der mechanischen Belastung können landwirtschaftliche Arbeitsverfahren hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung bewertet werden. Die berechneten Bodendruckspannungen zeigen, dass insbesondere der Einsatz schwerer Erntemaschinen ein Gefährdungspotenzial für die Bodenbereiche unterhalb des Lockerungshorizontes darstellt. Je nach Bereifung ist bei Radlasten oberhalb von 6-10 t bei weichen Schluffböden aus Löss mit einer schleichenden Unterbodenverformung zu rechnen.

Review from evaluation models in order to identify and predict harmful soil compactions on arable land in North Rhine-Westphalia

Abstract

In order to avoid damage to soil structure, evaluation models of soil prognosis (“Compaction Risk Classes”, “Pre-compression stress”, “Quotient of pressure divided by soil stability”) are available. Their aim is an agricultural conception for the protection of soil structure. The aim of the “Indication model” is to identify an affected soil structure, as outlined by the Federal Soil Protection Act.

Because of the controversial discussion about soil compactions the soil structure of arable land in North Rhine-Westphalia was quantificated in this study. It was also an objective of the work presented to verify models for preventing and identification of harmful soil structure as well as the development of a valued measure to evaluate large-scale equipment used in arable cropping.

During a period of three years, soil physical, soil mechanical and soil chemical measurements were performed on 46 agricultural field areas with various location and using conditions. The topsoil (about 15 cm), the area of the plow-pan layer (about 35 cm) and the subsoil (about 50 cm) were analyzed.

The results point out that the subsoil of the investigated field areas fulfilled the function of water regime and aeration at this time. However, the plow-pan layers and the loosened topsoil are more compacted. The field estimation of soil structure and the low values of the air capacity point out the damage of soil structure.

The application of the “Indication model” allows the identification of harmful soil compactions. On sandy soils, the air capacity and the waving of water permeability might be a problem.

The concept “Compaction Risk Classes” is not suited to prevention of compactions, because the bulk density does not describe soil functions. Correlations between bulk density and air capacity were established at most for soils with similar geological soil origin. This model was based on examination with disturbed samples without considering soil aggregation, as well.

The concept “Pre-compression stress” describes the mechanical strength of agricultural soils and might expect an effective contribution to protect soil structure. If loads are higher than the precompression load, degradation and reduction of soil functions might occur. The mechanical compressibility, which is characterized by the value of precompression stress, cannot be calculated and assessed by multiple regressions.

The concept “Quotient of pressure divided by soil stability” is not qualified to prevent compactions, because of the defined limit of air capacity (5 Vol.-%). This harmful value means a risk for irreversible soil compaction in contradiction to a general concept of preventing harmful soil compactions.

The comparison between the mechanical strength and the load input allows estimating soil compactions. The calculated soil pressure distribution shows that especially heavy agricultural vehicles are causing problems due to compaction in the loosened subsoil. Depending on the tyres, high wheel loads (6-10 tons) used in arable cropping can lead to long term damage of wet and silty subsoil derived from loess material.

INHALTSVERZEICHNIS		Seite
Abbildungen		III
Tabellen		VII
Abkürzungen, Einheiten, Symbole		IX
1 EINLEITUNG		1
1.1 Problematik		1
1.2 Zielsetzung		3
2 BODENVERDICHTUNGEN IM GESPRÄCH		7
2.1 Grundlegende Untersuchungen		7
2.2 Modellhafte Erfassung		18
3 STANDORTE UND ANALYSEMETHODEN		35
3.1 Untersuchungsablauf		35
3.2 Standorte und betriebliche Situation		35
3.2.1 Betriebs- und Flächenauswahl.....		35
3.2.2 Naturräumliche Einordnung		40
3.2.3 Bodenbewirtschaftung.....		52
3.2.4 Technische Ausstattung.....		52
3.3 Bodenuntersuchungen		54
3.3.1 Bodenphysikalische Messungen.....		56
3.3.2 Bodenmechanische Tests.....		57
3.3.3 Bodenchemische Kennzeichnung.....		60
3.4 Klassifizierung physikalischer und mechanischer Kenngrößen		61
3.4.1 Feldebodenkundliche Parameter		61
3.4.2 Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung.....		62
3.4.3 Wasser- und Luftpermeabilität		63
3.4.4 Vorbelastung.....		64
3.4.5 Eindringwiderstand.....		65
3.5 Statistische Auswertung		65
4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION		67
4.1 Zum Status der Bodenverdichtungen in Nordrhein-Westfalen		68
4.1.1 Feldebefunde		69
4.1.2 Laborbefunde.....		76

4.1.3	Anwendungen des Indikatorenmodells	79
4.1.4	Diskussion	86
4.2	Validierung der Prognosekonzepte zur Vermeidung von schädlichen Bodenveränderungen.....	96
4.2.1	Prognosekonzept Schadverdichtungsgefährdungsklassen	97
4.2.1.1	Einzelindikator Lagerungsdichte	98
4.2.1.2	Versuchsbedingungen	102
4.2.2	Prognosekonzept Vorbelastung.....	104
4.2.2.1	Einzelindikator Vorbelastung (aktuell).....	104
4.2.2.2	Versuchsbedingungen	107
4.2.2.3	Algorithmen	111
4.2.3	Prognosekonzept Druckbelastungsquotient	120
4.2.3.1	Einzelindikator Vorbelastung (potenziell).....	120
4.2.3.2	Versuchsbedingungen	122
4.2.3.3	Algorithmen	122
4.2.4	Fazit.....	122
4.3	Bewertungsmaßstäbe für eine gefügeschonende Landbewirtschaftung.....	124
4.3.1	Standortspezifische Verdichtungsempfindlichkeit	124
4.3.1.1	Schluffstandorte	125
4.3.1.2	Sandstandorte	128
4.3.1.3	Lehmstandorte.....	130
4.3.1.4	Tonstandorte.....	132
4.3.1.5	Diskussion.....	133
4.3.2	Mechanische Bodenbelastung.....	138
4.3.2.1	Fahrzeugparameter.....	138
4.3.2.2	Druckausbreitung.....	141
4.3.2.3	Diskussion.....	145
4.3.3	Modellhafte Bewertung landwirtschaftlicher Arbeitsverfahren	148
4.3.4	Fazit	152
5	ZUSAMMENFASSENDER DISKUSSION	153
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND FORSCHUNGSBEDARF	160
7	ZUSAMMENFASSUNG	163
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	166

Abbildungen	Seite
Abb. 1: Zielsetzung des Forschungsvorhabens	5
Abb. 2: Veränderung von Bodendichte und Porenvolumen in Ackerkrume und Unterboden von 1952-1982 auf 144 Standorten in Niedersachsen (nach RUHM 1983, zit. in SOMMER 1985)	9
Abb. 3: Kausalkette „Bodenbelastung“ – „Bodenbeanspruchung“ nach KÜHNER (1998)	10
Abb. 4: Druckzwiesel mit Linien gleichen Bodendrucks in drei Fahrspuren (BOLLING & SÖHNE 1982)	11
Abb. 5: Die vier Bausteine des Konzepts für bodenschonendes Befahren (SOMMER 1998b)	17
Abb. 6: Obere Grenzwerte des optimalen Lagerungsdichtebereiches von Ap-Horizonten in Abhängigkeit von der Bodenart nach PETELKAU et al. (2000)	20
Abb. 7: Pflanzenabhängige ökologische Schadverdichtungsbereiche (PETELKAU et al. 2000)	21
Abb. 8: Druck-Verdichtungskurve in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (% nFK) für die Bodenart SI3 nach PETELKAU et al. (2000)	22
Abb. 9: Texturabhängige Schadverdichtungsklassen für Böden basierend auf der KA5 (PETELKAU et al. 2000)	22
Abb. 10: Maximal zulässige Belastbarkeit bei einer Bodenfeuchte von 70 % nFK der Bodenartengruppen in den SVGK 1 bis 5 (PETELKAU et al. 2000)	23
Abb. 11: Verlauf der Drucksetzungskurve im Wieder- und Erstverdichtungsbereich	24
Abb. 12: Ermittlung von Druckbelastbarkeit und Druckbelastung des Bodens nach dem Vorbelastungskonzept (verändert nach LEBERT et al. 2004)	26
Abb. 13: Ableitung der Druckbelastbarkeit nach dem Modell DBQ	29
Abb. 14: Untersuchungsablauf	36
Abb. 15: Geographische Lage der Standorte	38
Abb. 16: Parabraunerde-Pseudogley in der Soester Börde	42
Abb. 17: Podsol (links) und Gley (rechts) aus diluvialen Schmelzwassersanden Münsterland	44
Abb. 18: Parabraunerde aus Löss in der Jülicher Börde	46
Abb. 19: Grundwasserbeeinflusster Auenboden der Unteren Rheinniederung	49
Abb. 20: Pseudogley aus Tonstein im Siebengebirge	51
Abb. 21: Aufbau der Drucksetzungsanlage (Ödometer)	59
Abb. 22: Ermittlung der Vorbelastung nach CASAGRANDE (1936) aus der Drucksetzungskurve	59

Abb. 23:	Aufbau des Penetrometers	60
Abb. 24:	Platzierung der Bodenarten von 224 Untersuchungshorizonten im Körnungsdiagramm nach der KA5 (AG BODEN 2005)	67
Abb. 25:	Spatendiagnose, Effektive Lagerungsdichte und Packungsdichte in 212 Untersuchungshorizonten in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden	71
Abb. 26:	Makroporenanteile in 212 Untersuchungshorizonten in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden	72
Abb. 27:	Eindringwiderstand (MPa) von 212 Untersuchungstiefen in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2136)	73
Abb. 28:	Fluviatile horizontal eingeregelter Sandablagerungen im Unterbodenbereich (Horizont II _{Gor}) vom Standort 4a	74
Abb. 29:	Prozentualer Anteil der PL-Messungen (n=620) mit Werten unter 1 cm/s von 212 Untersuchungshorizonten in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden	75
Abb. 30:	Lagerungsdichte (g/cm ³) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)	76
Abb. 31:	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)	78
Abb. 32:	Intrinsische Luftleitfähigkeit (cm ²) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)	79
Abb. 33:	Luftkapazität (%) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden	81
Abb. 34:	Standort 21a (Unterboden)	85
Abb. 35:	Standort 14g (Krume)	86
Abb. 36:	Standort 19a (Krume)	86
Abb. 37:	Standort 10a (Krume)	86
Abb. 38:	Typische Drucksetzungskurve für einen nordrhein-westfälischen Sandboden	92
Abb. 39:	Raseneisenstein auf einer münsterländischen Ackerfläche	92
Abb. 40:	Häufigkeitsverteilung der Wasserleitfähigkeit in 10-facher Wiederholung im Bt-Horizont einer Parabraunerde aus Löss	94

Abb. 41:	Durchwurzelter Krumenbereich eines scharfkantigen verdichteten Polyedergefüges (Standort 19a)	95
Abb. 42:	Fließschema zur Modellvalidierung	96
Abb. 43:	Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Luftkapazität für den gelockerten (links) und nicht gelockerten (rechts) Krumenbereich der beprobten Sande (n=78 bzw. 20)	100
Abb. 44:	Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Luftkapazität für die Krumenbasis (links) und den Unterboden (rechts) der beprobten Schluffe (n=366 bzw. 399)	100
Abb. 45:	Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und gesättigter Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) für den gelockerten Krumenbereich der Schluffe (links) und Sande (rechts) (n=157 bzw. 78)	101
Abb. 46:	Kompressions- und Schergerät nach PETELKAU et al. (1988)	103
Abb. 47:	Verlauf der Luftkapazität (%) in Abhängigkeit von der Auflast (kPa) für verschieden texturierte Böden bei unterschiedlicher Bodenwasserspannung	107
Abb. 48:	Box-Plots der tiefenabhängigen Vorbelastungsergebnisse der einzelnen Standorte für eine Bodenwasserspannung von pF 1,8	110
Abb. 49a:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Schluffstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	115
Abb. 49b:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Schluffstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	116
Abb. 50a:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Tonstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	117
Abb. 50b:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Tonstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	117
Abb. 51a:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Lehmstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	118
Abb. 51b:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Lehmstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	119
Abb. 52a:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Sandstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	119
Abb. 52b:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Sandstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	120

Abb. 53:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Schluffstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=179)	127
Abb. 54:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die unsortiert abgelagerten Böden der Sandstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=129)	129
Abb. 55:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die sortiert abgelagerten Böden der Sandstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=57)	130
Abb. 56:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Lehmstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=57)	131
Abb. 57:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Tonstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=62)	133
Abb. 58:	Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Vorbelastung für nordrhein-westfälische Sandböden (n=107)	135
Abb. 59:	Tiefenwirkung einer Druckzwiebel bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (SOMMER 1998b)	137
Abb. 60:	Radlasten und Kontaktflächendrücke der Hinterräder des an den 23 Standorten jeweils eingesetzten schwersten Schleppers	139
Abb. 61:	Radlast und Kontaktflächendrücke typischer Erntemaschinen	140
Abb. 62:	Radlast und Kontaktflächendrücke typischer Transportmaschinen	141
Abb. 63:	Druckausbreitung für zwei verschiedene Schleppertypen mit unterschiedlicher Bereifung und Radlast (Reifeninnendruck 1,5 bar)	143
Abb. 64:	Druckausbreitung für zwei verschiedene Schleppertypen mit unterschiedlicher Bereifung und Radlast (Reifeninnendruck 0,8 bar)	143
Abb. 65:	Druckausbreitung für verschiedene Köpfrödebunker (weicher Boden)	145
Abb. 66:	Gegenüberstellung von Bodendruck und Vorbelastung für verschiedene Schlepper	149
Abb. 67:	Bodendruck und Vorbelastung für verschiedene Ernte- und Transportmaschinen	150

Tabellen	Seite
Tab. 1: Beispiel für die Berechnung der Druckbelastbarkeit eines Braunerde-Tschernosem nach PAUL (2004)	30
Tab. 2: Einschätzung der Verdichtungsgefährdung für einen nordrhein-westfälischen Marktfruchtbetrieb nach dem Modell DBQ (LÜTKE ENTRUP & BECK 2005)	32
Tab. 3: Von Bodenschadverdichtung direkt betroffene Bodenfunktionen und mögliche Parameter als Anzeiger (verändert nach LEBERT et al. 2004)	33
Tab. 4: Indikatorensystem und Schadensschwellenwerte zur Erkennung einer Bodenschadverdichtung (LEBERT et al. 2004)	34
Tab. 5: Standortcharakterisierung	39
Tab. 6: Klassifizierung der Parameter zur Feldgefügeansprache	62
Tab. 7: Klassifizierung des Makroporenanteils am Bodenvolumen	62
Tab. 8: Klassifizierung der Lagerungsdichte	63
Tab. 9: Klassifizierung der Luftkapazität (LK) und der nutzbaren Feldkapazität (nFK)	64
Tab. 10: Klassifizierung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) und der Luftleitfähigkeit (k_{00})	64
Tab. 11: Klassifizierung der Vorbelastung	64
Tab. 12: Anteil der Bodenarten in NRW (GEOLOGISCHER DIENST 2004)	68
Tab. 13: Einteilung der Bodenarten in Bodenartenhauptgruppen nach KA5 (AG Boden 2005)	69
Tab. 14: Porengrößenverteilung in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)	77
Tab. 15: Bewertung des Bodengefügezustandes 46 landwirtschaftlicher Flächen für drei Untersuchungstiefen nach definierten Schadschwellen	84
Tab. 16: Zusammenhang zwischen physikalischen Kennwerten und der Vorbelastung für n=43 Wertepaare in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung	105
Tab. 17: Gleichungssysteme zur Berechnung der Vorbelastung bei pF 1,8 und pF 2,5 nach verschiedenen Regressionsmodellen	113
Tab. 18: Mess- und Schätzwerte sowie korrelative Beziehungen der einzelnen Regressionsmodelle zur Abschätzung der Vorbelastung für 2 Bodenwasserspannungen	114
Tab. 19: Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 14a-c	127

Tab. 20:	Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 9a+b	131
Tab. 21:	Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 21a+b	133
Tab. 22:	Maschinenspezifische Daten der an den 23 Standorten eingesetzten Schlepper	138
Tab. 23:	Spannweiten der tiefenabhängigen Druckausbreitung aller an den 23 Standorten eingesetzten Schlepper unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse	142
Tab. 24:	Tiefenabhängige Spannweiten der Druckausbreitung von Ernte- und Transportmaschinen unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse in bar	144

Abkürzungen

BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
c	scheinbare Kohäsion (kPa)
Ca	Calcium
CAU	Christian-Albrechts-Universität
DBQ	Druckbelastungsquotient
df	Festsubstanzdichte (g/cm ³)
ein	Einzelkorngefüge
EDV	elektronische Datenverarbeitung
FP	Feinporen (Vol.-%)
FK	Feldkapazität (Vol.-%)
FZB	Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit
GPV	Gesamtporenvolumen (Vol.-%)
k ₀₀	intrinsische Luftleitfähigkeit
KA	Kartieranleitung
kf	gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d)
KF	Kontaktfläche
KFD	Kontaktflächendruck
koh	Kohärentgefüge
krü	Krümelfüge
L	Lehmgehalt (%)
Ld	Lagerungsdichte (g/cm ³)
LK	Luftkapazität (Vol.-%)
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
n	Probenumfang
nFK	nutzbare Feldkapazität (Vol.-%)
NN	Normalnull
NRW	Nordrhein-Westfalen
n.s.	nicht signifikant
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
pF	Logarithmus der Wasserspannung
phi	φ = Winkel der inneren Reibung (°)

PL	in-situ Luftpermeabilität
pol	Polyedergefüge
Pv	Vorbelastung (kPa)
r	Korrelationskoeffizient
r ²	Bestimmtheitsmaß
s	Standardabweichung
S	Sandgehalt (%)
SNK	Student-Newman-Keuls Test
sub	Subpolyedergefüge
SVGK	Schadverdichtungsgefährdungsklassen
SVB	Schadverdichtungsbereich
T	Tongehalt (%)
TDR	Time Domain Reflectometry
TW	Totwasser (Vol.-%)
U	Schluffgehalt (%)

Einheiten

kPa	Kilopascal
hPa	Hektopascal
M.-%	Masseprozent
Vol.-%	Volumenprozent
µm	Mikrometer
MPa	Megapascal

Symbole

σ_n	Gesamtnormalspannung (kPa)
α	Irrtumswahrscheinlichkeit
φ	phi = scheinbarer Winkel der inneren Reibung (°)

1 Einleitung

1.1 Problematik

Böden als unersetzbare natürliche Ressource bilden die Lebensgrundlage für Mensch, Tier und Pflanze. In ihrer ökologischen Multifunktionalität stellen Böden die wichtige Basis eines ausgeglichenen Naturhaushaltes dar. Die **Regelungsfunktion** des Bodens dokumentiert sich in Abbau- und Umbauprozessen eingetragener Stoffe. Nährstoffe werden mineralisiert und bodenfremde Stoffe gefiltert, gepuffert oder gebunden. Daneben besitzen Böden eine **Lebensraumfunktion** für eine Vielzahl von niederen und höheren Organismen, wie z.B. Bakterien, Pilze und Regenwürmer. Diese Lebewesen wiederum beeinflussen viele Umlagerungs- und Umsetzungsprozesse und sind am Aufbau einer stabilen Bodenstruktur beteiligt. Die **Produktionsfunktion** beschreibt die Fähigkeit der Böden zur Erzeugung von Biomasse durch standortabhängige Pflanzen- und Tiergesellschaften. Letztere ist in der Landwirtschaft ein Maß für die Bodenfruchtbarkeit (DELMHORST 1990).

Das **Bodengefüge**, welches die räumliche Anordnung und den Verband der festen Bodenbestandteile sowie der wasser- und luftgefüllten Hohlräume beschreibt, ist für die mechanische Verankerung der Pflanzenwurzeln bestimmend. Es übt einen maßgeblichen Einfluss auf die eng miteinander verknüpften Bodenwasser-, Bodenluft- und Bodenwärmehaushalte aus und ist somit verantwortlich für die Richtung und Intensität aller im Boden ablaufenden Prozesse (SOMMER 1998a). Aus diesem Grunde sollte die Erhaltung einer optimalen **Bodenstruktur** nicht nur vorrangige Aufgabe der Landbewirtschaftung sein, sondern verdient als ein zentrales Ziel der Bodennutzung und des Bodenschutzes besonderes gesellschaftliches Interesse (DÜRR et al. 1995).

Die zunehmende Öffnung der internationalen Märkte und der anhaltende Trend der Preisorientierung am Weltmarkt üben einen starken ökonomischen Zwang auf die Pflanzenbausysteme hierzulande aus. Die notwendigen Produktivitätssteigerungen und Kostensenkungen führen zum Einsatz immer leistungsstärkerer und gleichzeitig schwererer Maschinen und Geräte. Damit verbunden sind erhöhte **Radlasten** und **Kontaktflächendrücke**, die eine stärkere technogene Belastung des Bodens verursachen. Seit Jahrzehnten ist ein ständiges Ansteigen der Masse von landwirtschaftlichen Fahrzeugen und Geräten zu beobachten (SCHÖN & OLFE 1986, KRUPP 1988, OLFE 1995). Heute werden mit schlagkräftigen Erntemaschinen (z.B. Mähdrescher, Zuckerrübensvollernter, Flüssigmist-

transportwagen) die Gesamtlasten von 50 t bzw. die Radlasten von 10 t (PROFI 2003) bei ausgeschöpften Bunkerkapazitäten häufig überschritten.

Die veränderten Produktionsverfahren in der Landwirtschaft geben Anlass zur Sorge, dass durch unsachgemäßen Technikeinsatz nachhaltige Schäden durch **Bodenschadverdichtungen** hervorgerufen werden. Als Bodenschadverdichtung wird eine dauerhafte bewirtschaftungsbedingte Schädigung des Bodengefüges bezeichnet, die negative Auswirkungen auf die Bodenfunktionen hat (BMVEL 2002, WEYER 2004). Die Schadwirkung resultiert aus der Reduzierung der Porengröße und deren Kontinuität, woraus sich eine gestörte Wasser- und Luftleitfähigkeit, ein verringertes Infiltrationsvermögen sowie eine verminderte Luftkapazität ergeben. Die **Verlagerung** und **Dynamik** von Stoffen im Boden werden beeinträchtigt, so dass verstärkte Nährstoffverluste durch Auswaschung und Denitrifikation die Folge sein können (DÜRR et al. 1995). Daneben hemmen Bodenschadverdichtungen aufgrund des Sauerstoffmangels die **biologische Aktivität**. Die Lebensmöglichkeiten der Mikroorganismen werden negativ beeinflusst, aerobe Zersetzungs-, Ab- und Umbauprozesse vermindert. Weiterhin bedingen schädliche Bodenverdichtungen ein eingeschränktes Wurzelwachstum verbunden mit negativen Auswirkungen auf den **Pflanzenertrag**. Verantwortlich hierfür sind zum einen die geringere Durchlüftung des Bodens aufgrund unzureichender Makroporosität und zum anderen die negativen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Böden (BMVEL 2002). Daneben wirken hohe mechanische Bodenwiderstände hemmend auf eine optimale Wurzelausbreitung (DÜRR et al. 1995). In der Literatur sind umfassende Übersichtsbeiträge zur Problematik „Bodenschadverdichtung“ vorhanden (u.a. BARNES et al. 1971, SOANE & VAN OUWERKERK 1994, DÜRR et al. 1995, VAN DEN AKKER et al. 1999, HORN et al. 2000).

Nach OLDEMAN et al. (1991) weisen weltweit ca. 68 Mio. ha der landwirtschaftlichen Nutzfläche physikalische Degradierungserscheinungen infolge Verdichtungen, Versiegelung oder Verkrustung auf, davon allein 33 Mio. ha in Europa. BÖTTCHER (1986, zit. in DÜRR et al. 1995) geht nach Auswertung von Daten aus dem FZB Müncheberg davon aus, dass in den neuen Bundesländern auf ca. 40 % der Ackerflächen bewirtschaftungsbedingte Krumenbasisverdichtungen vorliegen. Die Verbreitung von Bodenverdichtungen in Westdeutschland wird hingegen recht unterschiedlich bewertet (RUHM 1983, SONDERHOFF 1988, HORN et al. 1991). Für NRW liegen Schätzungen nach WEYER & BUCHNER (2001) vor, wonach im Rheinland bis zu 40 % der Ackerflächen als krumenbasisverdichtet einzustufen sind.

Der Gesetzgeber hat die Gefahr erkannt und mit dem **Bundesbodenschutzgesetz** (BBodSchG 1998) rechtliche Regelungen zur Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen als auch zur Abwehr von Gefahren aus schädlichen Bodenveränderungen geschaffen. Im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes fordert das BBodSchG eine nachhaltige Sicherung der natürlichen Funktionen des Bodens als Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen. Nach §17 Abs.2 BBodSchG sind „Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchte und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks, so weit wie möglich zu vermeiden“ (BBodSchG 1998).

In den letzten Jahren hat die Wissenschaft Prognosekonzepte entwickelt, die auf eine gefügeschonende Landbewirtschaftung im Sinne eines vorbeugenden Bodenschutzes abzielen. Heute werden vor allem folgende Konzepte diskutiert:

„**Schadverdichtungsgefährdungsklassen**“ nach PETELKAU et al. (2000), „**Vorbelastung**“ nach HORN et al. (2002) und „**Druckbelastungsquotient**“ nach PAUL (2004). Daneben wurde in einem vom Umweltbundesamt durchgeführten Forschungsvorhaben (LEBERT et al. 2004) ein „**Indikatorenmodell**“ erarbeitet, das die eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung im Sinne des Vollzuges nach §8 BBodSchG durch bodenkundlich geschulte Fachleute ermöglichen soll.

1.2 Zielsetzung

Die gegenwärtige Diskussion im Blick auf Bodenschadverdichtung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen wird kontrovers diskutiert. Auf der einen Seite sieht man in dem Einsatz schwerer Landmaschinen eine Gefährdung der Leistungsfähigkeit der Böden (HORN 1991, SCHRÖDER 2004). Demgegenüber stehen Aussagen, dass selbst landwirtschaftliche Großmaschinen bei Beachtung bestimmter Voraussetzungen ohne nachhaltigen Schaden auf das Bodengefüge eingesetzt werden können (SCHWARK & ISENSEE 2004, SCHWARK 2005). Aus diesen widersprüchlichen Positionen resultieren gegensätzliche Handlungsempfehlungen, die für die Realisierung wirksamer Bodenschutzmaßnahmen kontraproduktiv sind. So führen BRANDHUBER et al. (2001) an, dass die Unterböden durch den Einsatz heute üblicher schwerer Landmaschinen (Fahrzeugmasse=40 t) nicht generell geschädigt werden. Demgegenüber warnt HORN (in DVWK 2002) vor dem Einsatz von Maschinen mit Radlasten über 2-3 t, da ab dieser mechanischen Belastung die Eigenstabilität des Bodens überschritten

und das Bodengefüge irreversibel verformt wird. Die bodenkundliche Grundlagenforschung scheint also augenblicklich von dem landtechnischen Entwicklungsdrang zu größeren, schlagkräftigeren Maschinen überholt zu werden.

Auch über die Anwendung der genannten Modelle zur Abschätzung der potenziellen Verdichtungsgefährdung der Böden herrscht in der Fachwelt noch kein Konsens. Zu komplex ist das Wirkungsgefüge aus Bodenbelastbarkeit und Bodenbelastung. Zwar setzt sich die Bodenkunde schon seit Jahrzehnten mit den Gesetzen der Kontinuumsmechanik, mit der Spannungs- und Verformungstheorie des Bodens auseinander, wir können bis heute jedoch der gesetzlichen Forderung nach Vorsorge,- Prüf- und Maßnahmewerten nicht nachkommen (WEYER 2004). In jüngster Zeit wurde die Thematik immer wieder in verschiedenen Workshops und Arbeitskreissitzungen (z.B. Workshop „Bodenverdichtungen im Gespräch – Gefahrenabwehr und Beurteilungskriterien“, Soest 2004; Arbeitskreissitzung „Bodenschadverdichtung“, Bonn 2005) aufgegriffen und an der Erstellung wissenschaftlich abgesicherter Expertenpositionen gearbeitet, es konnten aber keine *generellen* Aussagen zu den Auswirkungen des Technikeinsatzes auf die Bodengefügeentwicklung abgeleitet werden. Immer noch bleibt die Vorhersage schwer zu treffen, wann auf einer bestimmten Fläche unter den spezifischen Standortbedingungen bei gegebenen Maschinen irreparable Bodenschäden auftreten oder zu erwarten sind. Für den Praktiker oder Berater können demnach keine konkreten Orientierungspunkte zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials technogener Lasteinträge angegeben werden. Auch vor der Anwendung des Indikatorensystems zur bodenschutzrechtlichen Bewertung von Schadverdichtungszuständen sind weitere Wissenslücken zu schließen (LEBERT et al. 2004). Das Problem „Bodenschadverdichtung“ ist wegen der komplexen Systeme „Fahrzeug-Boden“ und „Boden-Pflanze“, in deren Zentrum der Boden mit seinen unterschiedlichen physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften steht, bis heute nicht gelöst (BMVEL 2002).

Das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV), Düsseldorf, hat daher die folgende Forschungsarbeit in Auftrag gegeben, deren Ziel zum einen die Quantifizierung des Bodengefügezustandes landwirtschaftlicher Nutzflächen in NRW unter Anwendung des Indikatorenmodells ist (Status der Bodenverdichtung). Daraus sollen Gefährdungspotenziale heutiger Landbewirtschaftung abgeleitet werden (Abb. 1; Schritt 1). Ein weiteres Ziel besteht in der Entwicklung eines Bewertungsmaßstabes, der auf eine gefügeschonende Landbewirtschaftung abzielt. Dazu sollen die vorliegenden Prognosemodelle zur Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit validiert und verifiziert

werden. Ihre Anwendbarkeit auf nordrhein-westfälische Bodenbedingungen soll geprüft und die Aussagekraft aufgrund einer erweiterten Datenbasis verbessert werden (Abb. 1; Schritt 2). Aus den Erkenntnissen soll schließlich die Druckbelastbarkeit für verschiedene Böden abgeleitet (Abb. 1; Schritt 3) werden, um die bei der Landwirtschaft auf den Boden einwirkenden Lasteinträge (Bodendrucke) hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung zu bewerten (Abb. 1; Schritt 4). Ob die prognostizierte Gefährdungseinschätzung allerdings der tatsächlichen Gefügeentwicklung entspricht und den jetzigen Status der Bodenverdichtung in NRW verändert, kann nur durch langfristige Untersuchungen überprüft werden (Abb.1; schraffierte Pfeile).

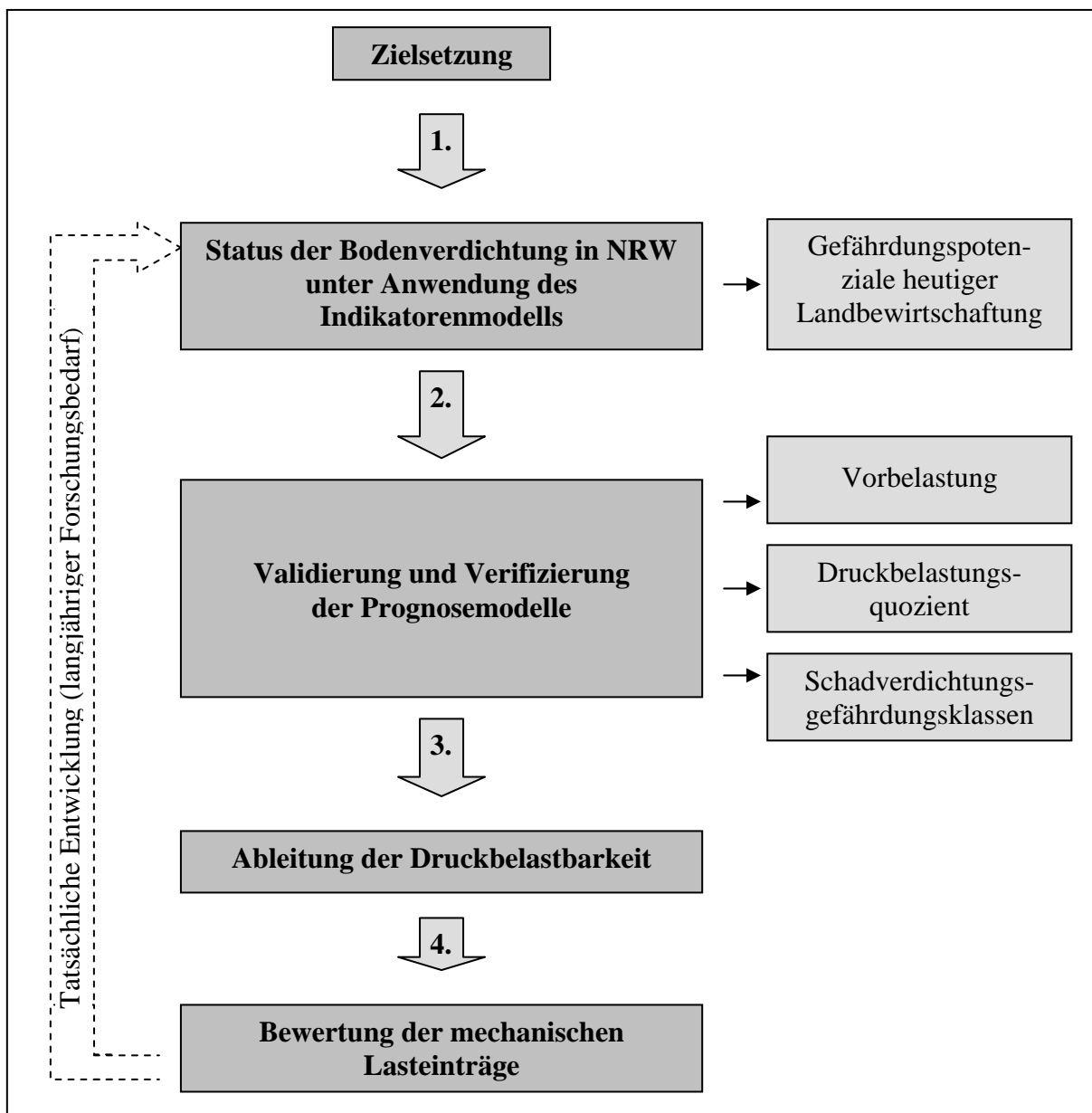


Abb. 1: Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Um der Zielvorgabe gerecht zu werden, wurden bodenphysikalische, -mechanische und -chemische Untersuchungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen unter verschiedenen Standort-, Nutzungs-, Bewirtschaftungs- und Witterungsbedingungen durchgeführt.

Anhand der Zielsetzung lassen sich vier zentrale Versuchsfragen für die vorliegende Arbeit ableiten:

1. Wie präsentiert sich der Bodengefügezustand nordrhein-westfälischer Ackerstandorte außerhalb der stark frequentierten Vorgewende- und Fahrgassenbereiche (Kernproduktionsfläche)?
2. Erlaubt das Indikatorenmodell die eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung im Sinne des Bodenschutzrechtes?
3. Welches der in der Wissenschaft diskutierten Modelle ist für eine praxistaugliche Prognose zur Abschätzung der potenziellen Verdichtungsgefährdung geeignet?
4. Wie kann im Sinne eines vorsorgenden Bodenschutzes die mechanische Belastbarkeit für Böden in NRW abgeschätzt werden, um daraus die bei der Landbewirtschaftung auf den Boden einwirkenden Lasteinträge (Bodendrucke) zu bewerten?

2 Bodenverdichtungen im Gespräch

2.1 Grundlegende Untersuchungen

Zur Thematik „Bodenverdichtung“ finden sich in der Fachliteratur zahlreiche Veröffentlichungen, deren Kernaussagen in umfangreichen Schriften zusammengefasst wurden (u.a. SOANE & VAN OUWERKERK 1994, DÜRR et al. 1995, HORN et al. 2001). Das folgende Kapitel gibt einen Einblick in die Historie der Bodenverdichtung und verdeutlicht den aktuellen Kenntnisstand.

Bereits im Jahre 1921 erkannte GRÖGER, dass bei Benutzung der Motorpflüge durch die nahezu flächendeckende Überrollung des Ackers die durchgeführte Lockerung wieder vollständig zunichte gemacht wurde. MATHY (1940) untersuchte „pflugsohlekranke“ Böden und stellte negative Auswirkungen auf die Luft- und Wasserbewegung in Böden fest. Dennoch wird bis in die 50er Jahre hinein das Problem „Bodenverdichtung“ allgemein als gering eingeschätzt (SÖHNE 1951).

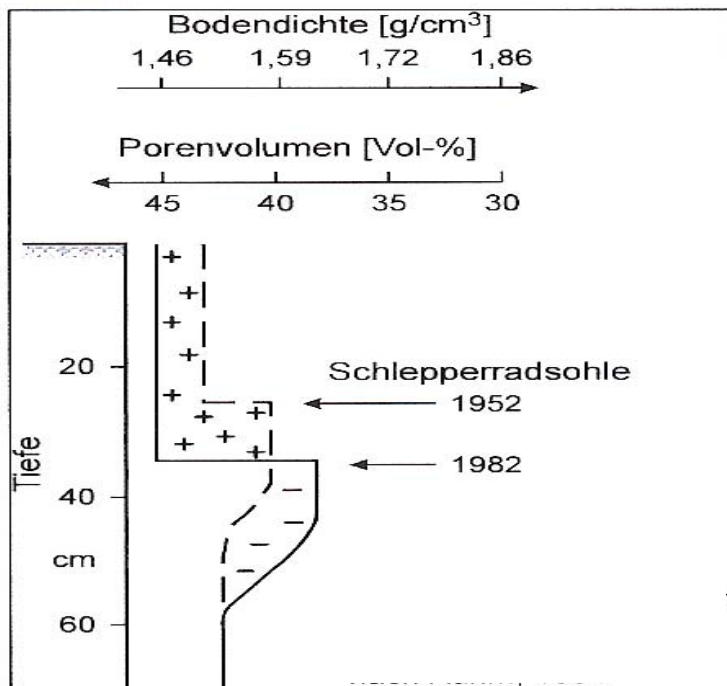
Im Zuge beginnender Mechanisierung und Rationalisierung der Landwirtschaft in den 60er Jahren rückten schädliche Bodenveränderungen mehr und mehr in den Mittelpunkt bodenkundlicher Forschungsarbeiten. Begründet war dies durch die zunehmende Sorge einer irreparablen Bodengefügeschädigung aufgrund stark ansteigender Gesamtmassen landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen. Nach SCHÖN & OLFE (1986) haben sich im Zeitraum von 1950-1986 die Schleppergewichte nahezu verdoppelt. Heutige Erntemaschinen (z.B. Zuckerrübenvollernter) erreichen Gesamtlasten, die bei ausgeschöpften Bunkerkapazitäten die 50 t Marke überschreiten (PROFI 2003).

Die Verwendung leistungsfähiger und schwerer Landmaschinen beschränkt sich nicht mehr vorwiegend auf die in Ostdeutschland und Osteuropa vorherrschenden Großbetriebe, sondern ist im Zuge überbetrieblicher Maschineneinsätze auch in den westlichen Bundesländern zu beobachten. Datenauswertungen haben ergeben, dass bereits im Jahre 1990 die Mitgliederbetriebe von Maschinenringen insgesamt 42 % der landwirtschaftlich genutzten Gesamtfläche Westdeutschlands bewirtschaften (IMA 1991), ein Trend, der sich aufgrund des landwirtschaftlichen Strukturwandels wesentlich verstärkt haben dürfte. So werden nach SCHULZE LAMMERS et al. (2002) bereits in heutiger Zeit auf 70 % der Zuckerrübenanbauflächen Deutschlands schwere sechsreihige Zuckerrübenvollernter eingesetzt.

Bestätigt wird die Sorge um irreparable Bodengefügeschädigungen durch zahlreiche Untersuchungen, die *Verbreitung*, die *Ursachen* und die negativen *Auswirkungen* von Bodenverdichtungen quantifizieren (DÜRR et al. 1995).

In der bodenkundlichen Fachliteratur existiert eine Fülle von Zustandsbeschreibungen verdichtungsgeschädigter Böden in der Bundesrepublik Deutschland, die vornehmlich auf länderspezifischen Untersuchungen beruhen. Eine umfassende Zusammenstellung findet man bei DÜRR et al. (1995). Oftmals aufgeführt werden in diesem Zusammenhang die sogenannten „RUHMSCHEN Untersuchungen“, bei denen RUHM (1983) die Bodendichten an 150 Ackerstandorten in *Niedersachsen* zu Beginn der 80er Jahre ermittelte und diese mit Messungen aus den 50er Jahren verglich (Abb. 2). Er stellte eine Vertiefung der Schlepperradsole um ca. 10 cm und eine erhöhte Dichtlagerung des Bodens um $0,07 \text{ g/cm}^3$ fest. Dies entspricht einer jährlichen Steigerungsrate von $0,002 \text{ g/cm}^3$ (3 %). Den Ergebnissen von SONDERHOFF (1988) zufolge sind stark belastete Marschböden in *Schleswig-Holstein* unter Ackernutzung wesentlich stärker verdichtet als Böden ausgewählter Ödlandflächen. Von Schlepperradsohlen sind besonders sandige Böden betroffen. Bei bindigen Böden reichen nach SONDERHOFF (1988) allerdings die Verdichtungen tiefer. Nach Untersuchungen von HORN et al. (1991), die 37 Standorte in *Bayern* beprobten, weisen ackerbaulich genutzte Böden im Bereich der Krumenbasis (25-30 cm) verfestigte Horizonte als Folge anthropogener Eingriffe in die Bodenstruktur durch Befahrung mit landwirtschaftlichen Maschinen auf. Für *Nordrhein-Westfalen* liegen Schätzungen nach WEYER & BUCHNER (2001) vor, die im Rheinland bis zu 40 % der Ackerflächen als krumenbasisverdichtet einstufen. In *Rheinland-Pfalz* werden nach DÜRR et al. (1995) Bodenverdichtungen nicht als generelles sondern vielmehr als regionenspezifisches Problem (z.B. Gemüseernte auf beregneten Flächen) angesehen. Über den Verdichtungszustand der Böden in den *östlichen Bundesländern* sind nach Untersuchungen der FZB Müncheberg (BÖTTCHER 1986, zit. in DÜRR et al. 1995) umfassende Erkenntnisse gesammelt worden. 40 % des Ackerlandes weisen demnach Krumenbasisverdichtungen auf.

Obwohl die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen vorliegen, fehlt nach LEBERT et al. (2004) bis heute sowohl ein klarer Überblick über den Gefügestand im Bereich der üblich bewirtschafteten Kernproduktionsfläche, noch werden die Beurteilungen standardisierten Kriterien unterworfen.

**Abb. 2:**

Veränderung von Bodendichte und Porenvolumen in Ackerkrume und Unterboden von 1952-1982 auf 144 Standorten in Niedersachsen (nach RUHM 1983, zit. in SOMMER 1985)

In welchem Maße bewirtschaftungsbedingte Gefügeschäden auftreten, hängt von verschiedenen bodenendogenen (inneren) und bodenexogenen (äußeren) Faktoren ab. Unter **bodenendogenen** Faktoren sind alle bodenphysikalischen Kennwerte zu verstehen, die in ihrem Zusammenwirken die Eigenstabilität und somit die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens bestimmen (KÜHNER 1998). Nach HORN (2004) wird die Stabilität des Bodens gegenüber Verdichtungen maßgeblich über die Korngrößenverteilung (Textur), die Lagerungsdichte, die Struktur des Bodens, den Aggregierungsgrad, den Bodenfeuchtezustand sowie den Gehalt an organischer Substanz bestimmt. Maschinenspezifische Parameter, die durch äußere Kräfte in Form von Drücken auf den Boden einwirken, werden als **bodenexogene** Faktoren bezeichnet. Nach SEMMEL & HORN (1995) sind die Radlast, der Reifeninnendruck, die Kontaktfläche und der Kontaktflächendruck sowie die Form der mechanischen Belastung (statisch oder dynamisch) wichtige Einflussfaktoren. Über die Kontaktfläche des Reifens werden Kräfte (Bodendrücke) in den Boden übertragen und verursachen dort einen veränderten Spannungszustand. Dieser bildet als Bodenbelastung das Gefährdungspotenzial für das Bodengefüge. Kann die Tragfähigkeit des Bodens der mechanischen Belastung nicht mehr standhalten, kommt es zu einer Änderung bodenphysikalischer Kennwerte (Bodenreaktion). Eine Bodenbeanspruchung in Form einer Gefügestörung ist die Folge. In Abb. 3 sind die am Prozess einer Bodenverdichtung beteiligten Faktoren und deren Zusammenhänge dargestellt.

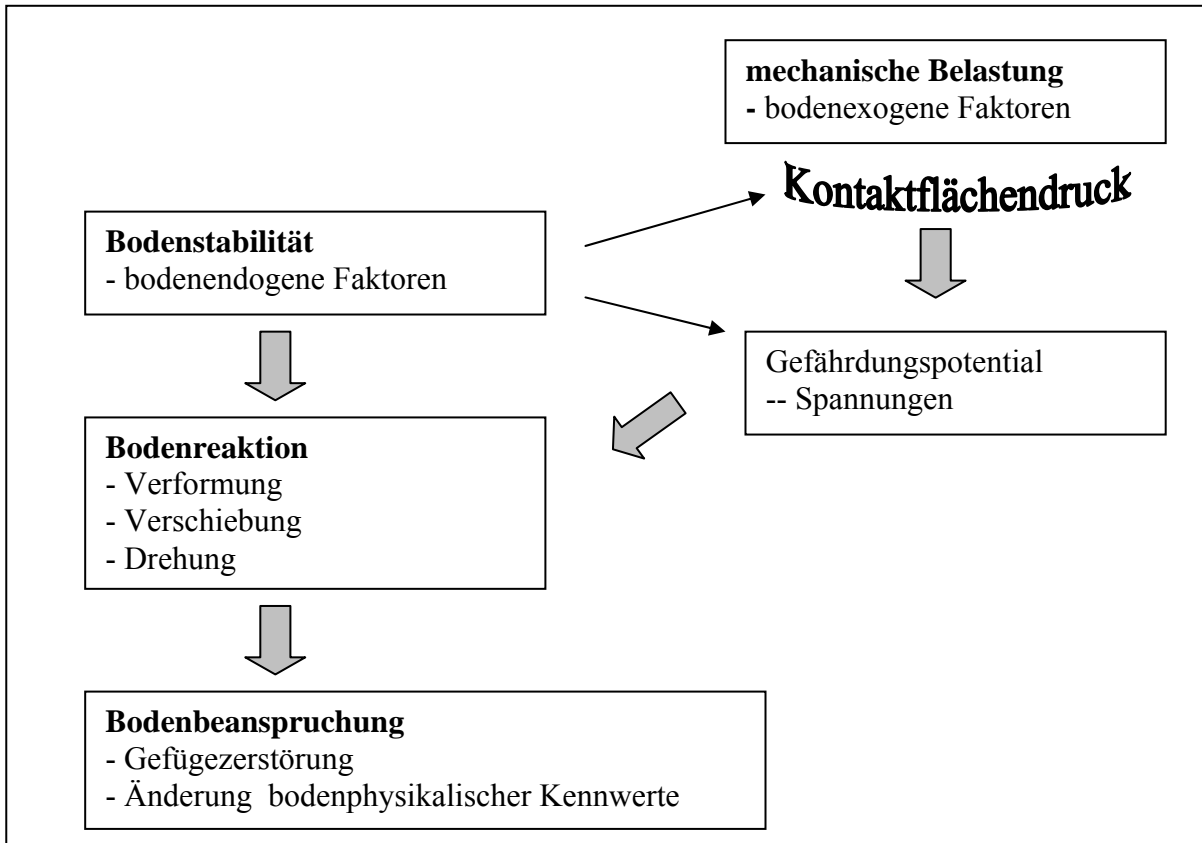


Abb. 3: Kausalkette „Bodenbelastung“ – „Bodenbeanspruchung“ nach KÜHNER (1998)

Die Kausalkette verdeutlicht bereits die Problematik, die sich bei der Ursachenforschung für das Auftreten schädlicher Bodenveränderungen ergibt. Sehr komplex sind die Zusammenhänge, die sich aus dem Wirkungsgefüge „Boden“ und „Bodenbelastung“ ergeben. Selbst nahe beieinander liegende Standorte unterscheiden sich bei gleicher Bodenart in der genauen Korngrößenzusammensetzung. Außerdem sind die Bodentypen und die genaue Abfolge der Bodenhorizonte nicht immer direkt vergleichbar. Differierende Fruchtfolgen und ständig wechselnde Maschinenausstattungen der landwirtschaftlichen Betriebe stellen weitere nur schwerlich zu quantifizierende Einflussfaktoren dar. Zudem wirtschaftet jeder Betriebsleiter mit unterschiedlicher Intensität auf seinen Böden. So bleibt z.B. für einen Betriebsleiter mit hoher Arbeitsauslastung bei „nassen“ Bodenbedingungen u.U. wenig Spielraum zur zeitlichen Verschiebung bestimmter Arbeitsgänge. Dies kann dazu führen, dass sich bei Betrieben mit sonst vergleichbaren Bedingungen (Maschinenpark, Böden...) dennoch langjährig betrachtet Unterschiede im Gefügestand der Ackerflächen ergeben. Diese Einflussvielfalt ist aber kennzeichnende Bedingung der Praxis.

Die räumliche **Druckausbreitung** im Boden wird ebenfalls intensiv untersucht. Dabei kommen vorwiegend hydraulische oder pneumatische Messgeräte zur Anwendung, die mittels schlauch- oder ballonförmiger Gummikörper den in einer bestimmten Bodentiefe herrschenden Bodendruck messtechnisch erfassen (KÖGLER 1933, BLACKWELL 1979, BOLLING 1984). HORN (1980) benutzt hingegen Dehnungsmessstreifen, bei denen die mechanische Größe „Dehnung“ in eine elektrische Größe der „Widerstandsänderung“ umgewandelt wird. Als Ergebnisse solcher Druckmessungen entstehen vielfach die so genannten Druckzwiebeln, die den Verlauf der Linien gleichen Bodendrucks (Isobaren) darstellen (Abb. 4). Aus der Darstellung wird deutlich, dass mit steigenden Radlasten und - aufgrund breiterer Reifen- gleich bleibenden Kontaktflächendrücken das Vordringen der Verdichtungen in größere Bodentiefen anwächst. BOLLING & SÖHNE (1982) stellen heraus, dass steigende Radlasten hauptverantwortlich für das Entstehen schädlicher Unterbodenverdichtungen sind. Demgegenüber kann durch die Wahl breiterer Bereifung der Kontaktflächendruck gesenkt und vor allem der Ackerkrumenbereich vor Verdichtungen geschützt werden. Diese Erkenntnisse sind gerade heute aktueller denn je, da sie wichtige Bausteine im Rahmen verdichtungsvermeidender Vorsorgemodelle sind. Gelingt es nämlich, die Reifenaufstandsfläche progressiv zur Radlast zu erhöhen, so ergibt sich weiterer Spielraum für den Einsatz leistungsstarker Landtechnik.

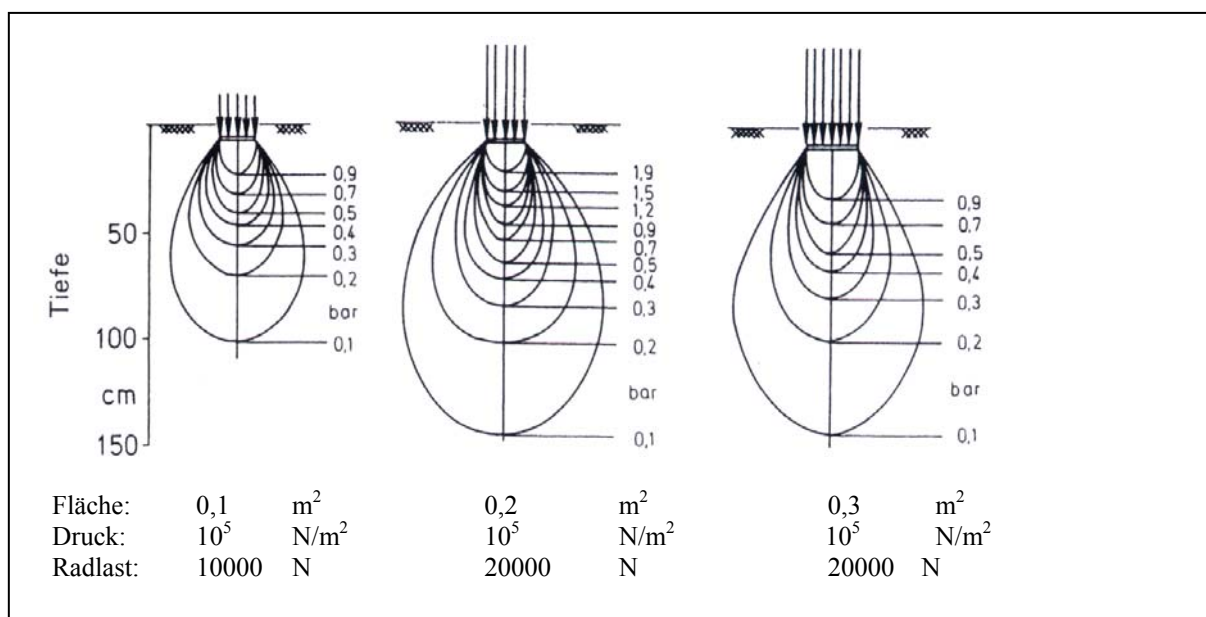


Abb. 4: Druckzwiebel mit Linien gleichen Bodendrucks in drei Fahrspuren (BOLLING & SÖHNE 1982)

Neben der Ursachenforschung wurden auch die negativen Auswirkungen bewirtschaftungsbedingter Bodengefügeschädigungen umfangreich analysiert. Fasst man die Ergebnisse zusammen, so stehen vor allem die Auswirkungen auf den Pflanzenertrag, die Verlagerung und Dynamik von Stoffen und die biologische Aktivität im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Zahlreiche Forschungsergebnisse aus Belastungsversuchen berichten über negative **Ertragsleistungen** bei starken Bodenverdichtungen (z.B. WITTELL & HOBBS 1965, JAGGARD 1984, PETELKAU 1984, SOMMER & ZACH 1986, EHLERS 1992, SOMMER et al. 1995, EHLERS et al. 2000). Die festgestellten Einbußen liegen meist zwischen 10 % und 50 %, sind aber aufgrund der unterschiedlichen nicht zu vergleichenden Versuchsbedingungen sehr variabel. Zudem sind die aktuellen Witterungsbedingungen entscheidend für den Ertrag. Oft werden bei „leichten“ Verdichtungen unter trockenen Bedingungen bessere Erträge und unter nasseren Bedingungen schlechtere Erträge festgestellt. Die durch Degradierung der Bodenstruktur verursachte Modifikation von physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften bedeutet in erster Linie eine Einschränkung der Ertragssicherheit (DEXTER 1988, SOMMER 1998b). Begründen lassen sich Ertragseinbußen durch ein schlechtes Wurzelwachstum. Durch eine Bodengefügeveränderung in Folge einer Bodenverdichtung werden die Porosität und die Porenkontinuität des Bodens verringert, was wiederum einen schlechten Wasser- und Lufthaushalt nach sich zieht. Boden- und Wurzelatmung sind gestört (DÜRR et al. 1995). Daneben führen hohe Bodenwiderstände zu einer dickeren Pflanzenhauptwurzel. Die Verzweigungsneigung nimmt ab und die Wurzeln werden gröber. Infolgedessen verringert sich das Austauschpotenzial mit dem Boden (DÜRR et al. 1995).

Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass Bodenverdichtungen einen negativen Einfluss auf die **Verlagerung** und **Dynamik** von Stoffen im Boden haben. Zwar werden durch Bodenverdichtungen die Bodenpartikel näher zusammengelagert, so dass ein passiver Nährstofftransport durch Diffusion erleichtert wird, jedoch schränkt ein vermindertes Wurzelwachstum die Wasser- und Nährstoffaufnahme ein. Nährstoffverluste durch Auswaschung und Denitrifikation sind die Folge (DÜRR et al. 1995). HELAL et al. (1994) weisen in Gefäßversuchen nach, dass Sommergerste aus verdichtetem Boden 31 % weniger Stickstoff, 26 % weniger Phosphor und 24 % weniger Kalium entzieht und die Kornerträge demzufolge 15 % niedriger sind. Geringe Wasserinfiltrationsraten können eine schnelle oberflächennahe Ableitung des Niederschlagswassers bedingen und sind somit an der Bildung von Hochwasser beteiligt (DYCK & PESCHKE, 1995). VAN DER PLOEG et al. (2001) vermuten, dass die

Rheinhochwasser mit der verstärkten Bodendegradierung intensiv landwirtschaftlich genutzter Flächen zusammenhängen. FRIEDRICH & FRANKEN (2003) kommen in ihren Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass Krumenbasisverdichtungen einen erhöhten Zwischenschichtabfluss bedingen. Daneben sind in anthropogen bedingten Bodenverdichtungen die Hauptgründe für Erosionsprozesse zu suchen (FRIELINGHAUS et al. 1992). Insbesondere im Bereich verdichteter Fahrgassen ist auf hängigen Flächen die Gefährdung des Bodenabtrages durch Wasser besonders hoch (BMVEL 2002).

Eine weitere negative Auswirkung von Bodenverdichtungen ist die Hemmung der *biologischen Aktivität*. Aufgrund anaerober Verhältnisse werden Zersetzungs-, Ab- und Umbauprozesse eingeschränkt. (DÜRR et al. 1995). KAISER (1992) stellte fest, dass durch Bodenverdichtungen der Gehalt an mikrobieller Biomasse verringert und die Nutzungseffektivität der organischen Masse im Boden durch Mikroorganismen eingeschränkt wird.

Generell wird in der Literatur zwischen kurz-, mittel- und langfristigen Auswirkungen von Bodenstrukturdegradierungen unterschieden (ARVIDSSON & HAKANSSON 1996). Im Bereich des Unterbodens gelten Bodenverdichtungen als langfristig persistent. Das natürliche Potenzial zur Regeneration verdichtungsgeschädigter Bodenstrukturen hat sich in diesen Bodentiefen als nicht ausreichend erwiesen (HAKANSSON et al. 1987, DÜRR et al. 1995). Demgegenüber werden vor allem im Oberboden regenerative Prozesse wirksam. So haben SARMAH et al. (1996) für einen tonhaltigen Boden gezeigt, dass Quellung und Schrumpfung grundsätzlich eine Bodenverdichtung beseitigen können, die Wirkung aber mit zunehmender Bodentiefe abnimmt.

Zusammenfassendes Schriftgut, das über die Auswirkungen von Bodenverdichtungen berichtet, findet man u.a. bei KTBL (1986), LARSON et al. (1989), SOANE & VAN OUWERKERK (1994), KTBL (1995), HORN et al. (2000).

Zur *Beurteilung* schädlicher Bodenveränderungen bedient man sich zahlreicher physikalischer Bodenparameter. Deren Definition und Analytik reicht teilweise Jahrzehnte zurück, sie haben aber berechtigterweise immer noch ihren Platz bei Untersuchungen zur Gefügebeurteilung. Die Spatendiagnose nach GÖBRING (1947) kommt heute nach einem modifizierten Verfahren von DIEZ & WEIGELT (1997) bzw. BESTE (2003) zur Anwendung. Ergänzt wird diese Freilanduntersuchung durch die Parameter der „Packungsdichte“, der „Effektiven Lagerungsdichte“ und der „Strukturmerkmalskombinationen“, wobei Gefügeformen und Durchwurzelung wichtige Beurteilungskriterien darstellen. Da solche Methoden teilweise immer eine Restsubjektivität des Betrachters bedingen, werden

zusätzlich ungestörte Bodenproben (Stechzylinder) zur Erhebung weiterer Kenndaten entnommen. Diese zu bestimmen, erfordert einen hohen messtechnischen Aufwand. Zu nennen ist die Ermittlung der Porengrößenverteilung nach dem Verfahren der Über- bzw. Unterdruckmethode (RUSSEL & RICHARDS 1938). Eine durch Bodenverdichtung bedingte Porenumverteilung wurde in vielen Untersuchungen festgestellt (u.a. DUMBECK & HARRACH 1985). Daneben kennzeichnen sich Verdichtungen durch eine Abnahme der Wasser- und Luftleitfähigkeit (DAWIDOWSKI & KOOLEN 1987). KMOCH (1962) und GÄTKE (1989) entwickelten Geräte zur schnellen Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft, die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit ist mit dem Haubenpermeameter nach HARTGE (1966) oder mit der Bohrloch-Methode für in-situ-Messungen nach EGGELSMANN (1981) möglich. Ein Bestandteil nahezu jeder bodenphysikalischer Untersuchung ist aufgrund ihrer Einfachheit die gravimetrische Bestimmung der Lagerungsdichte. Auch die Messung des Eindringwiderstandes ist seit über 100 Jahren fester Bestandteil bodenkundlicher Untersuchungen. Schon 1893 versuchte PFEFFER den mechanischen Eindringwiderstand mit Hilfe von Pflanzenkeimlingen und Röhrchen direkt zu messen. 1971 wurde von der Landtechnik Weihenstephan das so genannte Penetrometer entwickelt. Heute verfügen viele Praktiker über Bodensonden, die eine einfache Beurteilung der Bodenfestigkeit erlauben. In Methodenbüchern sind die Vorgehensweisen zur Bestimmung der einzelnen Parameter ausführlich beschrieben (HARTGE & HORN 1992, SCHLICHTING et al. 1995).

Trotz der Vielzahl an Untersuchungen stellt sich bis heute die Frage nach einer allgemein gültigen Definition der **Boden(schad)verdichtung**. SOMMER (1972, zit. in VORDERBRÜGGE 2004) beschreibt bereits in den 70er Jahren eine schädliche Verdichtung, definiert diese aber nicht eindeutig. Erst seit Mitte der 90er Jahre wird der Begriff „Bodenschadverdichtung“ in zahlreichen Publikationen verwendet und verschiedene Definitionen abgeleitet (VORDERBRÜGGE 2004). Sie reichen von „Strukturschäden von land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden, die zu einer spürbaren Einschränkung wichtiger Bodenfunktionen in Folge zu hoher Dichtlagerung der festen Bodenteilchen bzw. einer unzulässigen Minderung des Porenraums führen“ (PETELKAU & ROGASIK 1994, zit. in VORDERBRÜGGE 2004) bis zu „Bodenverdichtungen, deren Gefügeveränderung negative Auswirkungen auf Bodenfunktionen hat“ (BMVEL 2002, SOMMER et al. 2002). Auch wenn wir nach WEYER (2004) „einen ganzen Strauß bodenphysikalischer Kennwerte haben, die die Aggregation und die räumliche Anordnung der Bodenteilchen kennzeichnen“, so fehlt es immer noch an bundesweit einheitlichen Indikatoren zur Bewertung eines

Bodengefügeschadens. Zu komplex ist das Wirkungsgefüge zwischen Boden und Pflanze bzw. zwischen Boden und weiteren Umweltkompartimenten (VORDERBRÜGGE 2004). Versuche zur Beschreibung eines optimalen Lagerungsdichtebereiches (PETELKAU et al. 2000), einer minimal nötigen Luftmenge im Boden (CZERATZKI 1972, LÜTKE ENTRUP & OEHMICHEN 2000) oder maximal tolerierbaren Eindringwiderständen (EHLERS 1983, DEXTER 1986, KRAHMER 1997) sind bis heute immer noch kontrovers diskutiert. So definieren PETELKAU et al. (2000) Bodenschadverdichtung als eine Zunahme der Lagerungsdichte. Nach HORN (2002) hingegen kann eine durch Scherung oder Knetung hervorgerufene Umorientierung der Bodenpartikel bei gleich bleibender Lagerungsdichte (=Gesamtporenvolumen) ebenfalls eine Einschränkung der Bodenfunktionen nach sich ziehen.

Mit Verabschiedung der Bodenschutzkonzeption im Jahre 1985 (BUNDESMINISTER DES INNERN 1985) wurde zunächst besonders die stoffliche Belastung des Bodens in den Vordergrund des Bodenschutzes gestellt. Erst mit Inkrafttreten des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998) wurde das Bodengefüge stärker berücksichtigt. Dabei ist insbesondere die *Vermeidung* schädlicher Bodenveränderungen rechtlich geregelt. Nach §17 Abs. 1 und 2 BBodSchG werden insbesondere Bodenverdichtungen erwähnt, die durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks so weit wie möglich zu vermeiden sind.

Daher wurden zeitgleich von SOMMER (1998b) Maßnahmen der guten fachlichen Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen aufgestellt. Dieses aus Literaturanalysen zusammengestellte Konzept ist aus vier Bausteinen aufgebaut (Abb. 5), die dem Landwirt bzw. Berater Handlungsempfehlungen zur betriebs-, standort- und teilflächenspezifischen Anwendung aufzeigen. SOMMER (1998b) sieht neben der Verbesserung der mechanischen Belastbarkeit und Nutzung technischer Möglichkeiten die Anpassung von Arbeitsverfahren sowie die Begrenzung mechanischer Belastungen als Lösungsansätze zur Vermeidung schädlicher Bodenveränderungen. Da die Vorsorge nach wie vor im Mittelpunkt der aktuellen Diskussion steht, sollen die einzelnen Bausteine im Folgenden näher erläutert werden.

Durch die Veränderung bodenendogener Faktoren können Böden stabilisiert, ihre Tragfähigkeit erhöht und somit die *mechanische Belastbarkeit* verbessert werden. Dies wird z.B. durch die regelmäßige Zufuhr organischer Substanz erreicht. Dadurch wird die Mikroorganismenaktivität gefördert, so dass die beim mikrobiellen Abbau entstehenden Humin-

stoffe durch ihre verklebende Wirkung zu einem stabileren Bodengefüge beitragen. Die Erhöhung der Aggregatstabilität führt folglich zu einer Abnahme der Verdichtungsempfindlichkeit (OADES 1984). Die durch ausreichende Zufuhr organischer Dünger (z.B. Kompost, Stroh, Stalldung) verbesserte mechanische Belastbarkeit von Böden wurde in zahlreichen Versuchen bestätigt (u.a. PETELKAU & SEIDEL 1981, BOHNE 1991). Daneben kann Kalk die Gefügestabilisierung positiv beeinflussen. Die Wirkung beruht zum einen in der Flockung der Bodenkolloide sowie zum anderen in der Verkittung der Bodensubstanzen durch Calciumcarbonat (BOGUSLAWSKI 1981). Eine optimale Kalkversorgung der Böden kann jedoch nach WEYER & BUCHNER (1998) nur unter genauer Kenntnis von Bodenart und pH-Wert sichergestellt werden. Nach SOMMER (1998b) leistet die konservierende Bodenbearbeitung einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Befahrbarkeit. Ziel ist es, durch die Reduzierung der Primärbodenbearbeitung, verbunden mit nicht wendender Bodenbearbeitung ein stabileres tragfähigeres Bodengefüge zu schaffen. Durch Verwendung von Lockerungswerkzeugen, wie z.B. Schichtgrubber, werden Bodentiere geschont und ein Wechsel der Festigkeits- und Leiteigenschaften des Bodens zwischen Krume und Krumbasis vermieden (PETELKAU 1998). Erfolgt der Einsatz dann nicht zu jeder Frucht sondern nach Häufigkeit und Tiefe fruchtfolgespezifisch, so kann eine ausreichende Bodenstabilität erreicht werden (DÜRR et al. 1995). Die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf die mechanische Belastbarkeit wurden u.a. von HORN (1986) und STAHL et al. (2002) untersucht. Sie stellten stabilere Eigenschaften minimal bearbeiteter Böden fest.

Neben der Verbesserung der mechanischen Belastbarkeit sieht SOMMER (1998b) die zunehmenden Radlasten als eigentlichen kritischen Punkt in der pflanzlichen Produktion. Einer *mechanischen Belastung* sind nach SOMMER (1998b) im Falle verdichtungsempfindlicher Bodenzustände Grenzen zu setzen. Gerade im Bereich des Unterbodens können immer weiter steigende Lasten zu Bodenschadverdichtungen führen. Eine breitere Bereifung hilft dann nur noch, wenn nicht gleichzeitig die Radlasten erhöht werden. Bei einer Neuanschaffung sollte man auf in Leichtbauweise hergestellte Geräte zurückgreifen oder bereits vorhandene, leichtere Schlepper verstärkt einsetzen. Die nicht volle Ausschöpfung der Bunkerkapazitäten bei Erntefahrzeugen und die Vermeidung aufgesattelter Geräte reduzieren ebenfalls die Radlasten (KÜHNER 1998).

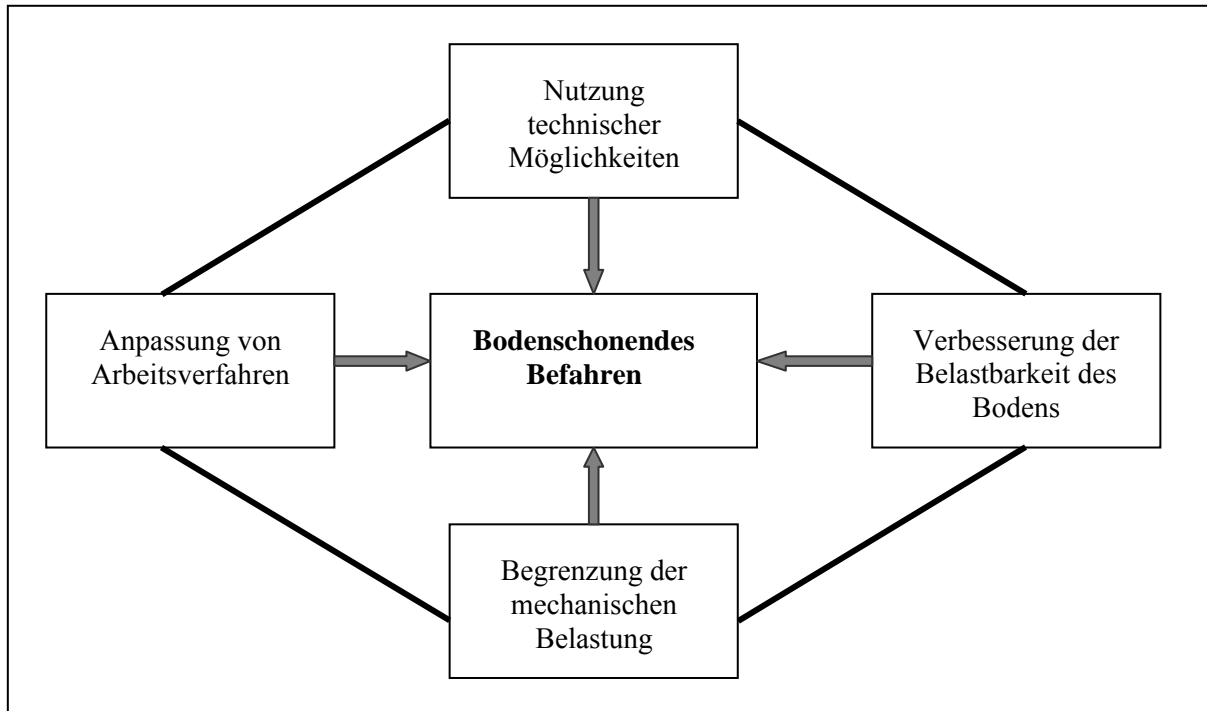


Abb. 5: Die vier Bausteine des Konzepts für bodenschonendes Befahren (SOMMER 1998b)

Eng verknüpft mit der mechanischen Belastung ist die *Nutzung technischer Möglichkeiten*. Die Begrenzung des Kontaktflächendrucks ist eine sinnvolle Maßnahme zur Schonung des Oberbodengefüges. Dies kann durch breitere Bereifung in Zusammenhang mit einem möglichst geringen Reifeninnendruck erfolgen. Automatische weiterentwickelte Reifeninnendruckregelanlagen leisten nicht nur einen Beitrag zum vorsorgenden Bodenschutz, mit ihnen lässt sich Kraftstoff sparen und die Zugkraft deutlich erhöhen (VOLK 2004). Durch entsprechende Bereifung (ISENSEE & SONDERHOFF 1985) oder allradangetriebene Schlepper (RÜHLING 1992) wird der Schlupf reduziert und das Oberbodengefüge durch die Begrenzung dynamischer Effekte geschont.

Eine weitere Strategie sieht SOMMER (1998b) in der *Anpassung von Arbeitsverfahren*. Durch das Zusammenlegen von Arbeitsgängen können die Überrollhäufigkeiten deutlich gesenkt und Bodenschadverdichtungen vermieden werden (KÜHNER 1998). ESTLER (1995) beschreibt, dass durch das Kombinieren von Geräten (z.B. Kreiselegge und Einzelkornsäuger) die befahrene Fläche je ha deutlich verringert wird. Besonders bei der konservierenden Bodenbearbeitung können Grundbodenbearbeitung, Saatbeetbereitung und Aussaat in einem Arbeitsgang durchgeführt werden (SOMMER 1998b). Auch der Zeitpunkt der Bodenbearbeitung schützt vor Bodenschadverdichtungen. Auf späträumenden Flächen scheint es durchaus sinnvoll, auf eine späte Einsaat von Winterweizen zu verzichten und stattdessen

auf eine Sommerung zurückzugreifen (WEYER & BUCHNER 1998). Durch das Fahren außerhalb der Furche beim Pflügen (Onland-Pflügen) können Krumenbasis- und Unterbodenverdichtungen vermieden werden. Allerdings ist dann eine Lenkhilfe erforderlich (BMVEL 2002).

2.2 Modellhafte Erfassung

Die Sorge um das Eintreten irreversibler Bodenschadverdichtungen führte seit Ende der 70er Jahre verstärkt zur Entwicklung mathematischer Modelle, die die Änderungen von Bodeneigenschaften infolge definierter mechanischer Belastungen zu simulieren versuchten. Dadurch sollten aufwendige Messungen eingeschränkt, Gefährdungspotenziale analysiert und mittel- bzw. langfristig ein Beitrag zum vorsorgenden Bodenschutz geleistet werden.

In der Literatur wird nach SOANE (1983) zwischen empirischen, halbtheoretischen und bodenmechanischen Modellen unterschieden. *Empirische* und *halbtheoretische* Modelle beruhen in der Regel auf Spannungsberechnungen bei statischen Bodenbelastungen unter kreisförmigen Flächen in Form von so genannten Druckzwiebeln (vgl. Abb. 4). Aufbauend auf die Theorien von BOUSSINESQ (1885, zit. in FUCHS 1974), der die Spannungsverteilung im elastischen isotropen Halbraum ermittelte, wurde die Druckausbreitung mit Hilfe von bodenart- und bodenzustandsabhängigen Konzentrationsfaktoren nach FRÖHLICH (1934) bzw. SÖHNE (1953) berechnet. Uniaxiale Kompressionsversuche oder Triaxialtests simulieren dabei das Spannungs-Verformungsverhalten der Böden. Grundlage für *bodenmechanische* Modelle bilden die Methoden der Dimensionsanalyse und der Kontinuumsmechanik (DÜRR et al. 1995). Danach wird das Verdichtungsverhalten auf Grundlage der Verknüpfung von bodenmechanischen Prinzipien mit mathematischer Analytik beschrieben. Sie erfordern einen hohen experimentellen Aufwand. Einen umfassenden Überblick über die vorhandenen Modellansätze findet man in DÜRR et al. (1995).

Nach HORN (2004) ist Ziel jeder für die Fragestellung relevanten empirischen, halbtheoretischen oder mechanischen Modellierung die quantitative Abschätzung von Zusammenhängen zwischen entsprechenden Bodenkennwerten und der Bodenstabilität als Maß für die nicht zusätzlich verformungswirksame Bodenbelastbarkeit von Standorten. Aufbauend auf die zugrunde liegende Bodenbelastbarkeit wird diese mit der Bodenbelastung verknüpft. Konzepte, die die beiden Kriterien in ausreichendem Maße berücksichtigen sind die Modelle „*Schadverdichtungsgefährdungsklassen*“ nach PETELKAU et al. (2000), „*Vorbelastung*“

nach HORN et al. (2002) und „*Druckbelastungsquotient*“ nach PAUL (1999). Das erst genannte Verfahren unterscheidet sich von den anderen beiden im Wesentlichen durch die Art der Belastung, die verwendeten Bodenproben sowie die zugrunde liegenden Parameter. Alle drei Modelle werden in heutiger Zeit verstärkt wissenschaftlich diskutiert. Zusätzlich wurden von LEBERT et al. (2004) Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung abgeleitet, die die zweifelsfreie Identifikation einer Bodenschadverdichtung im Sinne eines bodenschutzrechtlichen Vollzugssystems erlauben sollen. Diese sind unter dem Begriff „*Indikatorenmodell*“ zusammengefasst und aufgrund der Aktualität ebenfalls Gegenstand der nachfolgenden Modellbeschreibungen.

Schadverdichtungsgefährdungsklassen (SVGK)

Das Modell *SVGK* geht auf Arbeiten von PETELKAU et al. (2000) zurück, die für die Böden des Landes Brandenburg die potentielle Verdichtungsgefährdung anhand substratspezifischer Bereiche der optimalen Lagerungsdichte ableiten. Prinzip des Modells ist es, den durch landwirtschaftliche Maschinen verursachten Bodendruck soweit zu begrenzen, dass keine bleibende oder nachhaltige Verformung des Bodens im Wurzelraum hervorgerufen wird, die über pflanzenökologisch tolerierbare Grenzen hinausgeht. PETELKAU et al. (2000) leiten Begrenzungen der mechanischen Bodenbelastung bzw. Richtwerte für den zulässigen Bodendruck von Maschinen aus den verdichtungsbedingt zu erwartenden Ertragsausfällen her. Eine Schadverdichtung wird also indirekt durch die Überschreitung eines Lagerungsdichtegrenzwertes gekennzeichnet.

Im Bereich der optimalen Lagerungsdichte ermöglichen die für das Pflanzenwachstum wichtigen Bodenparameter (Luft- und Wasserleitfähigkeit, Makroporen, Durchwurzelung) höchste Pflanzenerträge. Die entsprechenden Lagerungsdichtegrenzwerte wurden für den Bereich der Krume und der Krumenbasis unterschiedlich bestimmt. Für die Krume erfolgte dies anhand gefügeabhängiger Ertragskurven, wobei sich die Grenzwerte unter Berücksichtigung der Kenndaten von Humusgehalt und Körnung berechnen lassen. Für den Bereich der Krumenbasis wurden die Werte aus Kompressionstests an gesiebttem Bodenmaterial abgeleitet, wobei eine Luftleitfähigkeit von 1 cm/s nach dem Verfahren von GÄTKE (1989) als erforderlicher Mindestwert angenommen wurde.

Aus dem vorhandenen Datenmaterial konnten Regressionsgleichungen zur Ermittlung der Lagerungsdichtegrenzwerte ermittelt werden:

$$\text{Krume} \quad y = 1,4772 - 0,0037168 x_1 + 0,000026574 x_1^2 + 0,0022037 x_2 - 0,000037645 x_2^2 + 0,028195 x_3 - 0,0082145 x_3^2$$

$$\text{Krumenbasis} \quad y = 1,6723 - 0,0043661 x_1 - 0,00056209 x_2, \quad \text{wobei}$$

y = Lagerungsdichtegrenzwert, x_1 = Tongehalt in %, x_2 = Schluffgehalt in % und x_3 = Gehalt an organischer Bodensubstanz in % sind.

In Abb. 6 sind solche oberen Grenzwerte von Ap-Horizonten in Abhängigkeit von der Bodenart, hier ausgedrückt im Tongehalt, bei optimaler Humusversorgung angegeben.

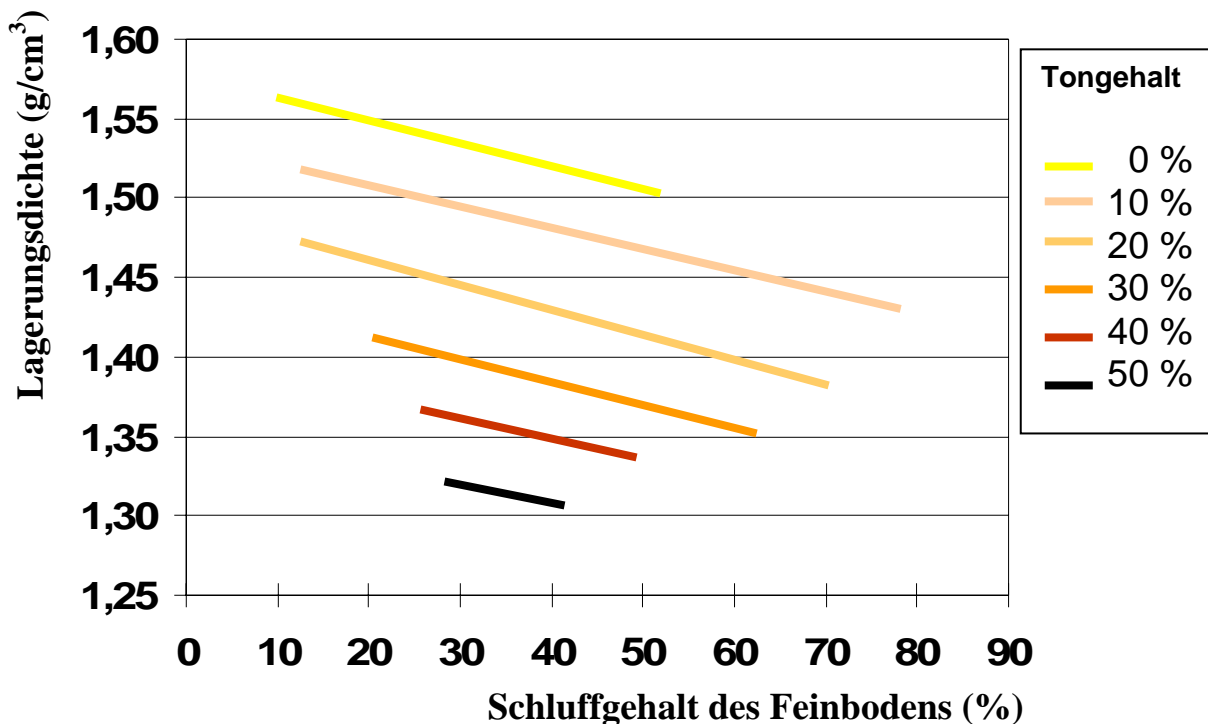


Abb. 6: Obere Grenzwerte des optimalen Lagerungsdichtebereiches von Ap-Horizonten in Abhängigkeit von der Bodenart nach PETELKAU et al. (2000)

Bei Überschreitung der Lagerungsdichte um $0,05 \text{ g/cm}^3$ über den oberen Grenzwert des substratspezifischen optimalen Lagerungsdichtebereiches werden die Böden als „mäßig schadverdichtet“ (SVB 1), bei $0,10 \text{ g/cm}^3$ als „erheblich schadverdichtet“ (SVB 2) bzw. bei $0,20 \text{ g/cm}^3$ als „sehr stark schadverdichtet“ (SVB 3) eingestuft. Die Stufen des ökologischen Verdichtungsgrades leiten PETELKAU et al. (2000) aus Ertragskurven her, die an einer Vielzahl von Feld- und Laborversuchen unter definierten Bedingungen ermittelt wurden. In Abb. 7 sind diese pflanzenabhängigen ökologischen Schadverdichtungsgebiete dargestellt.

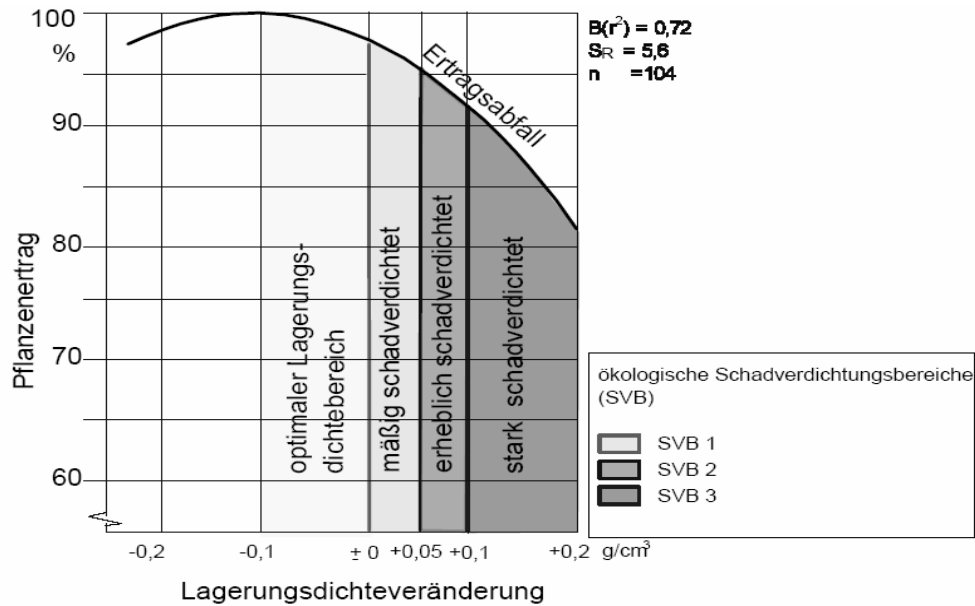


Abb. 7: Pflanzenabhängige ökologische Schadverdichtungsbereiche (PETELKAU et al. 2000)

Abweichend von der baugrundmechanischen Methodik der ödometrischen Langzeit-Druck-Setzungs-Versuche wurde in speziellen Kompressions- und Schertests das Spannungs-Verformungsverhalten von Ackerböden differenzierter Korngrößenzusammensetzung bei unterschiedlichen Bodenfeuchten ermittelt (PETELKAU 1984). Durch stufenweise ansteigende Stempeldruck-Momentbelastungen mit Drücken zwischen 50 und 500 kPa und dem Vergleich der erzielten Lagerungsdichten mit den ökologischen Schadverdichtungsbereichen (vgl. Abb. 7) konnten zulässige Belastbarkeitskennwerte ausgewiesen werden. Abb. 8 zeigt exemplarisch eine Druck-Verdichtungskurve in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte für einen stark lehmigen Sand (SI3). Die farblich markierten Querlinien geben die Lagerungsdichtegrenzwerte für jeden Schadverdichtungsbereich an. Im Oberboden wird eine Überschreitung des Lagerungsdichtegrenzwertes bis in den SVB 2 hinein toleriert, da solche Verdichtungen generell durch Bodenbearbeitung wieder zu beheben sind. Im Unterboden hingegen wird eine Überschreitung des Grenzwertes nicht akzeptiert, da hier nach PETELKAU et al. (2000) innere und äußere Einflüsse auf die Strukturdynamik (Quellen und Schrumpfen, Frieren und Tauen, biogene Aktivitäten, Bodenbearbeitungsmaßnahmen) zur Beseitigung technogener Schadverdichtungen nicht ausreichen. Mit diesen für zahlreiche Böden durchgeführten Kompressions-Schertests konnten die einzelnen Bodenarten in SVGK zusammengefasst werden. Die Einteilung der Böden des Landes Brandenburg erfolgte aufgrund der technologischen Vergleichstufen nach THIÈRE et al. (1991), wobei eine

Abgleichung entsprechend der Bodenarten nach der KA5 (AG BODEN 2005) möglich ist (Abb. 9).

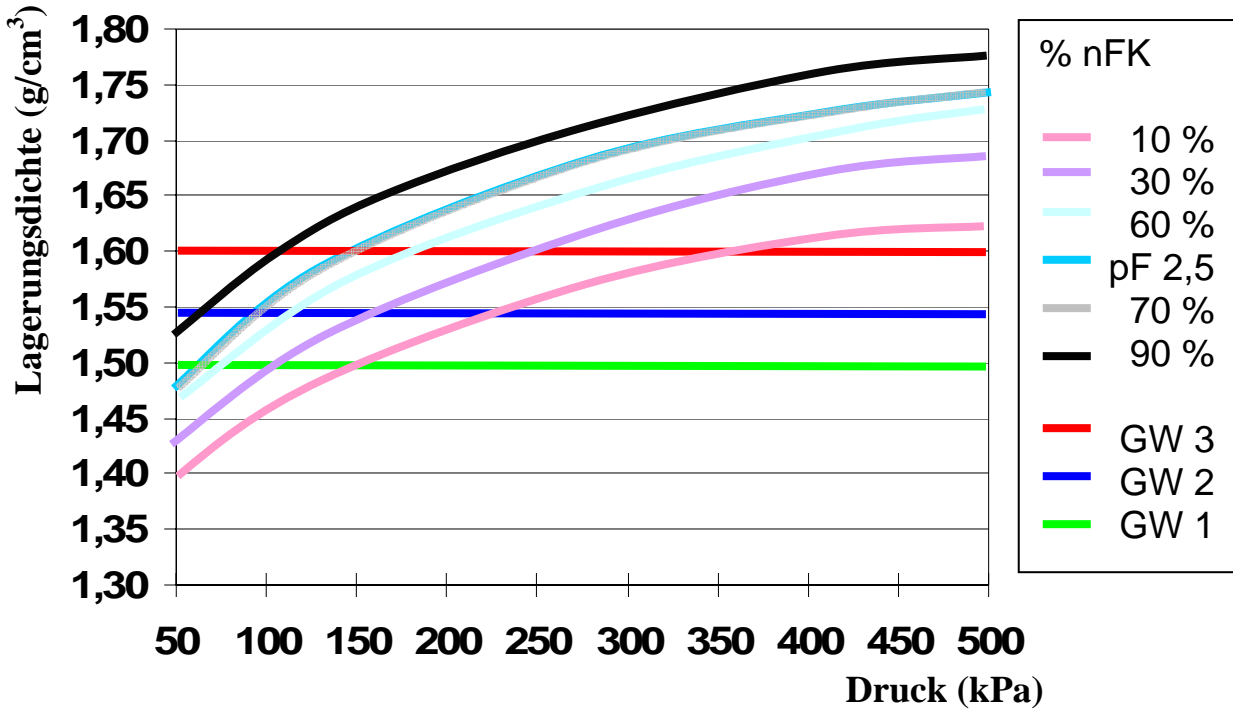


Abb. 8: Druck-Verdichtungskurve in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (% nFK) für die Bodenart SI3 nach PETELKAU et al. (2000)

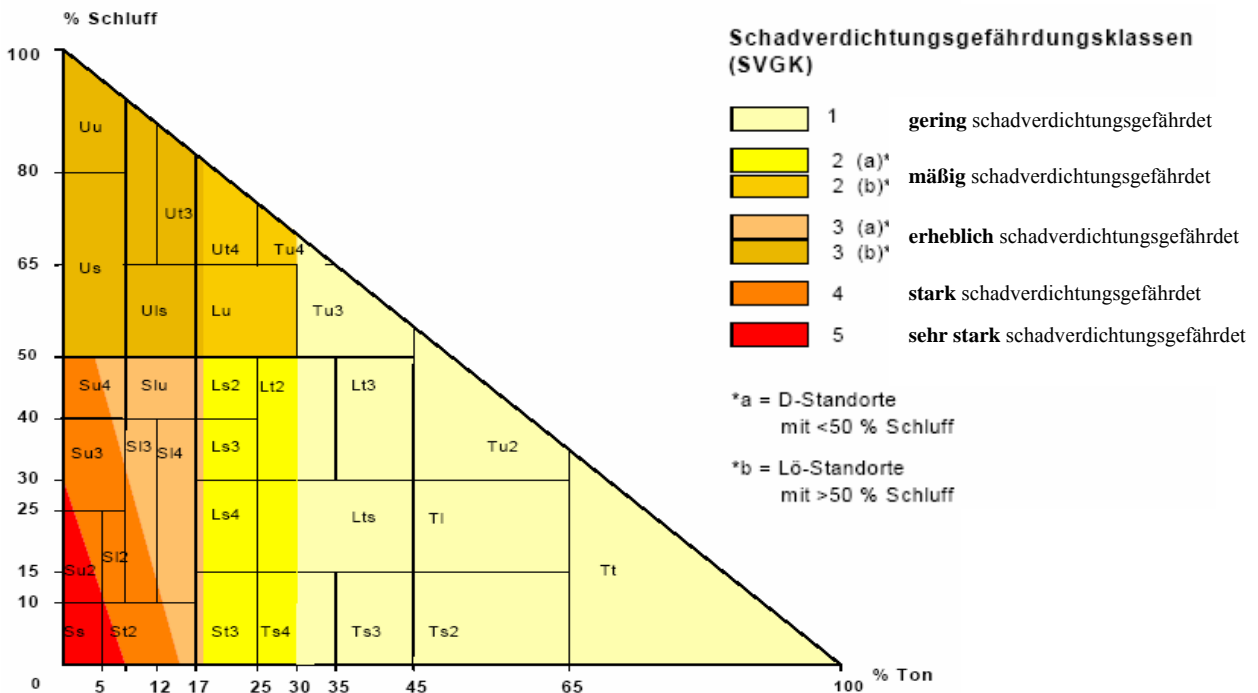


Abb. 9: Texturabhängige Schadverdichtungsklassen für Böden basierend auf der KA5 (PETELKAU et al. 2000)

Im Zusammenhang mit der Bewertung technogener Belastungen wird jeder SVGK eine obere Belastbarkeitsgrenze zugeteilt. Wird diese eingehalten, ist mit keiner schädlichen Überschreitung der Lagerungsdichte zu rechnen. Daneben wird eine maximal zulässige Belastbarkeit angegeben. In diesen Fällen können die in der Ackerkrume auftretenden Verdichtungen beseitigt werden. Schädliche Bodengefügeveränderungen in der Krumbasis sind dann nicht zu erwarten (Abb. 10). Zur Berechnung der Druckfortpflanzung bedienen sich PETELKAU et al. (2000) der Gleichung nach NEWMARK (1942). Danach kann der Bodendruck aus beliebigen Kombinationen von Radlast, Reifenbreite, Kontaktfläche und Kontaktflächendruck in einer zu bewertenden Bodentiefe ermittelt werden. Außerdem berücksichtigen PETELKAU et al. (2000) die Auswirkungen der Überrollhäufigkeit, indem sie die im Verdichtungsprozess bei wiederholter Momentbelastung wirksam gewordenen Drücke schätzen.

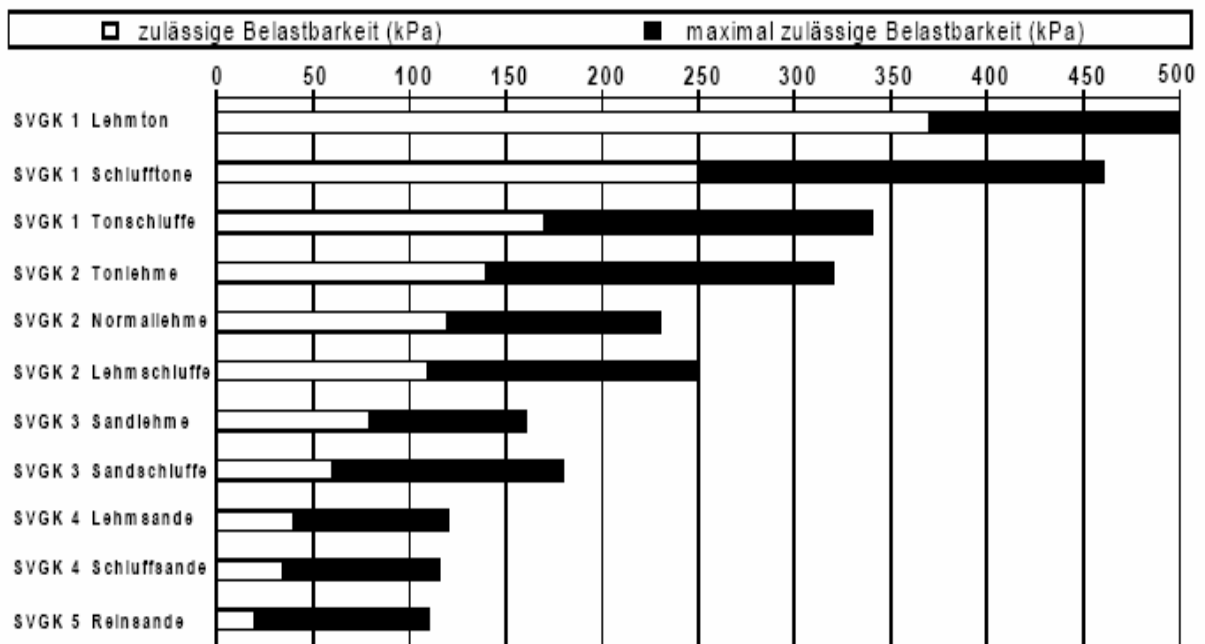


Abb. 10: Maximal zulässige Belastbarkeit bei einer Bodenfeuchte von 70 % nFK der Bodenartengruppen in den SVGK 1 bis 5 (PETELKAU et al. 2000)

Vorbelastung

Dieser Ansatz basiert auf der Tatsache, dass Böden über horizontspezifische Stabilitäten verfügen. Bei mechanischer Belastung bis zu einem bestimmten Wert, dem Wert der Vorbelastung, treten keine weiteren bleibenden (plastischen) Veränderungen ein, so dass die

Porendichte und die Porenfunktionen erhalten bleiben (HORN et al. 2002). Lasteinträge durch landwirtschaftliche Maschinen sollen nach diesem Ansatz so beschränkt werden, dass die Eigenstabilität des Bodens nicht überschritten wird, d.h. dass der aktuelle Zustand des Bodengefüges erhalten bleibt und weitere Verdichtungen nicht zugelassen werden.

Der Wert der Vorbelastung definiert eine mechanisch quantifizierbare Festigkeit, die durch physikalische (z.B. Eisdruck, Wurzelwachstum), biologische (z.B. Ton-Humuskomplexierung), chemische (z.B. Ca-Brückenbindung) und hydraulische (z.B. Restschrumpfungseffekt) Vorgänge beeinflusst werden kann. Daneben können anthropogen bedingte Kompressionen wesentlich zur Erhöhung der Vorbelastung beitragen (HORN 2004).

Zur Ermittlung der Druckstabilität wird in der Bodenmechanik üblicherweise der Ödometertest angewendet, bei dem der Boden unter konstanter Bodenfeuchte uniaxial belastet wird (HARTGE & HORN 1992, DIN 18136 1996). Im semilogarithmischen Maßstab stellt man die Setzung als Funktion der Auflast (Normalspannung) graphisch dar und erhält die so genannte Drucksetzungskurve (Abb. 11).

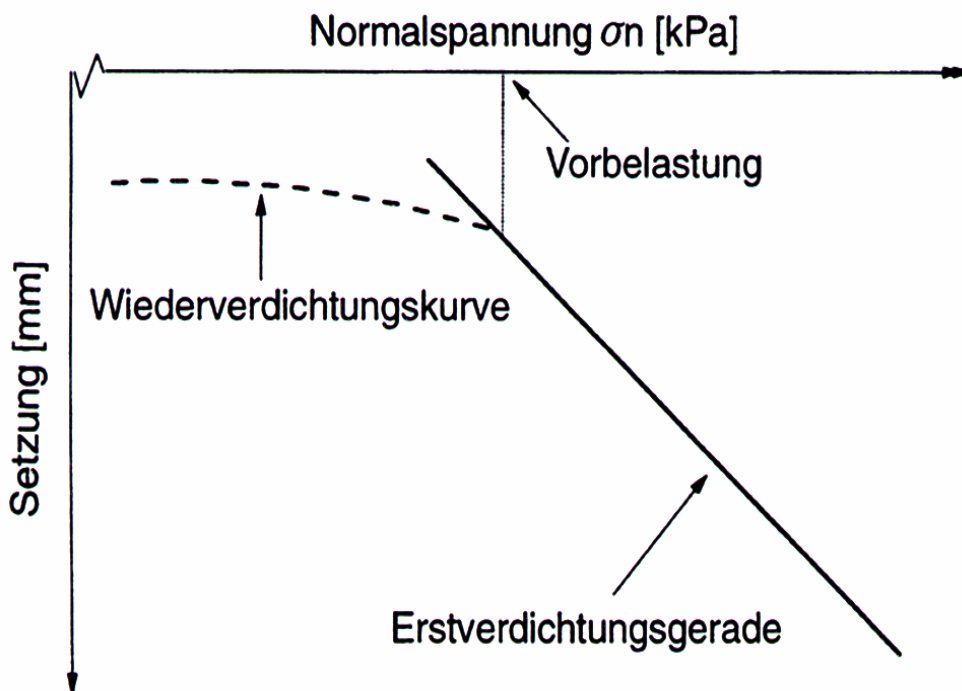


Abb. 11: Verlauf der Drucksetzungskurve im Wieder- und Erstverdichtungsbereich

Das Setzungsverhalten des Bodens ist abhängig von der jeweiligen Auflast und seiner Stabilität, wobei entweder eine elastische oder plastische Verformung eintritt (HORN 1980).

Die geringer geneigte Kurve beschreibt den Wiederverdichtungsbereich, in dem die Eigenstabilität des Bodens nicht überschritten wird, und der Boden daher stabil bleibt. Die Verformung ist elastisch (KÉZDI 1969). Bei weiterer Erhöhung der vertikalen Last befindet sich der Boden im Erstverdichtungsbereich, wobei es zu einer intensiveren Setzung und somit plastischen Verformung des Bodens kommt. Die Bodenpartikel verschieben sich, die Kornkontaktpunkte erhöhen sich und ein neues Kräftegleichgewicht stellt sich ein. Es kommt zu einer Änderung bodenphysikalischer Eigenschaften (z.B. Verringerung des Porenvolumens).

Der Übergang zwischen der Erst- und der Wiederverdichtungsgeraden wird handgraphisch nach dem Verfahren von CASAGRANDE (1936) ermittelt und mit dem Begriff der Vorbelastung bezeichnet.

Nach dem Aufbringen der Last erfolgt nicht sofort eine vollständige Setzung. Vielmehr lassen sich nach TAYLOR (1942) drei Setzungsanteile unterscheiden:

- **Sofortsetzung:** Nach Lastaufbringung wird in Sekundenbruchteilen die Luft aus den Poren gepresst, und die Bodenprobe wird zusammengedrückt.
- **Primärsetzung:** Die mit Wasser gefüllten Poren wirken der Auflast über Porenwasserdrücke entgegen. Das Wasser entweicht sehr viel langsamer als die Luft, so dass die Zeitdauer der Primärsetzung stark von der Wasserleitfähigkeit des Bodens abhängt und je nach Boden mehrere Stunden dauern kann.
- **Sekundärsetzung:** Für einen nicht absehbaren Zeitraum kann es durch plastisches Fließen des Bodens noch zur weiteren -wenn auch nur geringen- Setzung kommen.

Aufgrund des sehr aufwendigen Drucksetzungsversuchs wurden von LEBERT (1989), NISSEN (1999) und HENNINGS (2001) multiple Regressionsgleichungen berechnet, die eine Abschätzung der Vorbelastung für zwei Feuchtestufen (pF 1,8 und pF 2,5) aus zahlreichen bodenphysikalischen (Porenverteilung, Lagerungsdichte, Wasserleitfähigkeit), -mechanischen (Kohäsion, Winkel der inneren Reibung) und -chemischen (Humusgehalt) Parametern ermöglichen sollen. Die einzelnen Berechnungen sind Gegenstand der DVWK-Ansätze 234 (1995), 235 (1997) und 901 (2002) bzw. der DIN V 19688 (2000), auf die im Rahmen der Modellvalidierung in Kapitel 4.2 ausführlich eingegangen wird.

Durch Gegenüberstellung des durch Maschinen ausgeübten Bodendrucks mit der Vorbelastung soll nach dem Modell Vorbelastung eine Bewertung landwirtschaftlicher Arbeitsverfahren erfolgen (Abb. 12). Ist die aktuelle Auflast größer als die Eigenfestigkeit des Bodens, so ist mit einer langsamen (schleichenden) Bodenverformung zu rechnen.

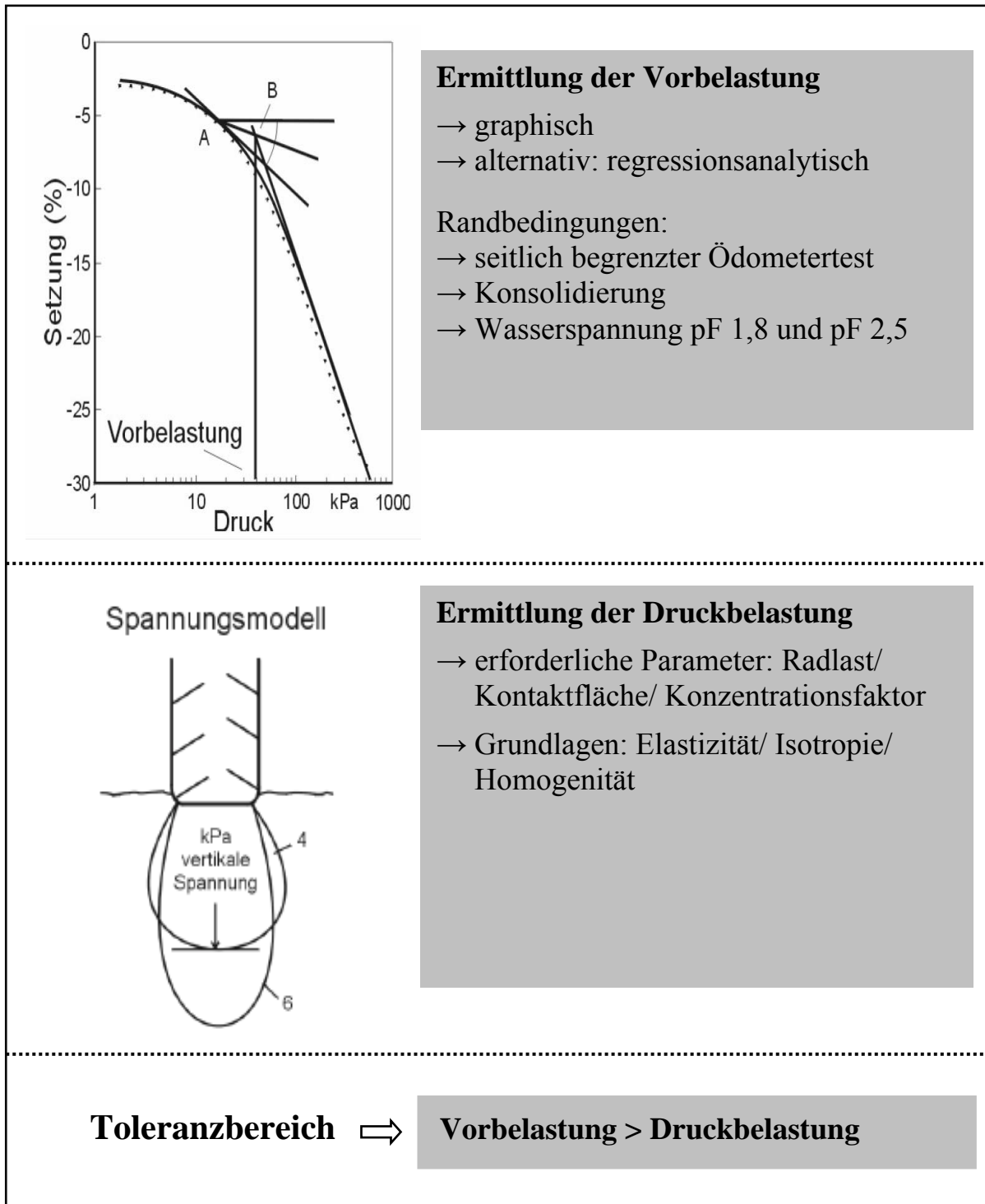


Abb. 12: Ermittlung von Druckbelastbarkeit und Druckbelastung des Bodens nach dem Vorbelastungskonzept (verändert nach LEBERT et al. 2004)

Die Ermittlung der Druckfortpflanzung erfolgt ähnlich dem Modell SVGK dem Verfahren nach NEWMARK (1942). Danach kann man den einwirkenden Druck bei Kenntnis der Parameter in jeder beliebigen Bodentiefe berechnen. Die Werte der Konzentrationsfaktoren beschreiben dabei die Tiefenwirkung des auf die Bodenoberfläche wirkenden Kontaktflächendruckes. Sie bewegen sich für gesättigte Böden zwischen 3 (stabiler Boden) und 9 (instabiler Boden), wobei die Spannungen mit wachsendem Konzentrationsfaktor eine größere Tiefenwirkung entlang der Lastachse bei geringerer Horizontalausdehnung aufweisen (SÖHNE 1958). Löst man die Gleichung nach P_o auf und setzt für den Druck in einer definierten Tiefe den Wert der Vorbelastung P_v ein, so erhält man den maximal tolerierbaren Kontaktflächendruck an der Bodenoberfläche. Unter bestimmten Annahmen für Reifenbreite und -typ können dann die entsprechenden Grenzwerte für Radlasten abgeleitet werden.

$$P_o = \frac{P_v}{1 - (z^2 / (r^2 + z^2))^{vk/2}}, \text{ wobei}$$

P_o = Kontaktflächendruck

P_v = Vorbelastung

z = Bodentiefe in cm

r = Radius der kreisrunden Kontaktfläche in cm

vk = Konzentrationsfaktor

Druckbelastungsquozient (DBQ)

Das Modell **DBQ** nach PAUL (2004) beruht auf einer Weiterentwicklung des Modells der Vorbelastung. Durch Einstellung des Bodendrucks der Technik auf die Druckverträglichkeit des Bodens sollen auch bei diesem Konzept ähnlich dem Modell Vorbelastung druckbedingte Gefügeschäden verhindert werden. Der DBQ berechnet sich aus dem Wert der Druckverträglichkeit (Dividend) und der Druckbelastung durch landwirtschaftliche Maschinen (Divisor).

Zur Ermittlung der Druckverträglichkeit der Böden benutzt PAUL (2004) nicht den Wert der Vorbelastung, sondern den Gefügestand des Bodens an der Untergrenze der ökologischen Funktionsfähigkeit. Nach PAUL (2004) ist die Zielstellung, das Bodengefüge dem Konzept Vorbelastung folgend zu erhalten, unter bestimmten Bedingungen nachteilig: Auf der einen Seite wäre ein sehr lockeres Gefüge sehr instabil, der Erhalt eines solchen nur mit hohem Aufwand möglich. Demgegenüber besitzt ein bereits schadverdichteter Boden eine

entsprechend hohe Vorbelastung, so dass Regenerationsprozesse verhindert und vorhandene Verdichtungen konserviert werden würden.

Bei der Betrachtung der Funktionen stehen nach PAUL (2004) der Makrostofftransport (Gasaustausch) und die Durchwurzelung der Pflanzen im Mittelpunkt. Der Sauerstoffbedarf der Wurzeln und Bodenlebewesen liegt bei 2-8 Litern je m^2 und Tag, zudem dringen die Wurzeln vorwiegend in die sehr groben Poren ein. Durchwurzelung und Sauerstofftransport stellen somit Anforderungen an die Luftkapazität und an einen die Porenkontinuität beschreibenden Parameter (PAUL 1990).

Die notwendige Luftkapazität leiten WERNER & PAUL (1999) aus dem Zusammenhang zwischen Diffusion, Porenvolumen und Porengeometrie ab. Für die Versorgung mit Sauerstoff ist für ein Gefüge ein relativer Gasdiffusionskoeffizient von 0,02 nach FLÜHLER (1972) definiert. Dieser lässt sich durch die Gleichung

$$D = LK^m, \text{ mit}$$

$$D = \text{relativer Diffusionskoeffizient}$$

$$LK = \text{Luftkapazität (Vol.-\%)}$$

$$m = \text{Kontinuität (Zahlenwert für die Porendurchgängigkeit)}$$

direkt in die Mindestluftkapazität umrechnen.

Nach PAUL (2004) liegt diese in Abhängigkeit von der Porenform bei einer Gasaustauschleistung von $2,5 \text{ l/m}^2/\text{d}$ zwischen 5,2 Vol.-% und 9 Vol.-% im Unterboden und 6,5 Vol.-% und 11,3 Vol.-% in der Krume. Im Mittel ergeben sich dann 5 Vol.-% (Unterboden) bzw. 8 Vol.-% (Krume). Als beschreibenden Parameter für die Porenwegsamkeit wählt PAUL (2004) den Kennwert der gesättigten Wasserleitfähigkeit. Dieser kann jedoch durch jeden anderen Parameter, der die Kontinuität leitender Poren beschreibt, ersetzt werden.

Durch die lineare Fortsetzung der Kompressionskurve zu Beginn des Erstverdichtungsabschnittes darf die Belastung nach PAUL (2004) nur solange erhöht werden, dass der ökologische Schadschwellenwert der Luftkapazität nicht überschritten wird (Abb. 13).

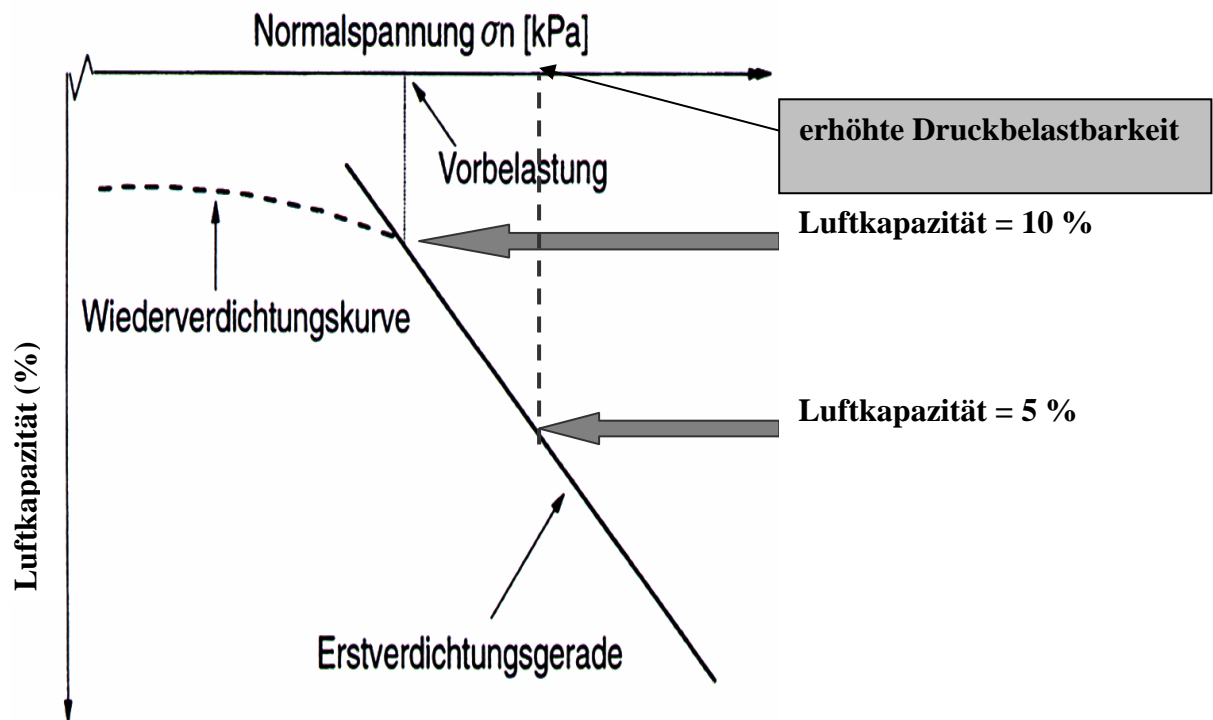


Abb. 13: Ableitung der Druckbelastbarkeit nach dem Modell DBQ

Zur rechnerischen Ableitung der maximalen Druckbelastbarkeit nutzt PAUL (2004) die Regressionsmodelle von LEBERT (1989). Die Verschiebung des Vorbelastungspunktes wird erreicht, indem nicht mit dem Messwert für die Eingangparameter sondern mit den Werten für das Zielgefüge gerechnet wird. Dabei werden zwei Bodenfeuchtestufen unterstellt, die sich aus der langjährigen örtlichen Niederschlagsverteilung und dem Zeitpunkt der Arbeiten ergeben, bei dem eine Bodenwasserspannung von pF 2,5 und 75 % bzw. 50 % dieser Wasserspannung vorliegen. So kann nach PAUL (2004) die gebietstypische Druckbelastbarkeit zum Zeitpunkt der Feldarbeiten eingeschätzt werden.

In Tab. 1 ist exemplarisch die Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit eines Braunerde-Tschernosem aus Thüringen für die Bereiche der Krume und des krumennahen Unterbodens dargestellt. Der hellgrau hinterlegte Tabellenbereich zeigt die Mess- bzw. Schätzwerte des Bodens. Neben den physikalischen Kenndaten sind sowohl die Werte der Kohäsion, des Winkels der inneren Reibung sowie des Humusgehaltes notwendige Eingabeparameter zur Berechnung der Druckbelastbarkeit. Die vorgegebenen Trockenrohdichten werden auf den Wert bei einer Luftkapazität von 8 Vol.-% bzw. 5 Vol.-% umgerechnet und daraus das Gesamtporenvolumen und die abhängigen Variablen „nutzbare Feldkapazität“ und „Welkepunkt (Feinporenanteil)“ abgeleitet (dunkelgrauer Tabellenbereich). Die gemessenen

bzw. geschätzten kf-Werte liegen im Unterboden mit 2 cm/d ($10^{0,3}$ cm/d) unter dem nach PAUL geforderten Mindestwert. Bei der Berechnung wird daher für diesen Fall ein Wert von 10 cm/d eingesetzt.

Die Druckbelastung wird für belastungsintensive Arbeiten berechnet. Diese ergibt sich über ein Rechenmodell nach SÖHNE (1953) und NEWMARK (1942) aus der Fahrzeugmasse einschließlich der Zusatzbelastung der Hinterachse, der Aufstandsfläche und der Bereifung sowie unter vereinfachter Annahme von bodenartsspezifisch konstanten Werten für den Konzentrationsfaktor. Die Spannungen werden jeweils für eine Tiefe von 15 cm (Krumme) bzw. 30 cm (krumennaher Unterboden) berechnet.

Tab. 1: Beispiel für die Berechnung der Druckbelastbarkeit eines Braunerde-Tschernosem nach PAUL (2004)

	Druckbelastbarkeit Krumme			Druckbelastbarkeit Unterboden		
	Wert bei Wasserspannung					
	pF 2,5	75 %	50 %	pF 2,5	75 %	50 %
<i>Mess- bzw. Schätzwerte</i>						
FK (M.-%)	23,6	23,6	23,6	24,5	24,5	24,5
Festsubstanzdichte	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
FP (Vol.-%)	18	18	18	22,7	22,7	22,7
Lagerungsdichte (g/cm ³)	1,39	1,39	1,39	1,46	1,46	1,46
Humusgehalt	1,9	1,9	1,9	1	1	1
log kf-Wert (cm/d)	1	1	1	0,3	0,3	0,3
Kohäsion (kPa)	27	27	31	27	27	31
Winkel (°)	36	38	39	37	37	37
Berechnete Werte für ökologisches Funktionsgefüge nach PAUL (2004)						
GPV (Vol.-%)	43,40	43,40	43,40	42,40	42,40	42,40
FK (Vol.-%)	35,40	26,55	17,70	37,40	28,05	18,70
LK (Vol.-%)	8,00 (pF1,8)	16,85	25,70	5,00 (pF 1,8)	14,35	23,70
Lagerungsdichte (g/cm ³)	1,50	1,50	1,50	1,53	1,53	1,53
FP (Vol.-%)	19,42	19,42	19,42	23,73	23,73	23,73
nFK (Vol.-%)	14,38	6,41	-1,55	12,30	3,88	-4,53
kf (cm/d)	10	10	10	10	10	10
	Ergebnis					
Belastbarkeit (kPa)	108	130	206	108	151	249

Aus den ermittelten Werten der Druckbelastbarkeit und der Bodenspannung je Arbeitsverfahren werden die DBQ für die zwei Bodentiefen und die verschiedenen Bodenwasserspannungen ermittelt. Bei DBQ von 1 übersteigt nach PAUL (2004) die Belastung nicht die Belastbarkeit der Böden, bei 1,25 kann vom Beginn kritischer Belastungen gesprochen werden. Ab 1,5 ist das Eintreten von Gefügeschäden als sehr wahrscheinlich einzustufen. Für die untere Krume lässt PAUL (2004) eine Überschreitung von 25 % aufgrund möglicher Regenerierungsprozesse zu.

In Tab. 2 ist eine praktische Beispielbewertung landwirtschaftlicher Arbeitsverfahren für einen nordrhein-westfälischen Betrieb nach dem Modell DBQ angegeben. Auf Parabraunerdeböden aus Löß bzw. Lößlehm wird durch mechanische Belastungen insbesondere bei Verfahren der mineralischen Düngung die Druckbelastbarkeit des Bodens bei 100 % Feldkapazität überschritten. Pflug- und Mähdruscharbeiten hingegen liegen noch im von PAUL definierten Toleranzbereich. Bei letzterem wird aufgrund des Einsatzes im Sommer nur der mögliche Bodenwasserspannungsbereich von 75 % Feldkapazität angenommen. Wesentlich kritischer hingegen sind die Ergebnisse für die Braunerden aus Schluff und Tonschiefer zu bewerten. Mit Ausnahme des Mähdruschs weisen hier alle dargestellten Feldarbeiten Belastungsquotienten über 1,25 auf. Im Durchschnitt liegt der Betrieb auf diesen Böden mit 1,61 in Bereichen, in denen das Eintreten von Gefügeschäden als sehr wahrscheinlich einzustufen ist. Die Parabraunerden aus lehmigen Schluff sind aufgrund der hohen Druckbelastbarkeit des Bodens ausschließlich bei Arbeitsgängen zur mineralischen Düngung gefährdet. Im Durchschnitt übersteigt allerdings auch hier die mechanische Belastung die Belastbarkeit des Bodens. Der Definition nach PAUL zufolge bewegt man sich aber mit 1,24 noch im tolerierten Bereich.

Dieser Beratungsansatz, der von der potenziellen Verdichtungsgefährdung und vom Vorsorgeprinzip ausgeht, ist bereits heute Bestandteil des Bewertungssystems KUL (Kriterien für Umweltverträgliche Landwirtschaft) für Umweltqualität in der Landwirtschaft (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, ECKERT et al. 1999).

Tab. 2: Einschätzung der Verdichtungsgefährdung für einen nordrhein-westfälischen Marktfruchtbetrieb nach dem Modell DBQ (LÜTKE ENTRUP & BECK 2005)

Bodenform	Druckbelastbarkeit (kPa) in 15 bis 30 cm Tiefe		Belastungsquotient (Druckbelastung / Druckbelastbarkeit) in 15 bis 30 cm Tiefe ¹⁾						
			Pflügen ²⁾		mineralische Düngung		Mähdrusch		Ø
			100% FK	75% FK	100% FK	75% FK	100% FK	75% FK	
Parabraunerde aus Löß/ Lößlehm über verschiedenartigen Gesteinen	125	145	1,00	1,00	1,76	1,41	-	1,16	1,27
Parabraunerde aus lehmigen Schluff	135	150	1,18	1,03	1,63	1,36	-	1,01	1,24
Braunerde aus Schluff und Tonschiefer	100	130	1,80	1,32	2,20	1,57	-	1,15	1,61

¹⁾ Für den Arbeitsgang Pflügen gilt der Belastungsquotient in 30 cm Tiefe.

²⁾ Mit Befahren in der Furche.

Indikatorenmodell

Bei der Beurteilung des Schadverdichtungsstatus landwirtschaftlich genutzter Böden stellt sich immer wieder die Frage nach einem geeigneten Referenzsystem, das die eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung erlaubt. Es existieren zwar zahlreiche Parameter, die Aussagen über den Bodenstrukturzustand erlauben (vgl. Kapitel 2.1), die Interpretation der Ergebnisse wird aber aufgrund vieler Einflussfaktoren (z.B. Bodenart, Bodentyp) erschwert.

LEBERT et al. (2004) sind in einem Forschungsvorhaben dieser Frage nachgegangen und haben verschiedene bodenkundliche Parameter im Hinblick auf ihre Eignung zur Kennzeichnung einer Bodenschadverdichtung bewertet. Ein solcher Indikator muss nach LEBERT et al. (2004) möglichst klar und einfach definierbar sein. Er sollte über eine standardisierte Analytik zu bestimmen sein, eine Bodenschadverdichtung direkt anzeigen und über eindeutige Schadschwellen klassifizierbar sein. Ziel in dem erst jüngst von LEBERT et al.

(2004) veröffentlichtem Forschungsbericht ist die Schaffung von verbindlichen Regeln zur Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen im Sinne des BBodSchG (1998). Eine schädliche Bodenveränderung soll danach anhand der vorgestellten Parameter im Rahmen einer Einzelfallprüfung mit analytischem Aufwand feststellbar sein.

Tab. 3 gibt einen Überblick über die von LEBERT et al. (2004) geprüften Indikatoren und die jeweiligen betroffenen Bodenfunktionen. Es wird zwischen Einzelparametern und aggregierten Parametern, die im Rahmen der Feldgefügeansprache erhoben werden, unterschieden. LEBERT et al. (2004) wählen den Begriff der „Feldgefügeansprache“ um zu verdeutlichen, dass die Erhebung grundsätzlich im Freiland (Feld) bei der Bodenansprache erfolgen soll. Aus diesem Grunde werden im weiteren Verlauf der Ausführungen die Parameter zur Bodenansprache (Spatendiagnose, effektive Lagerungsdichte, Packungsdichte, Strukturmerkmalskombination) als Feldgefügeparameter bezeichnet.

Tab. 3: Von Bodenschadverdichtung direkt betroffene Bodenfunktionen und mögliche Parameter als Anzeiger (verändert nach LEBERT et al. 2004)

Bodenfunktion	Teilfunktion	Einzelparameter	Aggregierte Parameter
Ausgleichs- funktion und Regelungs- funktion	Luftspeicherung	Luftkapazität Lagerungsdichte	Für alle Teilfunktionen Gefügeansprache des Bodens im Feld durch: • Effektive Lagerungsdichte • Packungsdichte • Spatendiagnose • Strukturmerkmals- kombination
	Luftleitung	Luftleitfähigkeit O ₂ -Diffusion Lagerungsdichte	
	Wasserspeicherung	Nutzbare Feldkapazität Lagerungsdichte	
	Wasserleitung	Gesättigte/ungesättigte Wasserleitfähigkeit Lagerungsdichte	
Produktions- funktion	Durchwurzelbarkeit	Wurzellängendichte Lagerungsdichte Eindringwiderstand	

Nach Anwendung bestimmter Ausschlusskriterien (z.B. keine Standardanalytik oder keine Schadschwellenwerte) bleiben noch 5 Parameter übrig, die die Bewertung einer Bodenschad-

verdichtung durch bodenkundlich geschulte Fachleute erlauben (Tab. 4). Zu berücksichtigen ist, dass zur Identifikation einer Bodenschadverdichtung jeweils die Schadschwellenwerte der Luftkapazität, der gesättigten Wasserleitfähigkeit und eines Feldgefügeparameters gleichzeitig überschritten werden müssen. Dies ist nach LEBERT et al. (2004) notwendig, um bodengenetisch bedingte Verdichtungen (z.B. Bt-Horizonte von Parabraunerden) von anthropogen bedingten Gefügeschäden zu unterscheiden.

Tab. 4: Indikatorensystem und Schadensschwellenwerte zur Erkennung einer Bodenschadverdichtung (LEBERT et al. 2004)

Parameter	Schadensschwelle	Quellen
Luftkapazität	5 Vol.-%	FLÜHLER 1973, BLUME 1968, DUMBECK 1986, WERNER & PAUL 1999
Gesättigte Wasserleitfähigkeit	10 cm d ⁻¹	DVWK 136 1999, BLUME 1968, ZAKOSEK 1960, WERNER & PAUL 1999
Effektive Lagerungsdichte	Stufen 4 und 5	AG BODEN 1994
Packungsdichte	Stufen 4 und 5	DIN 19682-10 1998
Spatendiagnose	Stufen 4 und 5	DIEZ & WEIGELT 1997

3 Standorte und Analysemethoden

3.1 Untersuchungsablauf

Zur Staturerhebung des Bodengefügezustandes bzw. zur Verifizierung der einzelnen Modelle wurden im Rahmen empirischer Erhebungen in den Jahren 2002-2005 bodenphysikalische, -mechanische und -chemische Messungen an insgesamt 23 Standorten in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Jeder Standort wird durch einen landwirtschaftlichen Betrieb repräsentiert. Neben den bodenkundlichen Untersuchungen wurde die jeweilige betriebliche Situation im Hinblick auf die Bodenbewirtschaftung und die landtechnische Ausstattung erfasst. Der genaue Ablauf der Untersuchungen ist in Abb. 14 skizziert.

Die Kriterien zur Auswahl der Standorte sowie deren naturräumliche Eingliederung werden in Kapitel 3.2.1-3.2.2 vorgestellt (Abb. 14, blauer Kasten). Auf die Methode zur Erfassung der betrieblichen Situation (Abb. 14, grüner Kasten) wird in Abschnitt 3.2.3-3.2.4 näher eingegangen, die Vorgehensweise bei der Durchführung der Bodenuntersuchungen (Abb. 14, roter Kasten) in Kapitel 3.3 beleuchtet.

3.2 Standorte und betriebliche Situation

3.2.1 Betriebs- und Flächenauswahl

Die Auswahl der Standorte erfolgte in Absprache mit Vertretern des MUNLV (Düsseldorf), der Landwirtschaftskammer NRW (Bonn/Münster), des Geologischen Dienstes (Krefeld) und der Fachhochschule Südwestfalen (Soest).

Die Abdeckung eines möglichst weiten Spektrums der für die Beurteilung von Bodenschadverdichtungen relevanten Faktoren stand bei der Frage nach geeigneten Messstellen im Mittelpunkt. Um für das bodenkundlich sehr vielfältige Land NRW zu repräsentativen Aussagen zu kommen, ist es wichtig, sich auf die wesentlichen Haupteinflussfaktoren zu beschränken. Folgende Kriterien fanden Beachtung:

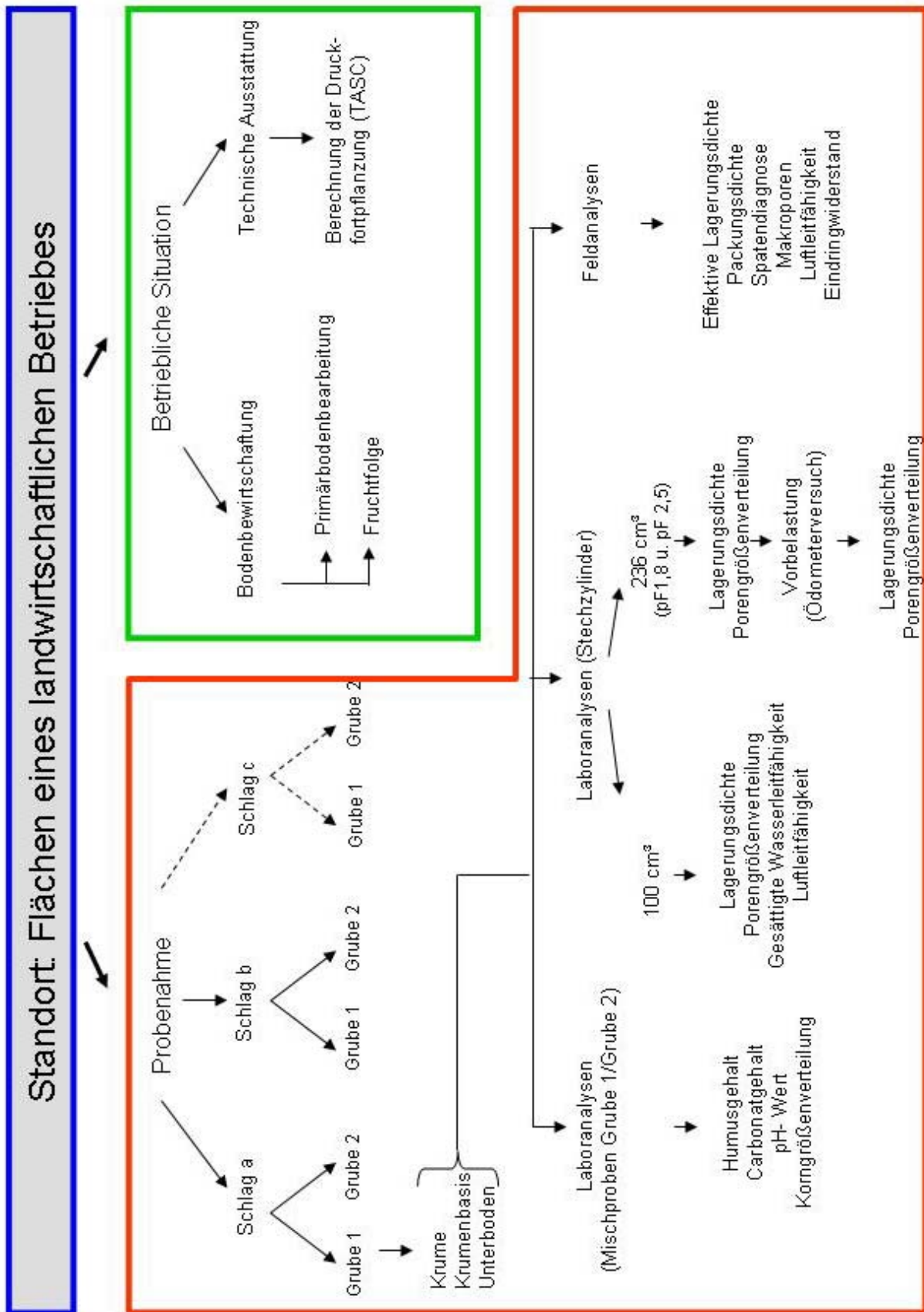


Abb. 14: Untersuchungsablauf

- Die Bodenstabilität wird sehr stark von der Korngrößenverteilung bestimmt (KÉZDI 1969, HARTGE & HORN 1991). Deshalb wurde ein repräsentatives Spektrum von **Bodenarten** nordrhein-westfälischer Ackerböden in die Untersuchung einbezogen.
- Die Primärbodenbearbeitung hat einen wesentlichen Einfluss auf die mechanische Belastbarkeit (SOMMER 1998a). Die unterschiedlichen Arten der **Grundbodenbearbeitung** (Wendend/Konservierend/Direktsaat) sollten deshalb hinreichend berücksichtigt werden.
- Die landwirtschaftlichen **Nutzungsvarianten (Fruchtfolgen)** der beprobten Ackerflächen sollten typischen nordrhein-westfälischen Verhältnissen entsprechen.
- Die Flächen sollten langjährig durch **einen Betriebsleiter** bewirtschaftet worden sein.

Unter den zahlreichen praktizierenden Betrieben waren auch die Versuchsgüter der Landwirtschaftskammer NRW („Köln-Wahn“ bzw. „Haus Düse“) und der Fachhochschule Südwestfalen („Merklingsen“) sowie Leitbetriebe aus dem Projekt „Bodenbewirtschaftung in Leitbetrieben in NRW“ (LÜTKE ENTRUP et al. 2005) vertreten.

Jeder landwirtschaftliche Betrieb erhält zur Wahrung der Anonymität eine Standortnummer die fortan beibehalten wird. Einzig bei den Versuchsgütern erfolgt eine namentliche Zuordnung. Abb. 15 zeigt die geographische Lage der Standorte.

In Tab. 5 sind die naturräumliche Eingliederung sowie die jährlichen Niederschlagsmengen der Standorte abgebildet. Die Einordnung in Großlandschaften folgt dem „Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands“ (MEYNEN et al. 1962) (vgl. Kapitel 3.2.2), die jährlichen Niederschlagsdaten wurden dem Klimaatlas (MUNLV 1989) entnommen. Die je Standort untersuchten landwirtschaftlichen Nutzflächen werden durch kleine Buchstaben gekennzeichnet. Sie variieren von minimal einer Fläche bis maximal acht Flächen (Standort 14). Daneben enthält die Tabelle Angaben zum schlagspezifischen Bodentyp, der tiefenabhängigen Bodenart (Krume, Krumenbasis, Unterboden → vgl. Kapitel 3.3), der Art der Grundbodenbearbeitung und der jeweiligen Nutzung (vgl. Kapitel 3.2.3).

Um Nutzungseinflüsse zu bewerten, wurden neben den Ackerflächen zusätzlich eine Grünlandparzelle (Standort 11b) und zwei langjährig stillgelegte Flächen (Standort 9c+14h) in die Untersuchungen aufgenommen.

Eine detaillierte Beschreibung der Standorte und eine bodenkundliche Profilaufnahme der Flächen sind dem Anhang A1 zu entnehmen.

Insgesamt bilden 23 Standorte mit 46 landwirtschaftlichen Nutzflächen die Datengrundlage der empirischen Erhebungen.

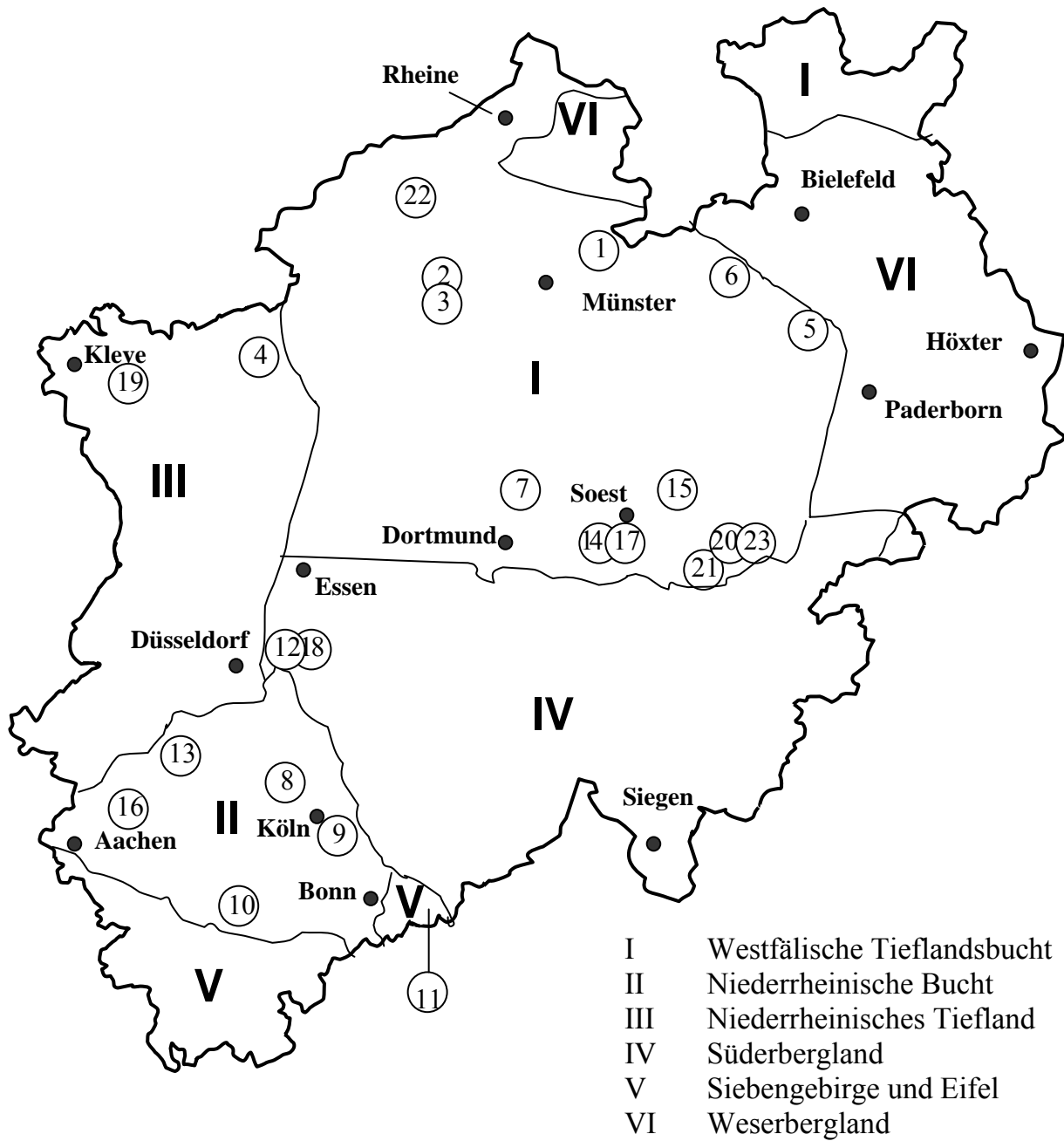


Abb. 15: Geographische Lage der Standorte

Tab. 5: Standortcharakterisierung

Standortnummer	Großlandschaft	Jahresniederschlag (mm)	Schlag	Bodentyp	Bodenart			Grundbodenbearbeitung W= Wendend K= Konservierend D= Direktsaat	Nutzung A= Acker G= Grünland S= Stilllegung
					Krume (ca. 15 cm)	Krumbasis (ca. 30 cm)	Unterboden (ca. 50 cm)		
1	Westfälische Tieflandsbucht	740	a	Plaggenesch	Su3	Su2	Su2	K	A
			b	Plaggenesch	Su2	Sl2	Sl2	K	A
2	Westfälische Tieflandsbucht	840	a	Podsol		Sl2	Ss	W	A
			b	Gley		Su2	Ss	W	A
3	Westfälische Tieflandsbucht	840	a	Plaggenesch	Su2	Sl2	Sl2	W	A
			b	Gley-Podsol		Sl2	Sl2	W	A
4	Niederrheinisches Tiefland	850	a	Gley-Podsol	Su2	Ss	Ss	K	A
5	Westfälische Tieflandsbucht	750	a	Nassgley		Ss	Ss	W	A
6	Westfälische Tieflandsbucht	750	a	Gley-Podsol		Ss	Sl2	W	A
7	Westfälische Tieflandsbucht	750	a	Gley-Pseudogley	Su3	Su3	Sl4	W	A
			b	Pseudogley	Sl3	Sl4	Sl4	W	A
8	Niederrheinische Bucht	750	a	Auenboden		Sl3	Sl4	W	A
			b	Auengley- Auenboden		uL	uL	W	A
9	Niederrheinische Bucht	760	a	Parabraunerde		Lt2	Lt2	W	A
			b	Parabraunerde	Ls2	Ls2	Lt2	K	A
			c	Parabraunerde	Lu	Lu	Lu	--	S
10	Niederrheinische Bucht	600	a	Gley-Braunerde	Uls	Uls	Lu	K	A
			b	Parabraunerde	Ut3	Ut3	Ut4	W	A
11	Siebengebirge	800	a	Parabraunerde	Ut3	Ut4	Ut4	D	A
			b	Parabraunerde	Ut3	Ut4	Ut4	--	G
			c	Braunerde-Pseudogley	Ut3		Tu4	D	A
12	Süderbergland	1100	a	Parabraunerde	Ut3	Ut3	Ut3	K	A
			b	Pseudogley-Parabraunerde	Ut2	Ut3	Ut3	K	A
13	Niederrheinische Bucht	750	a	Parabraunerde	Ut2	Ut2	Ut3	W	A
			b	Parabraunerde	Ut2	Ut4	Ut4	K	A

Tab. 5: Fortsetzung

14	Westfälische Tieflandsbucht	750	a	Pseudogley-Parabraunerde	Ut3	Ut2	Ut4	W	A
		750	b	Pseudogley-Parabraunerde	Ut3	Ut2	Ut3	K	A
		750	c	Pseudogley-Parabraunerde	Ut2	Ut2	Ut4	D	A
		750	d	Pseudogley-Parabraunerde	Ut2	Ut3	Ut4	W	A
		750	e	Pseudogley-Parabraunerde	Ut3	Ut2	Ut3	K	A
		750	f	Pseudogley-Parabraunerde	Ut3	Ut2	Ut3	D	A
		750	g	Pseudogley-Parabraunerde	Ut2		Ut4	K	A
		750	h	Pseudogley-Parabraunerde	Uu		Ut3	--	S
15	Westfälische Tieflandsbucht	750	a	Pseudogley-Parabraunerde	Ut2	Ut3	Ut4	W	A
		750	b	Pseudogley-Parabraunerde	Ut2	Ut3	Ut4	K	A
16	Niederrheinische Bucht	750	a	Parabraunerde		Ut4	Ut4	W	A
		750	b	Parabraunerde-Kolluvisol	Ut2	Ut3	Ut3	K	A
17	Westfälische Tieflandsbucht	750	a	Pseudogley-Parabraunerde	Uu	Ut2	Ut4	K	A
18	Süderbergland	750	a	Kolluvium	Ut2	Ut3	Ut4	K	A
19	Niederrheinisches Tiefland	700	a	Auenboden	Ut4	Tu4	Ut4	K	A
20	Westfälische Tieflandsbucht	800	a	Braunerde-Pseudogley	Ut4	Tu3	Tu3	W	A
		800	b	Braunerde-Pseudogley	Ut3	Tu3	Tu2	W	A
21	Westfälische Tieflandsbucht	800	b	Braunerde	Ut3	Tu3	Tu3	W	A
		800	b	Braunerde	Ut3	Tu2	Tu3	K	A
22	Westfälische Tieflandsbucht	850	a	Pseudogley	Lt3			K	A
23	Westfälische Tieflandsbucht	800	a	Braunerde	Ut2	Ut4	Tu2	K	A

3.2.2 Naturräumliche Einordnung

Jeder einzelne Standort kann aufgrund seiner geographischen Lage einer naturräumlichen Haupteinheit (Großlandschaft) und einer niederen Größenordnung, der Untereinheit, zugeordnet werden. Die einzelnen Naturräume sind das Ergebnis des Zusammenwirkens aller beteiligten Geländefaktoren, wie der Oberflächenform, Gesteinsart, Böden, Wasserhaushalt, Klima und der natürlichen Geländequalität im Hinblick auf ihre landwirtschaftliche Nutzung (MEYNEN et al. 1962) (vgl. Abb. 15).

Im Folgenden erfolgt eine Darstellung der Großlandschaften, wobei der durch die Lage eines Standortes betroffenen Untereinheiten besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Die

Einordnung und Beschreibung wurde dem „Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands“ (MEYNEN et al. 1962) entnommen.

Westfälische Tieflandsbucht

Die Westfälische Tieflandsbucht dringt tief in die west- und norddeutschen Mittelgebirge nach Osten vor. Begrenzt wird dieser Naturraum im Norden und Nordosten durch das Untere Weserbergland im Süden und Südwesten wird es durch das Süderbergland zangenförmig umschlossen. Im Westen sind die Grenzen aufgrund des unscharfen Übergangs zu den Niederländischen Diluviallandschaften nicht so deutlich ausgeprägt.

Aufgrund der großräumigen Ausbildung der Westfälischen Bucht (9875,4 km²) liegen insgesamt 13 der 23 untersuchten Standorte in diesem Naturraum, wobei mit Ausnahme des Emscherlandes alle Untereinheiten vertreten sind.

Das Gebiet der *Hellwegbörden*, in dem insgesamt 7 Standorte (7/14/15/17/20/21/23) liegen, ist eine Landschaft am Südrand der Westfälischen Bucht und wird im Norden durch den Flusslauf der Lippe, im Osten durch die Paderborner Hochfläche und im Westen durch das Emscherland begrenzt. Der sanfte Anstieg zum angrenzenden Süderbergland bildet die südliche Grenze dieser Landschaftseinheit.

Die Oberflächengestalt des Gebietes wechselt großräumig. Im Bereich der Soester Börde ist das Gelände meist eben und senkt sich weiter westlich in das flache so genannte Hellweger Tal über, das sich von Werl bis nach Dortmund zieht. Im Nordwesten erstreckt sich ein flachwelliges bis hügeliges Land, das sich bis Lünen als lang gestreckte flache Bodenwelle ausdehnt. Von der Soester Börde ausgehend steigt das Gelände in südlicher Richtung zunächst sanft an und erreicht im Bereich des Standortes 23 eine Höhe von ca. 365 m NN.

Im Bereich der Soester Börde spielt der nacheiszeitliche Löss die bodenbildende Hauptrolle. Südöstlich von Lippstadt im Bereich des Versuchsgutes „Haus Düsse“ stehen die unter dem Löss lagernden Kreidekalke dichter an. Aus den Lössböden haben sich vorwiegend basenreiche Parabraunerden herausgebildet, die aufgrund verstärkter Lessivierung oder des oberflächennah anstehenden Mergelgesteines zu mäßig bis starker Pseudovergleyung neigen (Abb. 16). Der Haarstrang selbst besteht aus Kreidekalken, Kalksandsteinen und -mergel, aus denen sich überwiegend tonhaltige Braunerden bzw. Pseudogley-Braunerden entwickelt haben.



Abb. 16: Parabraunerde-Pseudogley in der Soester Börde

Klimatisch gesehen darf das Klima der Hellwegbörden noch als maritim betrachtet werden, obwohl sich aufgrund der Leewirkung des Süderberglandes kontinentaler Einfluss bemerkbar macht. Ein Zeichen dafür sind die verhältnismäßig hohen durchschnittlichen Sommertemperaturen im Juli ($\bar{\varnothing}$ 17,6 °C), und die jährlichen Niederschlagsmengen, die im Bereich der Soester Börde um die 700 mm schwanken. Der Haarstrang erhält mit ca. 800 mm noch relativ hohe Niederschlagsmengen.

Heute ist der gesamte Raum der Hellwegbörden eine äußerst intensiv genutzte Kulturlandschaft; Ackerbau bildet die wesentliche Erwerbsgrundlage der Landwirtschaft. In der Soester Börde dominiert der Anbau von anspruchsvollen Kulturen (Zuckerrüben, Weizen), wogegen die Haarhöhe vorwiegend durch Getreide und Winterrapsanbau gekennzeichnet ist.

Das **Münsterland**, das sich weiter in das Kern-, Ost- und Westmünsterland gliedern lässt, ist eine vor allem ländlich geprägte Region im Norden Nordrhein-Westfalens. Diesem Naturraum, der mit 7254,2 km² ca. $\frac{3}{4}$ der Westfälischen Tieflandsbucht einnimmt, sind insgesamt 6 landwirtschaftliche Betriebe (Standort 1/2/3/5/6/22) zuzuordnen. Räumlich erstreckt sich das Münsterland im Südosten entlang der Lippe bis an die Paderborner Hochflächen. Im Nordosten und Osten wird es von den Randgebirgen des Weserberglandes und dem Teutoburger Wald begrenzt, wogegen im Westen die deutsch-niederländische Grenze bzw. die nicht definierte Grenze zu den Rheinterrassen den naturräumlichen Übergang darstellen. In südlicher Richtung ist der Wechsel zu den Bodentypen der Hellwegbörden charakteristisches Merkmal für die Abgrenzung des Münsterlandes.

Bezogen auf die Oberflächengestalt ist der westliche Flügel des Münsterlandes eben bis flachwellig, nur die südwestliche Hälfte ist etwas bewegter und in eine Reihe von Tälern, Ebenen, Hügelländern und Rücken aufgelöst. Der östliche Teil ist durch den allmählichen Anstieg zu den nordöstlichen Randgebirgen sowie durch das wechselnde Kleinrelief gekennzeichnet. Das Oberflächenrelief des Kernmünsterlandes wechselt sehr stark. Die

Baumberge mit ca. 200 m NN als „kleines Mittelgebirge“ und die aus kreideeiszeitlichen Meeresablagerungen entstandenen Beckumer Berge sind mit 173 m NN größere Erhebungen im Münsterland.

Die Böden des West- und Ostmünsterlandes bestehen trotz verschiedener geologischer Ablagerungen vorwiegend aus Sanden. Das Ostmünsterland - oder wie die synonymen Bezeichnungen „Emsandebene“ bzw. „Sandmünsterland“ vermuten lassen - ist durch diluviale Schmelzwassersande, die im Süden auf die Tal- und Terrassensande der Ems übergehen, gekennzeichnet. Hier sind das verzweigte Gewässernetz und der ausgeprägte Grundwassereinfluss entscheidend für die Ausbildung verschiedener Bodentypen. In den grundwassernahen Sandebenen herrschen vorwiegend vom Wasser beeinflusste schwach bis mäßig podsolierte Böden vor, in den Niederungsgebieten führt ein höher anstehender Wasserspiegel zur Bildung reiner Gleye. Im westlichen Teil des Münsterlandes erzeugen Talsande im Norden, Sande des Senons bzw. Terrassensande der Lippe im Süden und Flugsande im Bereich der Lembecker Sandebene die relativ einheitliche Bodentextur. Auch einzelne Grundmoräneninseln, wie z.B. südlich von Stadtlohn, sind eher sandigen Charakters. Nur im Bereich der Kreideauftragungen um Ahaus gelangen Tone und Mergel dicht an die Bodenoberfläche. Die Vorherrschaft der Sande bedingt vornehmlich die Ausbildung von Podsolböden, die je nach Grad der Podsolierung verschieden ausgeprägt sind. Aus den stärker grundwasserbeeinflussten Talsanden im Norden des Naturraumes entwickeln sich vornehmlich Gleye (Abb. 17). Im Bereich der Kreidemergel und -tone können durch den schwer durchlässigen Untergrund Stauwasserböden entstehen.

Die das Kernmünsterland gewissermaßen als Eckpfeiler umgebenden Höhegebiete treten auch im Hinblick auf das geologische Ausgangsmaterial hervor. Mergel- und Kalksandsteine im Bereich der Baumberge, Kalkmergel in den Beckumer Bergen und Mergel, Sand und Kalksandsteine im Bereich der Lipperhöhen heben sich geologisch ab von dem Innern des Kernmünsterlandes, wo die Kreideschichten - meist Tone und Mergel - fast überall unter einer Decke diluvialer Ablagerungen von unterschiedlicher Mächtigkeit liegen. Die vorherrschende Diluvialablagerung ist hier der Geschiebemergel, der sowohl durch seinen Gehalt an einheimischem kalkhaltigem Material als auch durch die darunter lagernden Kreidemergel einen recht beträchtlichen Basengehalt besitzt. Daneben wird der Norden des Kernmünsterlandes von einem breiten Streifen sehr feinkörnigen Sandlösses durchzogen. In den Flusstälern finden sich vorwiegend Niederterrassensande, alluviale Talsande und Auenlehme.



Abb. 17: Podsol (links) und Gley (rechts) aus diluvialen Schmelzwassersanden im Münsterland

Bodentypologisch sind in den Höhenzonen der Baumberge und der Beckumer Berge aufgrund der Vorherrschaft des Mergels vorwiegend Pararendzinen mit Übergang zu teilweise gley- und pseudogleyartigen Braunerden und reine Pseudogleye zu finden. Im Zentrum des Kernmünsterlandes ist entsprechend der Mächtigkeit des Geschiebelehms über dem Kreideuntergrund eine große Zahl von Bodentypen vorhanden. Vor allem basenreiche Braunerden, die durch mehr oder weniger starke Staunässe beeinflusst werden, prägen das recht abwechslungsreiche Bodenbild in dieser Region. Im Bereich des Sandlösses sind Braunerden geringerer Basensättigung verbreitet, die meist schwach podsolistig sind. Aus den Niederterrassensanden und den Talsanden haben sich größtenteils Podsole herausgebildet, im Bereich der Auenlehme dominieren die jüngeren Auenböden. Neben den natürlich entstandenen Böden übte im gesamten Münsterland die seit dem 8-11 Jahrhundert praktizierte Plaggenwirtschaft einen maßgeblichen Einfluss auf die Entstehung anthropogen bedingter Bodenformen (Eschböden) aus. Die im Stall als Einstreu verwendeten Heideplaggen wurden auf der etwas höher gelegenen Feldflur des Dorfes ausgebracht, wodurch sich ein humoser mächtiger Esch-Horizont herausbildete. Dadurch erhalten diese Ackerflächen ihre auffallend gewölbte Form.

Klimatisch gesehen ist der gesamte Raum des Münsterlandes ebenfalls als maritim einzustufen. Die Jahresniederschlagsmengen schwanken zwischen 700 mm, die z.B. aufgrund der Lee-Wirkung der Höhen des Kernmünsterlandes auftreten, und über 800 mm in den Höhegebieten der Beckumer Berge und der Baumberge. Im Sommer kommt jedoch auch zunehmend der Einfluss kontinentaler Klimaströme zum Tragen, wobei die Temperaturmarke von 30 °C nicht selten überschritten wird.

Die Landschaft ist von intensiver landwirtschaftlicher Nutzung geprägt, die aber noch relativ kleinteilig ist. Aufgrund der vorherrschenden Bullen- bzw. Schweinemast und -zucht dominiert in fast allen Regionen der Futteranbau (Mais, Getreide). Auf besseren Standorten wird Weizen angebaut, auf den grundwassernahen Böden ist Grünland die einzige landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeit. Daneben bestimmen kleine Wäldchen, Gehölze, Gebüsche und Hecken das Landschaftsbild, so dass oftmals auch von der „Münsterländer Parklandschaft“ gesprochen wird.

Niederrheinische Bucht

Zwischen dem rheinischen Schiefergebirge greift von Norden her die Niederrheinische Bucht als Südteil eines nach Norden weiter reichenden großen tektonischen Einbruchfeldes trichterförmig in das Mittelrheinische Bergland hinein. Sie liegt zwischen den Städten Aachen, Bonn und Düsseldorf und wird von äußerst scharfen Grenzen umgeben. Im Süden bildet das rheinische Schiefergebirge den Abschluss der Bucht bei Königswinter, linksrheinisch Richtung Westen sind die Eifel und das Hohe Venn die natürliche Grenze. Der Übergang in das Bergische Land grenzt die Niederrheinische Bucht auf der rechten Rheinseite ab, wogegen sich im Nordwesten die Niederrheinische Tieflandebene öffnet und im Nordosten das Münstersche Kreidebecken anschließt.

In der Niederrheinischen Bucht liegen insgesamt 5 der hier vorgestellten landwirtschaftlichen Betriebe (Standort 8/9/10/13/16), wobei die Untereinheiten der Zülpicher und Jülicher Börde sowie die Kölner Bucht -auch Köln-Bonner Rheinebene genannt- vertreten sind.

Die *Jülicher Börde* bildet als nördlicher Teil der niederrheinischen Börden zusammen mit der *Zülpicher Börde* den westlichen Teil der niederrheinischen Bucht. Aufgrund ihrer naturräumlichen Vergleichbarkeit werden diese beiden Regionen zusammenfassend vorgestellt. Die Bördegebiete werden durch 3 Standorte (10/13/16) repräsentiert.

Das Relief der Bördelandschaften ist gekennzeichnet durch den Einfluss der Tektonik, durch den zertalten Terrassenbau und durch die geschlossene Lössüberdeckung. Dabei werden Höhenmeter von 60 bis 200 erreicht. Der Bereich der gebirgsrandnahen Zone zur Eifel weist durch die seitlich zusammengewachsenen und etwas steileren Schotterkegel der zahlreichen am Eifelrand austretenden kleineren Flüsse und Bäche eine etwas stärkere Neigung auf. Diese Eifelschotterzone ist durch Talniederungen teilweise sehr stark zerschnitten, zwischen denen sich meist lössfreie Schotterrücken erheben.



Abb. 18: Parabraunerde aus Löss in der Jülicher Börde

In der Zülpicher und Jülicher Börde stellt der Löss das vorherrschende Ausgangsmaterial der Bodenbildung dar. Das äolische Sediment hat sich während der letzten Kaltzeit (Weichsel-Kaltzeit) abgelagert und führte in der nachfolgenden Warmzeit zur Entwicklung tiefgründiger fruchtbarer Braunerden und Parabraunerden, die unter den klimatischen Bedingungen heute eine sehr ertragreiche agrarische Nutzung erlauben. Die Mächtigkeit der Lössdecke ist jedoch in der Jülicher Börde mit 10-26 m durchweg bedeutend größer als in der Zülpicher Börde, wo sich aus 1-2 m tief entkalktem Lösslehm tiefgründige Parabraunerden mit mittleren bis hohen natürlichen Nährstoffvorräten entwickelt haben (Abb. 18). Teilweise bedingen die unmittelbar an der Oberfläche liegenden Terrassenschotter vor allem des Zülpicher Eifelvorlandes eine Vermischung mit der Lössauflagerung.

Bezogen auf das Klima machen sich zwischen den beiden Bördegebieten deutliche Unterschiede bemerkbar. Die Jülicher Börde ist durch ihre gegen Westen wenig geschützte Lage sowie ihre Offenheit nach Norden gegen das Niederrheinische Tiefland gekennzeichnet, so dass sich ein eher atlantisches Klima eingestellt hat. Zwar werden im Bereich Jülich, Bergheim und Titz die jährlichen Niederschlagssummen von 600 mm selten erreicht, in allen anderen Regionen sind aber mit 700-800 mm weitaus höhere Mengen zu verzeichnen. Im deutlichen Gegensatz dazu ist die Zülpicher Börde in allererster Linie durch ihre Wind- und Regenschutzlage im Lee der Eifel und Ardennen gekennzeichnet. Jahresniederschläge unter 600 mm, in der Voreifelregion um die Stadt Zülpich teilweise unter 550 mm, sind keine

Seltenheit. Ein deutliches Charakteristikum der Zülpicher Börde ist daher die Einstufung als Wassermangelgebiet. Die Durchschnittstemperaturen der Bördegebiete liegen bei ca. 9,5 °C.

Die Lössebene der Börderegion besitzt heute den Charakter einer flachen Agrarlandschaft. Vor allem ein ausgeprägter Weizen- und Zuckerrübenanbau prägen einen Großteil des Bördegebietes. Dagegen verschiebt sich im Südwesten der Zülpicher Börde, aufgrund zunehmender Höhe und abnehmender Lössmächtigkeit, der Anbauswerpunkt zur Körnerwirtschaft bzw. zu höherem Grünlandanteil.

Den Ostflügel der Niederrheinischen Bucht bildet die **Kölner Bucht**, die im Westen durch den Steilrand der Villeregion und im Osten durch den Vorderwesterwald und das Bergische Land begrenzt wird. Insgesamt 2 Untersuchungsstandorte (8/9) liegen in diesem Naturraum.

Das Relief ist durch die nach dem Gebirgsaustritt bei Bonn-Bad Godesberg verbreiterte Flussterrassenlandschaft des Rheins gekennzeichnet. Eine weitestgehend ebene Abdachung bedingt nur geringe Höhenunterschiede von ca. 50 m NN im Süden bis ca. 30 m NN im Norden.

Die Niederterrassenebenen, die den größten Teil der Kölner Bucht einnehmen, sind durchweg über den Terrassenschottern und -sanden mit 1-2 m mächtigen Hochflutlehm- und Hochflutsanden überlagert, die meist mittelschwere, tiefgründige Braunerde- und Parabraunerdeböden, z.T. auch Auenböden liefern. An die linksrheinischen Niederterrassen schließen sich westwärts die Lössplatten der Mittelterrassen an, die mit einer mächtigen Lössauflagerung von mehreren Metern den fruchtbarsten Teil der Kölner Bucht bedingen.

Die Kölner Bucht zählt mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9,6 °C zu den wärmsten Regionen Deutschlands. Schneefälle, die über mehrere Tage liegen bleiben, bilden die absolute Ausnahme. Wegen des Steigungsregens der umgebenden Höhenzüge sind mit durchschnittlich 650-800 mm relativ hohe Jahresniederschlagsmengen zu verzeichnen.

Die gesamte Kölner Bucht wird vorwiegend ackerbaulich genutzt. Zuckerrüben, Getreide und Kartoffeln stehen im Vordergrund der landwirtschaftlichen Produktion.

Niederrheinisches Tiefland

Das Niederrheinische Tiefland ist die natürliche nordwärtige Fortsetzung der Niederrheinischen Bucht. Im Osten bildet der Übergang zur Kreideschüssel der Westfälischen Tieflandsbucht, der Anstieg zum Niederbergischen Hügelland und der westliche Teil des Ruhrgebietes die Grenze des mit 4613,7 km² zweitgrößten Naturraumes Nordrhein-Westfalens. Im Westen und Norden geht der Naturraum in die niederländischen Landstriche am Niederrijn und der Waal über.

Charakteristisch für das Niederrheinische Tiefland sind die jüngeren tieferen Terrassen, die vor allem nach Norden hin in zunehmenden Maße das Bild beherrschen. In dieser Region und im Bereich der Niederrheinischen Sandplatte liegt jeweils ein Untersuchungsstandort.

Die *untere Rheinniederung* (Lage des Standortes 19), welche sich nordwärts an die mittlere Rheinniederung und die Köln-Bonner Rheinebene anschließt, stellt eine heute fast völlig offene Schwemmlandschaft dar. Im Norden geht der Naturraum ohne jede sichtbare Naturgrenze in die holländische Ijssel-Marsch über. In westlicher Richtung wird der Naturraum durch die Niederrheinischen Höhen begrenzt, im Osten ist der Terrassensand der Isselebene die Begrenzung der Unteren Rheinniederung.

Die Oberflächengestaltung der Flußniederungslandschaft kennzeichnet sich durch äußerst geringe Reliefunterschiede. Der Rheinstrom verliert während seines Laufes durch das Niederungsgebiet lediglich 11 Höhenmeter.

Infolge des Schwemmlandcharakters der Region wechseln die vorkommenden Bodenarten sehr stark und reichen von schluffig-tonigen Lehmen bis hin zu anlehmigen Sanden. Die jungen Hochflutbildungen zeichnen sich im Allgemeinen durch hohen Kalkgehalt und Böden mit mittlerem bis hohem natürlichem Nährstoffvorrat aus. Vor allem stromabwärts in nördlicher Richtung dominieren die hoch- und grundwasserbeeinflussten Auenböden, die oft eine tonig-lehmige Bodentextur aufweisen (Abb. 19)

Die *Niederrheinische Sandplatte* (Lage des Standortes 4) grenzt östlich an das Emscher- und Westmünsterland. Im Westen wird die Einheit scharf durch den markanten und meist steilen Terrassenabfall zur Niederterrasse der mittleren Niederrhein- und Isselebene begrenzt.



Abb. 19: Grundwasserbeeinflusste Auenböden der Unteren Rheinniederung

Das Relief und die Bodenverhältnisse unterscheiden sich nur wenig von dem östlich anschließenden Westmünsterland. Ein Süd-Nord-Gefälle von ca. 80 m NN auf rund 40 m NN und ein Ost-West-Gefälle um durchschnittlich 15 m wird jedoch durch die Oberflächengestaltung im Gelände nicht unmittelbar sichtbar. Reliefausgleichend hat zudem die letzt- und nacheiszeitliche Überwehung mit Flugsanden gewirkt.

Obwohl der geologische Untergrund sehr verschieden ist, finden sich in dieser Region vornehmlich tiefgründige, mehr oder weniger sandige, podsoliierte Böden mit geringem Nährstoffvorrat.

Das Klima der unteren Rheinniederung und der Niederrheinischen Sandplatte weisen gemeinsam die Merkmale eines gemäßigten maritimen Klimas auf mit milden Wintertemperaturen und mäßig warmen Sommern. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge

liegen auf der Niederrheinische Sandplatte bei ca. 780 mm, in der Unteren Rheinniederung schwanken die Werte zwischen 680 mm und 760 mm.

In der landwirtschaftlichen Nutzung zeigt sich im allgemeinen ein charakteristischer Wechsel zwischen Grünland in den grund- und hochwasserbeeinflussten Niederungen und Ackerland mit Getreide und Mais auf den trockeneren Lehm- und Sandplatten.

Das gesamte Landschaftsbild wird von Weide- und Rindviehwirtschaft beherrscht. Die feuchten Auenlandschaften werden nordwärts zunehmend als Grünland genutzt, obwohl auch Ackerbau vertreten ist.

Süderbergland

Dem Süderbergland, welches auch als Sauerland im weiteren Sinne bezeichnet wird, ist als westliches Randgebiet das *Niederbergische Hügelland* zugeordnet. Aufgrund der hier vorherrschenden intensiven ackerbaulichen Nutzung auf schluffreichen Lössböden ist dieses Gebiet in Zusammenhang mit hohen Jahresniederschlagsmengen für die Abschätzung der

mechanischen Belastbarkeit von besonderem Interesse. Daher ist diese Untereinheit durch insgesamt zwei Standorte (12/18) repräsentiert.

Das Hügelland im Nordwesten der sauerländischen Großlandschaft wird im Norden und Süden durch die Längstalszonen der unteren Ruhr und der mittleren Wupper begrenzt. Westlich bildet der Sandstreifen der rheinischen Mittelterrasse eine scharfe Grenze gegen die Mittlere Niederrheinebene, im Osten schließt das Untere Sauerland an.

Ein Großteil des Niederbergischen Hügellandes besteht aus lang gestreckten Höhenrücken und runden Kuppen. Von Westen nach Osten als auch von Süden nach Norden steigt es auf Höhen von nur wenig über 250 m NN allmählich an.

Die westlich gelegenen Niederterrassen haben durch eine Überlagerung mit diluvialen Schmelzwassersanden zu einer Ausgleichung der einzelnen Terrassenstufen geführt. Östlich hingegen werden die rheinischen Hauptterrassen durch eine mehr oder weniger zusammenhängende Lössauflage überdeckt. Aus dem Löss, der aufgrund der hohen Niederschlagsmengen nahezu entkalkt ist, haben sich Parabraunerden entwickelt, die die fruchtbarsten Böden des bergischen Landes darstellen. Aufgrund des teilweise hügeligen Reliefs haben Umlagerungsprozesse zur Ausbildung von Kolluvien geführt. Auf den Talhängen herrschen dagegen flachgründige Verwitterungsböden vor, die zur landwirtschaftlichen Nutzung nicht geeignet sind.

Ein wesentlicher Unterschied zu der Zülpicher und Jülicher Börde bzw. den Hellwegböden liegt in den verhältnismäßig hohen Niederschlagsmengen, die bis zu 1100 mm reichen. Das Klima kann als atlantisch bezeichnet werden. Aufgrund der hohen Jahresniederschläge und der hügeligen Landschaft sind die schluffreichen Böden in diesem Gebiet stark erosionsgefährdet.

Die Talsohlen mit ihren vorwiegend schweren Lehmböden werden als Grünland genutzt. Auf den lössbegünstigten Standorten wird intensiver Ackerbau mit Anbau von Getreide, Zuckerrüben und Winterraps betrieben.

Siebengebirge

Der Naturraum, der südöstlich an die Kölner Bucht grenzt, zählt zwar zur Untereinheit des Rheinwesterwaldes, wird aber aufgrund seiner vulkanischen Prägung der Einteilung nach

DINTER (1999) zufolge als gesonderte Großlandschaft aufgeführt. Aufgrund der Formenvielfalt der Böden ist dieses Gebiet in die Untersuchungen aufgenommen worden.

Das Siebengebirge gehört zum südlichsten rechtsrheinischen Absenkungsbereich der Niederrheinischen Bucht. Es ist ein im Bereich der Städte Königswinter und Bad Honnef gelegenes Gebirge vulkanischen Ursprungs, das aus mehr als 40 Bergen und Anhöhen besteht.

Das Gebiet ist durch Terrassenriedel und Hügel sowie durch zum Teil tiefeingeschnittene Täler und Tälchen außerordentlich stark gegliedert. Die maximale Höhe bildet der Ölberg mit 460 m NN, im Untersuchungsgebiet schwankt die Höhenlage zwischen 110 m NN und 195 m NN.

Der Untergrund des Naturraumes baut sich aus unterdevonischen Gesteinen des Grundgebirges - vorwiegend Ton- und Sandsteine - auf, die aufgrund der vulkanischen Aktivitäten von Trachyt und Basalt überlagert wurden. Daneben hat sich während des Hochglazials der letzten Eiszeit Löss an windabgewandten Stellen angesammelt, der heute vorwiegend als entkalkter Löss auf den Hochflächen, flacheren Hängen, in Hangmulden und Tälern vorkommt. Die beschriebenen Substrate bilden das Ausgangsmaterial für die Entwicklung zahlreicher Bodentypen. Neben den aus Löss entstandenen Parabraunerden,



entwickelten sich aus Basalt und Trachyttuff vorwiegend ton- und basenreiche Braunerden. Pseudogleye bildeten sich aus dem oberflächennah anstehenden Tonstein, der aufgrund seiner Dichtlagerung eine wasserstauende Wirkung ausübt (Abb. 20). Hinzu kommen die Pelosole, teils violett gefärbt, aus der ehemals tropischen Verwitterung entstandene fersiallitische Böden.

Das Siebengebirge liegt im maritimen Klimabereich mit Jahres-Durchschnittstemperaturen zwischen 8 °C und 9 °C und Jahresniederschlägen um die 730 mm. Vor allem in den Talbereichen ist das milde Klima der Köln-Bonner-Bucht noch deutlich zu spüren.

Abb. 20: Pseudogley aus Tonstein im Siebengebirge

3.2.3 Bodenbewirtschaftung

Im Hinblick auf die Bodenbewirtschaftung wurde im Rahmen einer Befragung der Betriebsleiter die Art der *Primärbodenbearbeitung* (Wendend/Konservierend/Direktsaat) und die damit verbundene tatsächliche Eingriffsintensität (Bodenbearbeitungstiefe) ermittelt. Im folgenden wird der Definition nach LÜTKE ENTRUP & OEHMICHEN (2000) unter der *wendenden Bodenbearbeitung* (konventionelle Bodenbearbeitung) die Lockerbodenwirtschaft verstanden, bei der der Boden mit dem Scharpflug auf volle Krumentiefe gedreht und intensiv aufgelockert wird. Beim Verfahren der *konservierenden Bodenbearbeitung* erfolgt eine etwas flachere, nicht wendende Bodenbearbeitung mit z.B. Flügelschargrubbern oder Schälgrubbern. Der Boden wird nur grob aufgebrochen, Pflanzenreste bleiben an der Bodenoberfläche und schützen diese gegen Witterungseinflüsse. Bei der *Direktsaat* wird auf die Grundbodenbearbeitung völlig verzichtet. Die Saatablage erfolgt durch Saatschlitze oder Saatrillen.

Die Angaben zur Art und Tiefe der Bodenbearbeitung waren ausschlaggebend für die Wahl der spezifischen Untersuchungstiefen. Daher erfolgte die Befragung immer vor den bodenkundlichen Untersuchungen. Zusätzlich wurde die schlagspezifische Fruchtfolge erfragt. Alle Betriebsleiter wurden persönlich befragt. Die genauen Angaben zur Bodenbewirtschaftung sind dem Anhang A1 zu entnehmen.

3.2.4 Technische Ausstattung

In einem weiteren Teil der Befragung stand die landtechnische Ausstattung der Betriebe im Vordergrund, um daraus die auf den Boden wirkenden Drücke durch Schlepper, Ernte- und Transportmaschinen abzuleiten (Bodenbeanspruchung).

Für jeden Schlepper, der zu Bodenbearbeitungs-, Pflege- oder Erntemaßnahmen eingesetzt wird, wurde der Typ und die in Zusammenhang mit der Druckausbreitung stehenden maschinenspezifischen Parameter, wie Radlast, Bereifung, Reifeninnendruck ermittelt.

Erntearbeiten von Getreide, Zuckerrüben oder Mais werden bei den Betrieben größtenteils durch Lohnunternehmer durchgeführt. Da Typ und Größe dieser Arbeitsmaschinen häufig wechseln und die technischen Daten den Betriebsleitern oftmals nicht genau bekannt waren, galt es für alle Betriebe gleichermaßen eine Auswahl typischer Erntemaschinen zu treffen und diese auf ihre Bodenbeanspruchung hin zu bewerten.

Auf Ackerland eingesetzte Transportmaschinen werden vorwiegend bei viehhaltenden Betrieben im Rahmen der Maisernte oder zur Ausbringung organischer Dünger eingesetzt (Standort 1/2/3/4/5/6/11/19). Auch hier wurde die Druckwirkung auf den Boden an einer Auswahl typischer Transportmaschinen beurteilt.

Die Radlast ermittelte sich als Gesamtmasse dividiert durch die Anzahl der Räder. Bei Zugmaschinen wurde mit leerer Gesamtmasse, bei den Ernte- und Transportmaschinen immer mit der maximalen Gesamtmasse (volle Bunkerauslastung bzw. maximale Nutzlast) gerechnet. Die Achslastverteilung staffelte sich bei Schleppern mit 60 % (hinten) und 40 % (vorne). Eine Ausnahme bilden Systemschlepper (z.B. Typ JCB), bei denen die Verteilung ca. 50 % (hinten) und ca. 50 % (vorne) beträgt. Bei Mähreschern wird eine Gewichtung von 30 % (hinten) und 70 % (vorne), bei Maishäxslern von 40 % (hinten) und 60 % (vorne) und bei Zuckerrübenrodern (Selbstfahrer) von 50 % (hinten) und 50 % (vorne) bzw. jeweils 33 % bei 6-facher Bereifung angenommen. Bei Maishäxsel- und Flüssigmisttankwagen errechnete sich die Radlast ebenfalls als Gesamtmasse (Bruttogewicht minus Stützlast) dividiert durch die Anzahl der Räder.

Die Standardbereifung der Ernte- und Transportmaschinen wurde aus dem Schlepper- und Landmaschinenkatalog (PROFI 2003) ermittelt, die Bereifung der Schlepper konnte vor Ort erfasst werden.

Die Erhebung der Reifeninnendrucke gestaltete sich als schwierig. Teilweise waren die genauen Reifeninnendrucke den Betriebsleitern nicht bekannt bzw. bei stichprobenartigen Überprüfungen entsprachen die Angaben nicht den tatsächlichen Gegebenheiten. Um die für die Berechnung der Druckausbreitung unabdinglichen Parameter zu berücksichtigen, wurden für Schlepper Reifeninnendrucke von 1,5 bar, für Erntemaschinen von 2 bar und für Transportmaschinen von 2,5 bar angenommen. Auf die Potenziale der Bodendruckminderung in Zusammenhang mit einer Reifeninnendrucksenkung durch automatische Regelanlagen wird im Rahmen der Diskussion noch einmal verstärkt eingegangen.

Die Abschätzung der Druckausbreitung durch die eingesetzte Landtechnik erfolgte mit dem Excel-Programm TASC (Tyres/Tracks And Soil Compaction), entwickelt von DISERENS & SPIESS (2004, Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Schweiz). Die Anwendung berechnet durch die Eingabe von Radlast, Bereifung und Reifeninnendruck die spezifische Kontaktfläche und den mittleren Kontaktflächendruck. Die Druck- und Spannungsausbreitung im Boden beruhen primär auf der Theorie nach BOUSSINESQ (1885, zit. in FUCHS 1974), bei der die einzelnen Spannungen unter einer punktförmigen

Last im elastischen, homogenen und isotropen Raum berechnet werden. Unter Einbeziehung von Konzentrationsfaktoren wird die Druckzweibel modifiziert, um somit den unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften der Böden Rechnung zu tragen. Im Programm wurden die Algorithmen zur Berechnung der Spannungsausbreitung durch mehr als zehn zwischen 1994 und 1999 durchgeführte Feldversuche verfeinert.

Bei den Druckberechnungen wurden für Arbeiten im Sommer bzw. für Arbeiten im Herbst/Frühjahr unterschiedliche Konzentrationsfaktoren jeweils für feste und weiche Böden angenommen.

Die Schlepperausstattungen der Betriebe sowie die zugrunde gelegten Ernte- und Transportmaschinen sind mit den Ergebnissen der Druckausbreitungsberechnungen in den Anhängen A7 und A8 dargestellt.

Die Erhebungen der Landmaschinendaten dienen dazu, die üblicherweise in nordrhein-westfälischen Betrieben eingesetzte Landtechnik zu erfassen und auf ihre Bodenbeanspruchung hin zu bewerten.

3.3 Bodenuntersuchungen

Neben der Erfassung der betrieblichen Situation wurden auf jedem Schlag meist zwei Profilgruben ausgehoben und in 3 Tiefen die in Abb. 14 (roter Kasten) aufgeführten Bodenuntersuchungen durchgeführt.

Um die Probeentnahmestelle sinnvoll zu wählen, musste vorab ohne großen Zeitaufwand mit Hilfe von Feldmethoden der Bodenaufbau einleitend erfasst werden. Dazu eignete sich die Messung des Eindringwiderstandes mit dem Penetrometer (vgl. Kapitel 3.3.2). Mit dieser schnellen Untersuchungsmethode bekommt man einen repräsentativen Überblick über die Fläche. Zudem ist die Sensibilität gegenüber Strukturunterschieden sehr hoch (KNITTEL & STANZEL 1976, VOORHEES 1978, HARTGE & BOHNE 1985). Dies ermöglicht die Ausgrenzung inhomogener Zonen.

Ziel bei der Beprobung ist es, ein möglichst repräsentatives Bild der üblich bewirtschafteten Fläche außerhalb der stark frequentierten Fahrgassen- und Vorgewendebereiche wiederzugeben.

Die Untersuchungstiefen umfassen den Bereich der Krume (ca. 15 cm), den Bereich der Krumbasis (ca. 30 cm) und den Bereich des Unterbodens (ca. 50 cm). Die **Krume** spiegelt

den Tiefenbereich wider, der mechanischen Belastungen direkt ausgesetzt ist. Je nach Eingriffsintensität der Bodenbearbeitung ist diese Bodentiefe ständigen Lockerungsmaßnahmen unterworfen. Bei Direktsaat oder Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung wird dieser Bodenbereich u.U. nicht mehr gelockert. Unter der **Krumenbasis** wird im Folgenden die Tiefe zwischen 25 und 35 cm verstanden. Je nach (ehemaliger) Pflugtiefe befindet sich diese oftmals im Übergang zwischen dem Ap und dem unterhalb anstehenden Horizont (z.B. Al-Horizont) und bildet den Bereich etwaiger Pflugsohlen. Der **Unterboden** beschreibt die Bodentiefen von 45-60 cm. Er dient der Überprüfung der Tiefenwirkung mechanischer Belastungen. Gerade im Bereich des Unterbodens ist mit hoher Persistenz von Verdichtungen zu rechnen (u.a. LOGSDON et al. 1992, DÜRR et al. 1995). Diesem Bodenbereich muss deshalb besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. In 2 Sonderfällen wurden zur Beurteilung der geogenetisch bedingten Bodenstabilität die Tiefen um 70 cm untersucht (Standort 3b und 6a). Sie werden im Folgenden als **tieferer Unterbodenbereich** bezeichnet.

Zur Ermittlung der bodenchemischen Kenngrößen und der Korngrößenverteilung wurden in den Profilgruben 1 und 2 eines jeden Schlages gestörte Mischproben aus den Tiefen der Krume, der Krumenbasis und des Unterbodens entnommen.

An jeder Untersuchungstiefe sind feldbodenkundliche Parameter erhoben sowie die Luftleitfähigkeit (3-fache Wdh.) in-situ gemessen worden. Entlang der Stirnseite der Profilgruben wurden 80 cm tiefe Eindringwiderstandsmessungen in 10-facher Wiederholung in einem Abstand von ca. 10 cm durchgeführt.

Für die Laboranalysen wurden ungestörte Bodenproben (Stechzylinder 100 cm^3) in 10-facher Wiederholung vertikal entnommen und auf die verschiedenen Parameter analysiert. Parallel wurden Stechzylinder (236 cm^3) in 2-facher Wiederholung vertikal zur Ermittlung der Vorbelastung entnommen. Durch die Höhenveränderung der Bodenprobe während des Belastungsversuchs konnte zusätzlich die auflastabhängige Veränderung der Lagerungsdichte und der Porengrößen ermittelt werden.

Im Zuge der wendenden Bodenbearbeitung wird ein sehr lockeres Bodengefüge geschaffen. Aufgrund dessen konnten bei einzelnen Flächen keine Stechzylinder im Krumenbereich entnommen werden.

Die Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen sind in tabellarischer Form in den Anhängen A2-A6 abgebildet. Die Tiefencharakterisierung erfolgt durch die Buchstaben K

(Krume), KB (Krumenbasis), UB (Unterboden) und tUB (tieferer Unterbodenbereich). Sie sind den jeweiligen Standort- und Profildnummern bzw. Schlagbuchstaben nachgestellt: „1 a 1 K“ bedeutet: Standort 1, Schlag a, Profilgrube 1, Krume).

Insgesamt umfasst die Datengrundlage für die statistische Verrechnung 23 landwirtschaftliche Betriebe und 46 Flächen. Es wurden 84 Profilgruben ausgehoben und 224 Tiefenhorizonte durch insgesamt 2650 Stechzylinder (2152 à 100 cm³; 498 à 236 cm³) beprobt.

3.3.1 Bodenphysikalische Messungen

- Bestimmung der **Korngrößenverteilung** durch Siebung und Sedimentation (Pipettanalyse) nach KÖHN (1928) am Feinboden (<2 mm); zuvor Carbonat- und Humuszerstörung mittels HCl bzw. H₂O₂ und Dispergierung mit Na₄P₂O₇.
- Bestimmung der **Kornrohichte** dF mittels Pyknometer nach DIN ISO 11508 (1998).
- Gravimetrische Bestimmung der **Lagerungsdichte** Ld (Trockenrohichte) durch Trocknung der Stechzylinder (100 cm³) bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz (HARTGE & HORN 1992).
- Bestimmung des **Gesamtporenvolumens** rechnerisch aus der Lagerungsdichte des Bodens und der Kornrohichte: $GPV = 1 - \left(\frac{Ld}{dF} \right) \times 100$.
- Bestimmung der **Porengrößenverteilung** nach dem von RUSSEL & RICHARDS (1938) beschriebenen Verfahren mit Drücken von 60 hPa und 300 hPa. Diese entsprechen einer Wasserspannung von pF 1,8 und pF 2,5 bzw. den Äquivalentporendurchmessern von 50 µm (weite Grobporen) und 10 µm (enge Grobporen). Der Feinporenanteil (Äquivalentporendurchmessern= 0,2 µm) wurde an gestörten Bodenproben bei 15000 hPa (pF 4,2), der Anteil an Mittelporen (Äquivalentporendurchmessern= 10-0,2 µm) rechnerisch durch Differenzbildung ermittelt.
- Bestimmung der **gesättigten Wasserleitfähigkeit** (kf-Wert) unter stationären Bedingungen nach dem Heberprinzip mittels Anwendung der „Darcy-Gleichung“ (DIN 19683-9 1998).
- Bestimmung der **intrinsic Luftleitfähigkeit** (k₀₀-Wert) unter Berücksichtigung von Viskosität, Dichte und Schwerkraft des Fließmediums Luft. Die Ermittlung der

Luftleitfähigkeit erfolgte bei pF 2,5 unter Einhaltung eines konstanten Druckgradienten von 2 hPa. Durch die Wahl eines niedrigen Arbeitsdruckes konnte ein weitgehend turbulenzfreies Fließen der Luft garantiert werden (EIJKELKAMP 1983).

- Bestimmung der *in-situ Luftleitfähigkeit* (PL-Wert) mit einem mobilen Gerät unter Berücksichtigung der Darcy-Gleichung. Der Messdruck wird als hydraulische Druckhöhe angesetzt (UGT 1999).
- Bestimmung der *Packungsdichte* an der Profilwand im Felde. Diese beschreibt den Grad der Kompaktheit des Bodens. Wichtige Bewertungsparameter sind dabei die Aggregatgröße und die Lagerungsart, die die Beschaffenheit der Aggregatzwischenräume kennzeichnen. Daneben wird der Verfestigungsgrad als Maß für den aktuellen Zusammenhalt der Aggregate, der Makroporenanteil (Intergranularräume, Risse, Röhren etc.) sowie die Wurzelverteilung bewertet. Die genaue Methode ist in der DIN 19682-10 (1998) beschrieben.
- Bestimmung der *Effektiven Lagerungsdichte* entsprechend dem Bestimmungsschlüssel der KA5 (AG Boden 2005). Makrogrobgefügeform, Verfestigungsgrad, Rissbreite, Mikrogrobggefügeform, Größenklasse und Lagerungsart der Aggregate sind maßgebende Kriterien.
- Bestimmung der *Spatendiagnose* nach dem Verfahren von DIEZ & WEIGELT (1997). Die Bewertung erfolgt aufgrund von optischer, fühlbarer und riechbarer Wahrnehmung.
- Bestimmung des Anteils makroskopisch sichtbarer Poren.

3.3.2 Bodenmechanische Tests

- Vorbelastung

Das auflastabhängige Setzungsverhalten der Böden wurde im einaxialen Druckversuch bei verhinderter Seitenausdehnung in einer Drucksetzungsapparatur bestehend aus 3 pneumatischen Ödometern bestimmt. In der Drucksetzungsanlage befindet sich die Stechzylinderprobe (236 cm^3) zwischen zwei Sintermetallplatten, die drainierte Bedingungen schaffen (Abb. 21). Die Verwendung möglichst flacher Stechzylinder (Höhe=3 cm, Durchmesser=10 cm) und deren schwebende Lagerung minimiert die Wandreibrungskräfte. Jede Stechzylinderprobe erfuhr im Ödometer die gleiche Belastungsabfolge (10–650 kPa), wobei die Laststufen nacheinander an einer

Bodenprobe appliziert wurden. Dadurch konnten Heterogenitäten zwischen aus gleicher Tiefe entnommenen Stechzylindern nahezu ausgeschlossen werden. Nach Aufbringen der Last wurde die Setzung mittels elektronischer Wegaufnehmer mit einer Genauigkeit von 1/1000 mm erfasst und an einen angeschlossenen PC übertragen. Die nötige Auflastzeit je Laststufe bis zur nahezu völligen Sekundärsetzung variierte je nach Bodenart von wenigen Minuten (Sandböden) bis zu mehreren Stunden (Tonböden). Erst nachdem die Höhensetzung abgeklungen war ($<0,01$ mm/h), wurde die Belastung gesteigert.

Die Auswertung der Drucksetzungskurven erfolgte handgrafisch nach dem Verfahren von CASAGRANDE (1936) (Abb. 22). Durch den Punkt A, der die größte Krümmung der Drucksetzungskurve darstellt, wird eine Parallele zur Abzisse und eine Tangente an die Kurve selbst gezogen. Die Gerade AB teilt den Winkel zwischen den beiden genannten Geraden in zwei gleiche Teile α . An den unteren Teil der Erstverdichtungsgerade wird die Tangente BC gezogen. Die Vorbelastung P_v wird durch die Abzisse bis zum Schnittpunkt der Geraden AB und BC angegeben.

- Eindringwiderstand

Zur Ermittlung des mechanischen Eindringwiderstandes des Bodens wurde ein elektronisches haftreibungsfreies Penetrometer mit einem für ackerbauliche Untersuchungen üblichen Sondierkonus (Messfläche 1 cm^2 , Winkel 60°) eingesetzt (Abb. 23). Die Datenerfassung erfolgt in 1 cm-Abschnitten. Die gemessenen Werte werden in MPa angegeben und können über eine PC-Schnittstelle direkt an eine EDV-Anlage übertragen werden. Um die Vergleichbarkeit der Eindringwiderstandsmessungen zu gewährleisten, sollten die Messungen bei 80-90 % Feldkapazität durchgeführt werden. Zur Sicherstellung wurde daher parallel zur Stechzylinderentnahme die Bodenfeuchte mit einer TDR-Sonde bestimmt.

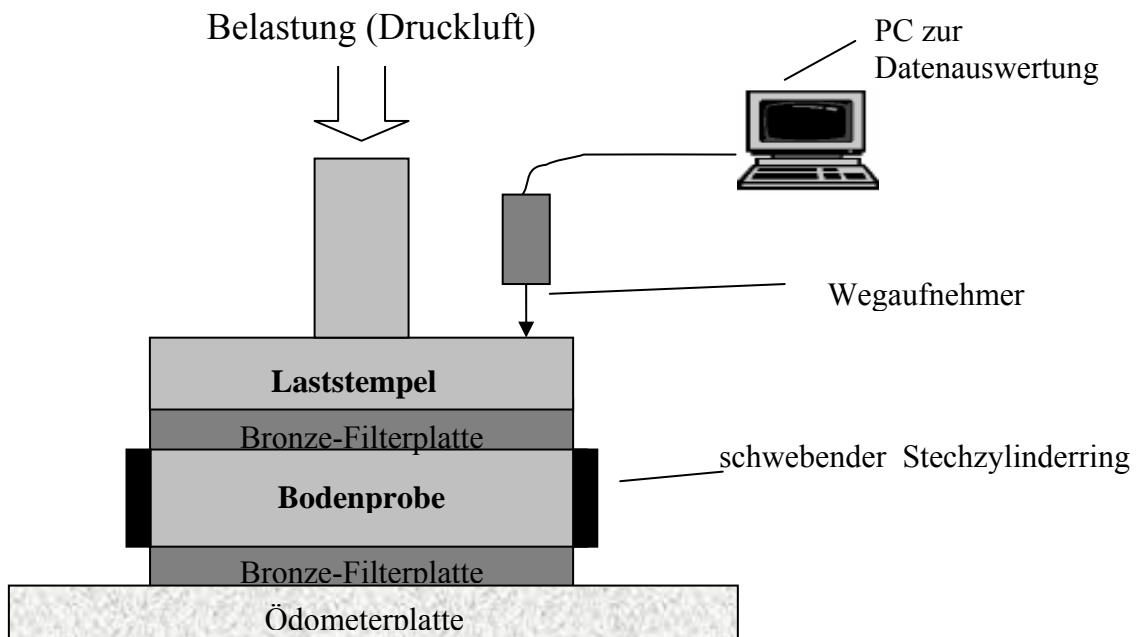


Abb. 21: Aufbau der Drucksetzungsanlage (Ödometer)

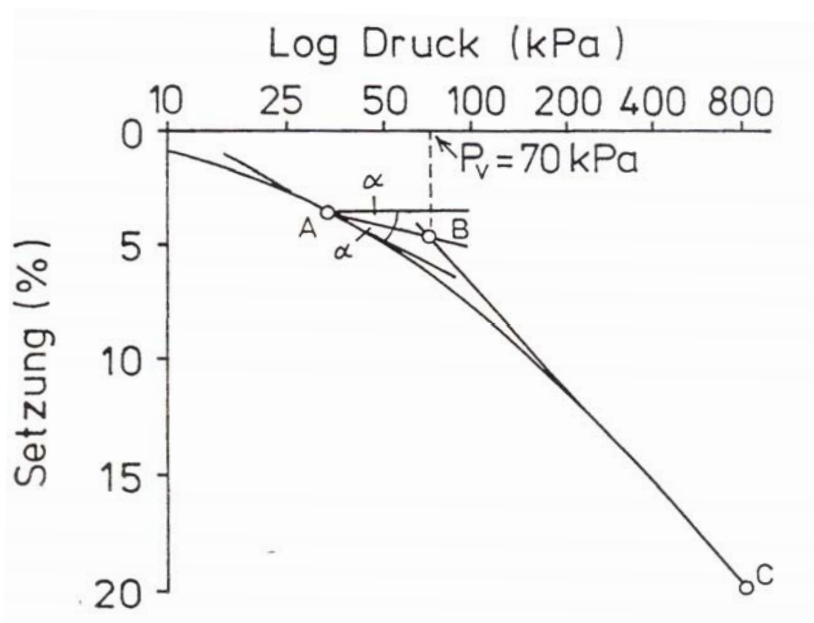


Abb. 22: Ermittlung der Vorbelastung aus der Drucksetzungskurve nach CASAGRANDE (1936)

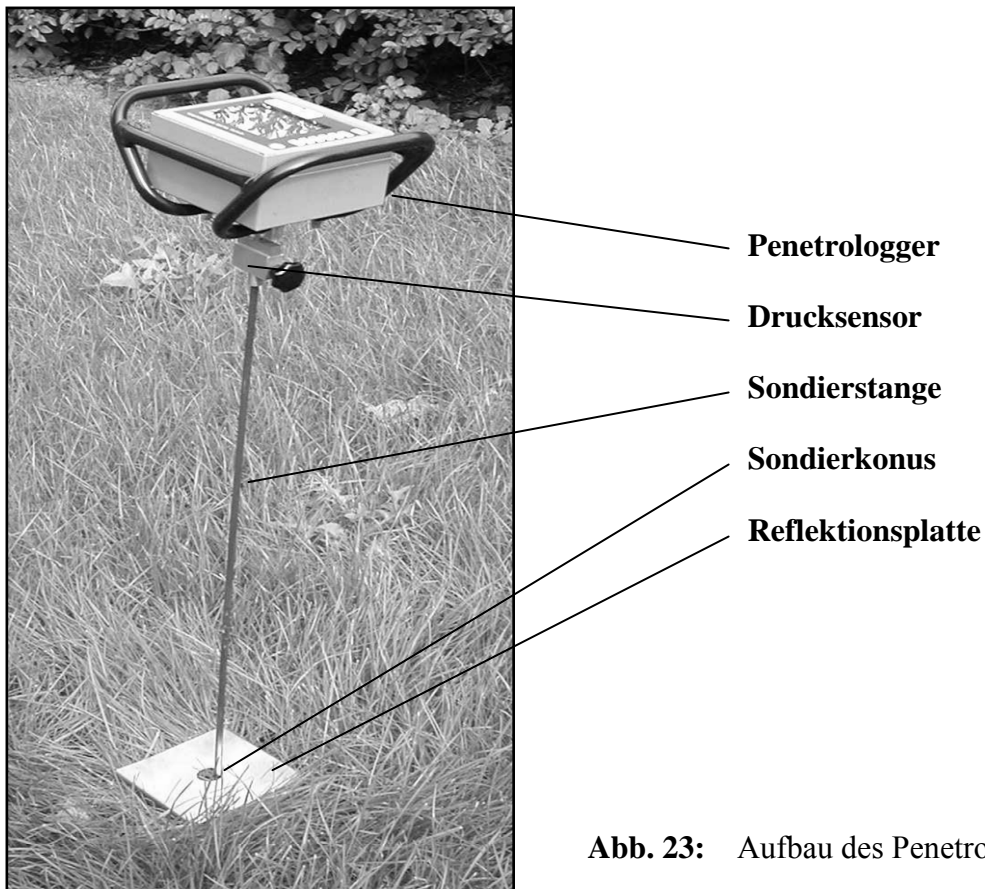


Abb. 23: Aufbau des Penetrometers

3.3.3 Bodenchemische Kennzeichnung

- Bestimmung des *pH-Wertes* ($0,01 \text{ mol CaCl}_2$)
Boden-Lösungsverhältnis: 10 g Boden zu 25 ml CaCl_2
- Bestimmung des *organischen C-Gehalts* durch trockene Veraschung im O_2 -Strom und coulometrische Messung des in NaOH eingeleiteten CO_2 mit einem Gasanalysegerät (SCHLICHTING et al. 1995).
- Bestimmung des *Carbonatgehaltes* durch coulometrische Messung mittels Gasanalysegeräte (SCHLICHTING et al. 1995).

3.4 Klassifizierung physikalischer und mechanischer Kenngrößen

Das Indikatorenmodell (LEBERT et al. 2004) stellt insgesamt 5 Parameter, nämlich Luftkapazität, Gesättigte Wasserleitfähigkeit, Packungsdichte, Spatendiagnose, Effektive Lagerungsdichte vor, die sich zur qualitativen Beurteilung von Bodengefügeschäden im Sinne eines bodenschutzrechtlichen Vollzugssystems eignen sollen.

Daneben wurden im Rahmen dieser Arbeit eine Fülle weiterer Kennwerte (Lagerungsdichte, Porenverteilungsgrößen, Luftleitfähigkeit, Vorbelastung, Eindringwiderstand, Makroporenanteile) erhoben. Auch wenn bei diesen nicht immer ein direkter Zusammenhang zur Bodenschadverdichtung im Sinne funktionaler Bodenprozesse besteht, so geben sie wertvolle Hilfen bei der Beschreibung von Bodengefügezuständen.

Die Porenverteilungsgrößen geben Aufschluss über Verdichtungsprozesse (Porenverteilung). Durch mechanische Belastungen kann der Anteil an weiten Grobporen verringert und der Anteil enger bzw. mittlerer Poren erhöht werden (BLACKWELL et al. 1986, DUMBECK & HARRACH 1985). Die Vorbelastung und die Lagerungsdichte sind die elementaren Parameter zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung nach den in Kapitel 2.2 vorgestellten Prognosemodellen. Der Eindringwiderstand ist eine leicht zu ermittelnde Kenngröße, die als Hilfskriterium zur Eingrenzung möglicher Schadverdichtungsbereiche nützt. Die Luftleitfähigkeit beschreibt neben der Wasserleitfähigkeit sehr sensibel die Kontinuität leitender Poren. Die Bestimmung der vertikalen Makroporen gibt Aufschluss über die biologische Aktivität des Bodens.

Um im weiteren Verlauf der Arbeit die Interpretation der einzelnen Parameter zu erleichtern, werden im Folgenden entsprechende Klassifizierungsschemata vorgestellt.

3.4.1 Feldbodenkundliche Parameter

Für die Klassifizierung der *Effektiven Lagerungsdichte* existiert ein Bestimmungsschlüssel nach der KA5 (AG Boden 2005), der diese im Hinblick auf die Gefügeausbildung mit einer 5-stufigen Skala bewertet. Gleichmaßen wird die *Packungsdichte* eingeteilt (DIN 19682-10 1998). Die Klassifizierung der *Spatendiagnose* erfolgt ebenfalls nach einem 5-stufigen Schema (DIEZ & WEIGELT 1997). Die Gefügebeurteilung reicht von 1 (günstig) bis 5 (ungünstig). Bei allen drei Parametern weisen die Stufen 4 und 5 auf Schadverdichtungen hin (LEBERT et al. 2004) (Tab. 6).

Tab. 6: Klassifizierung der Parameter zur Feldgefügeansprache

Eff. Lagerungsdichte <i>Stufe</i>	Packungsdichte <i>Stufe</i>	Spatendiagnose <i>Stufe</i>	Bezeichnung	
1	1	1	sehr gering	günstig
2	2	2	gering	↓
3	3	3	mittel	
4	4	4	hoch	
5	5	5	sehr hoch	ungünstig

Zusätzlich wurde der Anteil makroskopisch sichtbarer Poren am Bodenvolumen bestimmt und nach einem eigenen Schema bewertet (Tab. 7). Für die Einstufung ließen sich definierte Porengrößen nach der KA5 (AG Boden 2005) verwenden.

Tab. 7: Klassifizierung des Makroporenanteils am Bodenvolumen

Stufe	Bezeichnung	Beschreibung
		feine Makroporen = 0,5-1 mm grobe Makroporen \geq 1 mm
0	keine	keine Makroporen
1	gering	wenige feine und grobe Makroporen
2	mittel	mittelmäßig viele feine und grobe Makroporen
3	hoch	viele v.a. feine Makroporen
4	sehr hoch	sehr viele feine und grobe Makroporen

3.4.2 Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung

Die *Lagerungsdichte* zeigt eine Veränderung der Dichtlagerung zuverlässig und sensibel an. Eine Klassifizierung gibt die KA5 (AG BODEN 2005) (Tab. 8).

Tab. 8: Klassifizierung der Lagerungsdichte

Lagerungsdichte g/cm ³	Bezeichnung
<1,25	sehr gering
1,25 – 1,45	gering
1,45 – 1,65	mittel
1,65 – 1,85	hoch
>1,85	sehr hoch

Bei der Porengrößenverteilung stellen die *Luftkapazität* (weite Grobporen >50 µm) und der prozentuale Anteil an *engen Grobporen* (50-10 µm) bzw. *Mittelporen* (10-0,2 µm) wichtige Kenngrößen dar. Letztere beschreiben die nutzbare Feldkapazität (nFK), die den Wassergehalt in Volumenprozent angibt, der in den entsprechenden Poren gebunden und den Pflanzen als speicherbares Wasser zur Verfügung gestellt werden kann. Eine Klassifizierung der beiden Kennwerte zeigt die KA5 (AG Boden, 2005) auf, wobei die nFK an der Bewertung der Wasserversorgung der Kulturpflanzen orientiert ist (Tab. 9). Luftkapazitäten <5 Vol.-% deuten nach LEBERT et al. (2004) auf eine Behinderung der Sauerstoffnachlieferung hin.

3.4.3 Wasser- und Luftpermeabilität

Auf der Basis bodenkundlicher Untersuchungen gibt die KA5 (AG Boden 2005) ein Klassifizierungsschema für die *gesättigte Wasserleitfähigkeit*. Das Indikatorenmodell geht bei gesättigten Wasserleitfähigkeitswerten <10 cm/d in Kombination mit Luftkapazitäten <5 Vol.-% und Feldgefügeansprachen in den Stufen 4 oder 5 von einem schädlichen Bodengefüge aus.

Eine Klasseneinteilung des *Luftleitfähigkeitskoeffizienten* k_{00} geben KMOCH & HANUS (1965) (Tab. 10).

Für den Parameter *Luftleitfähigkeit* nach dem UGT-Verfahren existiert kein anerkanntes Bewertungsschema. PETELKAU et al. (2000, zit. in LEBERT et al. 2004) geben zur pflanzenökologischen Beurteilung einen Wert von 1 cm/s für sandige Moränenunterböden an, bei dessen Unterschreitung eine Schadverdichtung vorliegt.

Tab. 9: Klassifizierung der Luftkapazität (LK) und der nutzbaren Feldkapazität (nFK)

LK (Vol.-%)	Bezeichnung	nFK (mm)
<2	sehr gering	<60
2 – 4	gering	60 – 140
4 – 12	mittel	140 – 220
12 – 20	hoch	220 – 300
>20	sehr hoch	>300

Tab. 10: Klassifizierung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) und der Luftleitfähigkeit (k_{00})

kf (cm/d)	Bezeichnung	k_{00} (cm ²)
<1	sehr gering	<10
1 – 10	gering	10 – 22
10 – 40	mittel	22 – 46
40 – 100	hoch	46 – 100
100 – 300	sehr hoch	>100
>300	äußerst hoch	

3.4.4 Vorbelastung

Die Klassifizierung der *Vorbelastung* als Kennzeichnung der bodeneigenen Stabilität erfolgt nach der DIN V 19688 (2000). Die Vorbelastungswerte werden in gleich große Klassen zur Bewertung der Tragfähigkeit von Böden eingeteilt (Tab. 11).

Tab. 11: Klassifizierung der Vorbelastung

Stufe	Benennung	Vorbelastung (kPa)
1	sehr gering	<70
2	gering	70-90
3	mittel	90-110
4	hoch	110-130
5	sehr hoch	>130

3.4.5 Eindringwiderstand

Literaturangaben (CZERATZKI 1972, EHLERS 1983, DEXTER 1986, MAAS 1993, KRAHMER 1997) zeigen, dass keine einheitlichen Angaben von kritischen *Penetrometerwerten* existieren. Vielmehr liegen diese meist in Bereichen von 1-5 MPa. Eine genaue publizierte Klassifizierung des Eindringwiderstandes im Hinblick auf die Funktionalität des Bodengefüges ist nicht vorhanden.

3.5 Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden mit dem SPSS-Statistikprogramm 12.0 (SPSS 2004) ausgewertet. Aufgrund der unterschiedlichen Fragestellungen kommen verschiedene Analyseverfahren zur Anwendung.

Vor der statistischen Auswertung wurde geprüft, ob die entsprechenden Voraussetzungen (Normalverteilung bzw. Varianzhomogenität) vorliegen. Jeder Datenpool wurde mit dem KOLGOMOROV-SMIRNOFF-Test auf Normalverteilung überprüft. Bei den nichtnormalverteilten Parametern der Wasser- und Luftleitfähigkeit sind die Werte einer logarithmischen Transformation unterzogen und erneut getestet worden. Die Gleichheit der Varianzen wurde mit dem LEVENE-Test überprüft.

Um zunächst einen Überblick über das umfangreiche Datenmaterial zu erhalten, wurden verschiedene Lage- und Streuungsmaße der deskriptiven Statistik verwendet. Neben arithmetischen Mittelwerten kommen Häufigkeitsverteilungen sowie geometrische bzw. synonym arithmetisch logarithmierte Mittelwerte zur Anwendung. Letztere wurden gewählt, um den natürlich bedingten Schwankungsbreiten der Leitfähigkeitsparameter für Wasser und Luft gerecht zu werden. Zur Beschreibung der Streuung wurden Standardabweichung sowie Minimal- und Maximalwerte angegeben. Die Ergebnisse werden vielfach grafisch (Balken-, Säulen-, Linien-, Kreis-, Streu-, Flächendiagrammen) sowie mithilfe von Boxplots und Tabellen dargestellt.

Die Auswertung der Daten erfolgt je nach Fragestellung bodenart- bzw. standortspezifisch. Zum eindeutigen Verständnis wird die Gruppeneinteilung bei der jeweiligen Ergebnisdarstellung genauer erläutert.

Zur Beschreibung stochastischer Zusammenhänge zwischen einzelnen Variablenpaaren wurden Streudiagramme abgebildet und der Korrelationskoeffizient r nach PEARSON

berechnet. Dieser ergibt sich als Kovarianz dividiert durch das Produkt der Standardabweichung. Zur Ermittlung der Signifikanz von r für die Größe der Stichprobe N wurde mit den Irrtumswahrscheinlichkeiten von 5 %, 1 % und 0,1 % ein zweiseitiger Test durchgeführt. Ermittelte Signifikanzen werden durch folgende Symbole markiert:

n.s.	=	nicht signifikant	$p > 0.05$
*	=	signifikant	$p = 0,05$
**	=	hoch signifikant	$p = 0,01$
***	=	höchst signifikant	$p = 0,001$

Die Auswertung der Bodenbearbeitungsversuche erfolgte durch einfaktorielle varianzanalytische Verrechnung (ANNOVA). Dabei liegt folgende Hypothese zugrunde: Die verschiedenen Stufen des Faktors Bodenbearbeitung bewirken die Unterschiede in den einzelnen Parametern. Für alle Versuche wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=0,05$ angenommen. Die errechneten Mittelwerte wurden über einen multiplen Vergleichstest (STUDENT-NEWMAN-KEULS) auf Signifikanz geprüft und Unterschiede durch verschiedene Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

Aufgrund fehlender oder teilweise geringer Wiederholungszahlen konnte an einigen Stellen keine statistische Auswertung vorgenommen werden. In diesen Fällen erfolgt eine Beschreibung von Tendenzen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Um einen ersten Überblick über die in der Stichprobe vorkommenden Böden zu erhalten, sind in Abb. 24 die tiefenabhängigen Bodenarten von insgesamt 224 Untersuchungstiefen (46 Flächen, 82 Profilgruben, 2-3 Tiefen) in das Körnungsartendiagramm der KA5 (AG BODEN 2005) projiziert. Stark vertreten sind vor allem die tonigen Schluffe und die Sande bzw. die lehmigen Sande. Damit spiegeln die beprobten Böden in etwa die prozentualen Flächenanteile der vorkommenden Bodenarten NRWs wider (Tab. 12).

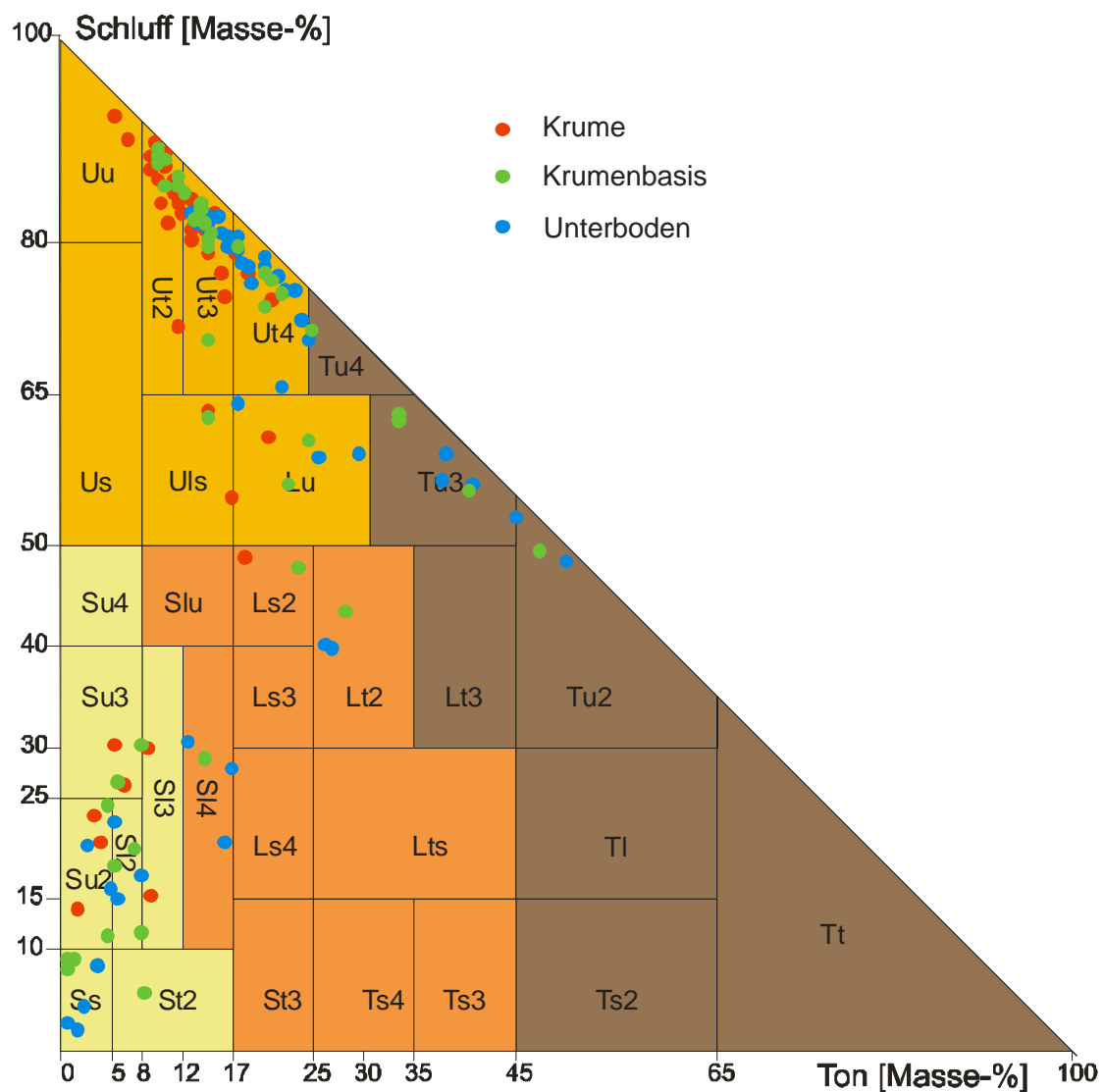


Abb. 24: Platzierung der Bodenarten von 224 Untersuchungshorizonten im Körnungsdiagramm nach der KA5 (AG BODEN 2005)

Tab. 12: Anteil der Bodenarten in NRW (GEOLOGISCHER DIENST 2004)

Gruppe	Bezeichnung	attributive Verwendung	% in NRW
1	lehmige Tone	lehmig-tonig	1
2	tonige Lehme	tonig-lehmig	8
3	tonige Schluffe	tonig-schluffig	52
4	sandige Lehme	sandig-lehmig	3
5	stark lehmige Sande	stark lehmig-sandig	5
6	sandige Schluffe	sandig-schluffig	2
7	lehmige Sande	lehmig-sandig	10
8	Sande	sandig	15
9	Skelettböden	feinbodenarm	0
0	Torfe	---	4

4.1 Zum Status der Bodenverdichtungen in Nordrhein-Westfalen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Freiland- und Laboranalysen dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine standardisierte, zusammenfassende Betrachtung des Bodengefügezustandes, die sich unter vollzugsrechtlichen Gesichtspunkten an den von LEBERT et al. (2004) vorgestellten 5 Indikatoren orientiert. Insgesamt wurden auf 43 Ackerflächen an 79 Profilgruben insgesamt 62 Krümen-, 74 Krümenbasis- und 76 Unterbodenhorizonte auf ihren Strukturzustand hin untersucht.

Die Strukturzustände des Bodens sind primär von der Korngrößenverteilung abhängig (HARTGE & HORN 1991). Da diese an einem Standort zwischen zwei Untersuchungsschlägen stärker variieren kann, erfolgt eine texturabhängige Auswertung der Daten. Dazu wurden die Ergebnisse der Untersuchungstiefen den Bodenartenhauptgruppen nach der KA5 (AG BODEN 2005) zugeordnet (Tab. 13). Die Klassenbildung begrenzt die Einflussfaktoren und ermöglicht somit den direkten Vergleich verschiedener Böden. Um die Tiefenlage und Mächtigkeit eventueller Verdichtungshorizonte zu erfassen, wurden zusätzlich die einzelnen Beprobungstiefen differenziert betrachtet.

Tab. 13: Einteilung der Bodenarten in Bodenartenhauptgruppen nach KA5 (AG Boden 2005)

Bodenarten- hauptgruppe		Bodenarten- gruppen		Bodenarten- untergruppe
Symbol	Bezeichnung	Symbol	Bezeichnung	Symbol
t	Ton	lt ut	Lehmtone Schlufftone	Tt, Tu2, Tl, Ts2 Tu3, Tu4, Lt3
l	Lehm	tl ll sl	Tonlehme Normallehme Sandlehme	Lts, Ts3, Ts4 Lt2, Ls2, Ls3, Ls4 Slu, Sl4, St3
u	Schluff	tu lu su	Tonschluffe Lehmschluffe Sandschluffe	Ut4, Lu Ut2, Ut3, Uts Us, Uu
s	Sand	us ls ss	Schluffsande Lehmsande Reinsande	Su3, Su4 St2, Su2, Sl2, Sl3 Ss

Das Kapitel 4.1 dient allein der Darstellung des Status quo hinsichtlich des Bodengefügezustandes. Die Validierung und Entwicklung von Prognosemodellen zur Vermeidung schädlicher Bodengefügeveränderungen ist Gegenstand der Kapitel 4.2 und 4.3.

4.1.1 Feldbefunde

Die Abb. 25 zeigt für alle 79 Profilgruben die arithmetischen Mittelwerte der Feldparameter. Die eingezeichneten schwarzen Linien geben die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte an; n entspricht der Anzahl der beprobten Horizonte. Verdichtungsschäden werden nach dem Indikatorenmodell in die Stufen 4 und 5 eingeordnet (rote Hintergrundmarkierung).

Bezogen auf den *Unterboden* wird mit Ausnahme eines Ackerschlagens bei den Feldparametern die kritische Stufe 4 **nicht** erreicht. Die Spatendiagnose, die primär auf die Bewertung des Pflanzenwachstums ausgerichtet ist, ergibt mit Ausnahme des Standortes 14g eine fast durchweg günstige Bewertung. Eine Erklärung, der mit durchschnittlich 2,8 relativ hoch eingestuften Sande ist primär auf das Klassifizierungsschema zurückzuführen. Sande, die vorwiegend Einzelkorngefüge aufweisen, werden nach dem Verfahren von DIEZ & WEIGELT (1997) nur den Stufen 3 für „optimal“ und 4 für „verdichtet“ zugeordnet. Das heißt, dass ein mit der Stufe 3 bewertetes Bodengefüge bei einzelkornstrukturierten Sanden

die günstigste Bewertung ergibt. Aggregierte Sande hingegen können nach dem Bewertungsschema von DIEZ & WEIGELT (1997) jedoch auch in die Stufen 1 und 2 bzw. 5 eingeordnet werden.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Effektiven Lagerungsdichte, wobei die Beurteilung der Dichtlagerung und der Gefügebildung zu geringen (Stufe 2) bis mittleren (Stufe 3) Einstufungen führt. Maximalwerte mit 3,5 werden an den Standorten 14g sowie 2b erreicht.

Die Packungsdichte, die ein Bodengefüge mit Erfüllung sämtlicher physikalischer Bodenfunktionen widerspiegelt, liegt bei den in Bodenartenhauptgruppen zusammengefassten Proben im günstigen Bereich und erreicht wieder auf dem Standort 14g mit 3,5 eine relativ schlechte Bewertung.

Bei der Darstellung der *Krumenbasis* weisen die Ergebnisse im Vergleich zum Unterboden deutlich höhere Einstufungen auf. Vor allem die Lehm Böden scheinen hier mit mehr als 3,5 bei allen drei Kenngrößen besonders verdichtet zu sein und kommen mit ihren Maxima in die Bereiche schadhafter Zustände. Zu beachten ist, dass der Stichprobenumfang dieser Bodenartenhauptgruppe mit insgesamt 5 untersuchten Profilgruben auf 3 Ackerschlägen verhältnismäßig gering ist. Auch bei den Schluffen und Sanden, die mit 59 untersuchten Krumenbasishorizonten einen großen Anteil der Stichprobe bilden, liegt bei insgesamt 16 Horizonten einer der Feldkennwerte mindestens im Stufenbereich 4.

Bei der Darstellung der *Krumenergebnisse* äußern sich zunehmend die Einflüsse der unterschiedlichen Bodenbearbeitung in der Variationsbreite zwischen den einzelnen Bodenartengruppen sowie innerhalb einer Gruppe. Die vorwiegend gepflügten Krumenbereiche der Sande (Einzel- und Krümelgefüge) lassen sich bei fast allen Parametern in die günstigsten Klassifizierungsstufen gliedern. Ausnahmen bilden der Standort 4a und der Standort 7a+b, wo alle Kennwerte mit maximalen Stufen im Bereich zwischen 3 und 4 von schlechteren Gefügeständen zeugen. Schluffböden hingegen weisen große Schwankungsbreiten auf, wobei an jeweils 3 Standorten mit jeweils 3 Schlägen (Standort 14g, Standort 18a, Standort 19a) die Spatendiagnose Schadverdichtungen anzeigt.

Teilweise konnten aufgrund eines bei der wendenden Bodenbearbeitung erzeugten Krümelgefüges keine Stechzylinder im Krumenbereich entnommen werden. Die Ergebnisse der Tone und Lehme stammen daher von insgesamt 2 Ackerschlägen (Standort 22a, Standort 9b) mit jeweils 2 untersuchten Profilgruben.

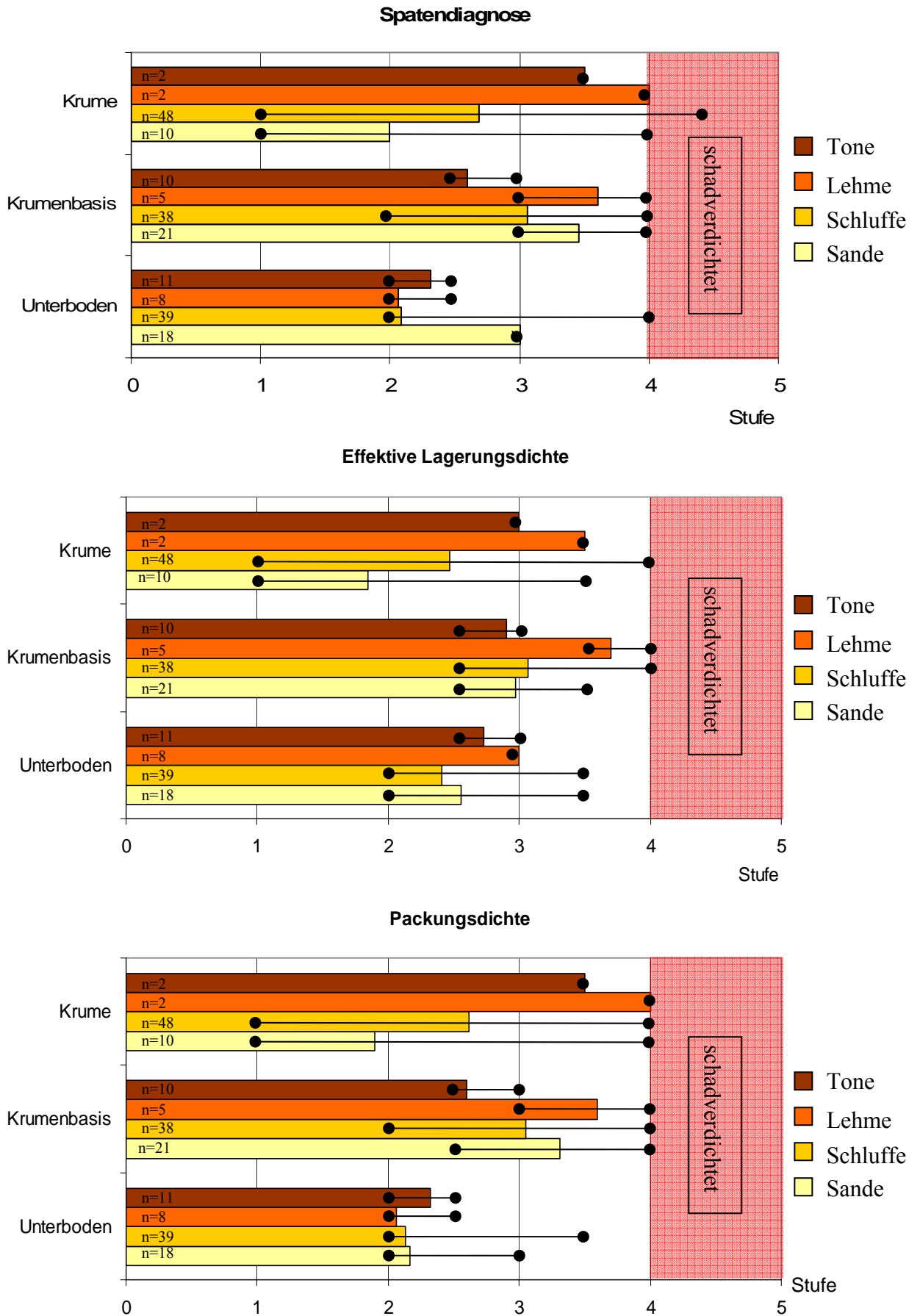


Abb. 25: Arithmetische Mittelwerte der Spatendiagnose, Effektiven Lagerungsdichte und Packungsdichte in 212 Untersuchungshorizonten in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden

Ein weiterer Bestandteil der Feldgefügeuntersuchung war die Bestimmung der vertikalen Makroporenanteile zur Abschätzung der biologischen Aktivität. In Abb. 26 sind diese für alle Untersuchungshorizonte in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe und der Untersuchungstiefe nach dem in Kapitel 3.4.1 aufgeführten Bewertungsschlüssel dargestellt. Hellere Farbtöne kennzeichnen höhere, dunklere Farbtöne geringere Makroporenanteile. Die äußeren Kreisringe spiegeln die Krume, die mittleren die Krumenbasis und die inneren Ringe den Unterboden wider. Zahlen finden sich im Anhang A3.

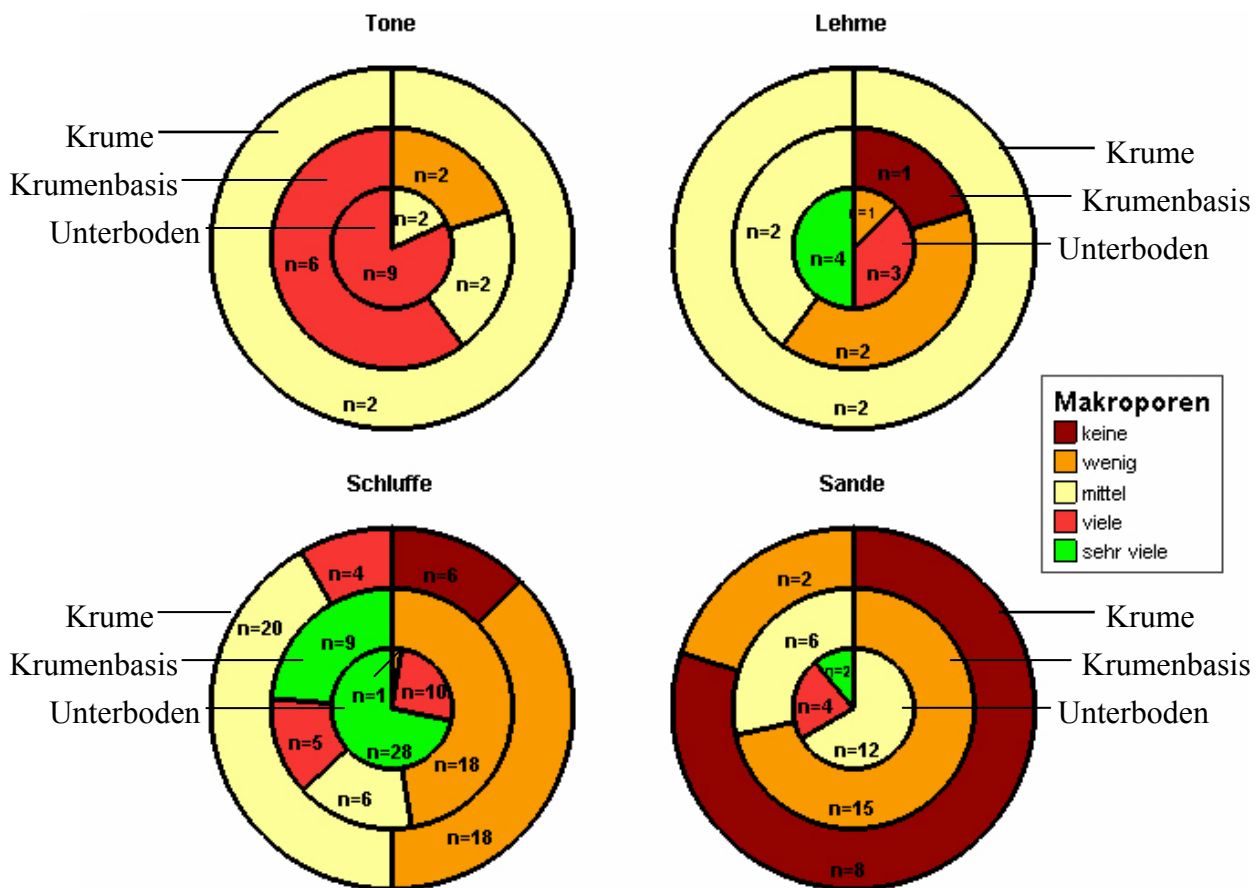


Abb. 26: Makroporenanteile in 212 Untersuchungshorizonten in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden

Bei Betrachtung des *Unterbodens* (innerer Kreis) sind bei allen Bodenartenhauptgruppen vorwiegend viele bis sehr viele sichtbare Makroporen zu verzeichnen. Eine Ausnahme bilden die Sande, wo bei insgesamt 12 Profilgruben ein mittlerer Anteil sichtbarer Makroporen auf eine mittelmäßige biologische Aktivität schließen lässt. Auffallend sind die insgesamt dunkleren Farbtöne im Bereich der *Krumenbasis*. Vor allem die Sande und Lehme sind in dieser Untersuchungstiefe durch niedrige Makroporenanteile gekennzeichnet. Die *Krume*

weist bei den Schluffen aufgrund der unterschiedlichen Grundbodenbearbeitung ein heterogenes Bild grober Poren auf. Bei den überwiegend gepflügten Sanden sind die Makroporen nahezu bei allen Standorten zerstört. Lehme und Tone lassen sich durch einen mittleren Makroporenanteil im Krumenbereich kennzeichnen, der Stichprobenumfang ist aber sehr gering und wenig repräsentativ.

Zur objektiveren Freilandgefügeuntersuchung wurden das Penetrometer zur Erfassung des Eindringwiderstandes und das PL-Gerät zur Messung der Luftleitfähigkeit eingesetzt. In Abb. 27 sind die jeweils nach Untersuchungstiefe und Bodenartenhauptgruppe gegliederten arithmetischen Mittelwerte der insgesamt 2136 Einzel-Eindringwiderstandsmessungen dargestellt. Die Fehlerbalken geben die jeweiligen einseitigen Standardabweichungen an. Im Anhang A1 sind die profilgruben- und tiefenspezifischen Messergebnisse aufgeführt.

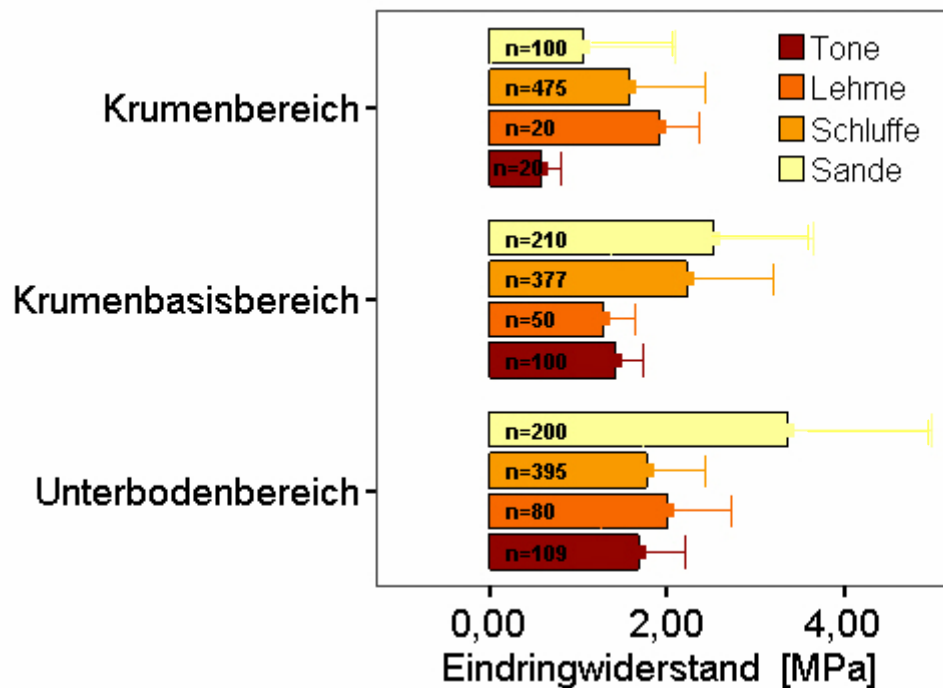


Abb. 27: Eindringwiderstand (MPa) von 212 Untersuchungstiefen in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumbasis und Unterboden (n=2136)

Im *Unterboden* überschreiten die Durchschnittswerte der Eindringwiderstandsmessungen bei den Tonen, Lehmen und Schluffen nicht die Marke von 2 MPa. Die Sande fallen mit hohen durchschnittlichen Widerstandswerten von 3,37 MPa deutlich heraus. Vor allem die stark natürlich verfestigten fluviatilen Sande der Standorte 2b, 3b, 4a, 5a und 6a weisen mit Maximalwerten von bis zu 8,69 MPa sehr feste Horizonte auf. Ein Beispielfoto für einen

solchen Standort zeigt Abb. 28 (Standort 4a). Im Bereich der *Krumenbasis* übersteigen die Penetrometerwerte der Sande und Schluffe mit 2,52 bzw. 2,23 MPa den von vielen Autoren (LINDNER et al. 1974, TAYLOR 1974, EHLERS et al. 1983, HARRACH 1984, DANNOWSKI 1992) diskutierten Grenzbereich von 2 MPa; die Standardabweichungen verdeutlichen jedoch die hohe Variabilität. Bei den Tonen und Lehmen liegen deutlich geringere Eindringwiderstände vor. Im *Krumenbereich* sind bei den überwiegend gepflügten Sandböden die Eindringwiderstandswerte mit 1,06 MPa am geringsten, weisen aber mit 1,04 MPa auch die höchsten Standardabweichungen auf. Die Schluffböden zeichnen sich durch Bodenwiderstände von durchschnittlich 1,59 MPa aus. Bei den Tonen liegen die durchschnittlichen Werte mit 0,59 MPa im geringen Messbereich, bei den Lehmen mit 1,92 MPa im relativ hohen Bereich. Die letzteren Bodenarten sind jedoch nur durch jeweils einen Schlag (Standort 22a, 9b) vertreten.



Abb. 28: Fluviale horizontal eingeregelt Sandablagerungen im Unterbodenbereich (Horizont II_{Gor}) vom Standort 4a

In Abb. 29 ist der prozentuale Anteil der gemessenen Luftleitfähigkeit im Freiland, die der Schadschwellenklassifikation nach PETELKAU et al. (2000, zit. in LEBERT et al. 2004) folgend einen Wert von unter 1 cm/s aufweisen, in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe und der Bodentiefe dargestellt. Insgesamt wurden an den 212 Untersuchungshorizonten 620 PL-Messungen durchgeführt, davon 178 im Krumenbereich, 211 im Krumenbasisbereich und 231 im Unterbodenbereich. Die Tonböden wurden in der Krume nicht untersucht, da hohe Bodenfeuchten zu einem Verschmieren des Messbereiches und somit zu undurchlässigen Permeabilitätswerten geführt hätten.

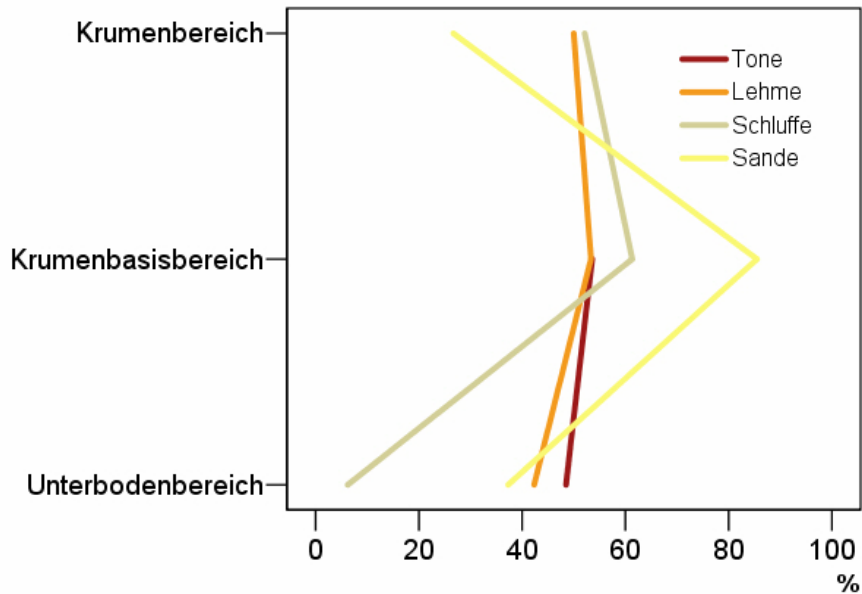


Abb. 29: Prozentualer Anteil der PL-Messungen (n=620) mit Werten unter 1 cm/s in 212 Untersuchungshorizonten in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden

Bei Betrachtung des *Unterbodens* tritt besonders die ausgeprägte Luftleitfähigkeit der Schluffe hervor. Mit 7 von 113 Messungen liegen nur 6,2 % im Bereich unter 1 cm/s und sind somit dem nach PETELKAU et al. (2000, zit. in LEBERT et al. 2004) definierten kritischen Bereich zuzuordnen. Anders gestaltet sich das Bild bei den Tonen, Lehmen und Sanden, wo zwischen 37,2 % bei den Sanden und 53,6 % bei den Tonen Werte unterhalb der Schadschwelle aufweisen. Besonders auffällig ist der starke Anstieg der geringen PL-Werte im Bereich der *Krumenbasis* bei den Schluff- und Sandböden, wo sich über 60 % bzw. gar über 85 % der Werte unterhalb der Marke von 1 cm/s bewegen. Bei Tonen und Lehmen hingegen steigt der Anteil auf jeweils knapp über 50 %. Deutlich niedriger sind die prozentualen Anteile mit 26,7 % bei den meist gepflügten Sanden im *Krumenbereich*. Lehme und Schluffe liegen bei 50 % bzw. 52,1 % (*).

(*) Bei Betrachtung der PL-Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Luftleitfähigkeit stets eine Funktion der Wasserspannung ist. Wassergesättigte Böden leiten die Luft wesentlich schlechter als trockene Böden. Durch ein wassergefülltes Porensystem werden die Leitwege für Luft versperrt, wodurch die Permeabilität für Luft eingeschränkt wird. Da der Einfluss des bei der Messung vorliegenden Wassergehaltes auf die Größe der Luftpermeabilität im Wasserspannungsbereich bis zur Feldkapazität gering ist (GÄTKE 1989, HARTGE 1968), kann dieser Einflussfaktor bei der ökologischen Beurteilung vernachlässigt werden. Dies bedeutet, dass unabhängig vom Spannungsgehalt des Bodens, die dargestellten Werte zur pflanzenökologischen Bewertung verwendet werden können.

4.1.2 Laborbefunde

Die aufgeführten Feldgefügeparameter sind durch einen geübten Kartierer im Feld zu ermitteln. Eine objektivere Bewertung über den Bodengefügezustand kann hingegen nur durch die Entnahme ungestörter Bodenproben und deren laboranalytische Analyse festgestellt werden. Wichtige Parameter zur Beschreibung des Bodengefügezustandes sind die Lagerungsdichte und die Porenverteilungsgrößen sowie Kenngrößen zur Charakterisierung der Wasser- und Luftleitfähigkeit. Zu deren Ermittlung wurden 2036 Stechzylinder entnommen. Der Anhang A4 enthält die genauen Messergebnisse.

In Abb. 30 sind die arithmetischen Mittelwerte der Lagerungsdichte differenziert nach Untersuchungstiefe und Bodenartenhauptgruppe aufgeführt. Im **Unterbodenbereich** sind vor allem die Lehme mit $1,64 \text{ g/cm}^3$ deutlich dichter gelagert. Die weiteren Bodenarten liegen im Bereich zwischen $1,45$ und $1,48 \text{ g/cm}^3$. Ein ähnliches Bild zeigt sich in der **Krumenbasis**, wo die Dichte der Lehme mit $1,66 \text{ g/cm}^3$ nach der KA5 (AG BODEN 2005) als „hoch“, die der anderen Bodenartenhauptgruppen noch als „mittel“ klassifiziert werden. Die gemessenen Dichtewerte liegen bei allen Bodenartenhauptgruppen in der Krumenbasis über denen des Unterbodens. Bezogen auf die **Krume** sind sehr heterogene Bedingungen zu erkennen. Lehme, allerdings nur mit 20 Stechzylindern (Standort 9a) in der Stichprobe vertreten, zeichnen sich durch hohe, Tone (Standort 22a) durch sehr niedrige Lagerungsdichten aus. Sande liegen bei durchschnittlich $1,40 \text{ g/cm}^3$ und Schluffe bei durchschnittlich $1,46 \text{ g/cm}^3$. Die Standardabweichungen sind durch die querverlaufenden Fehlerbalken markiert.

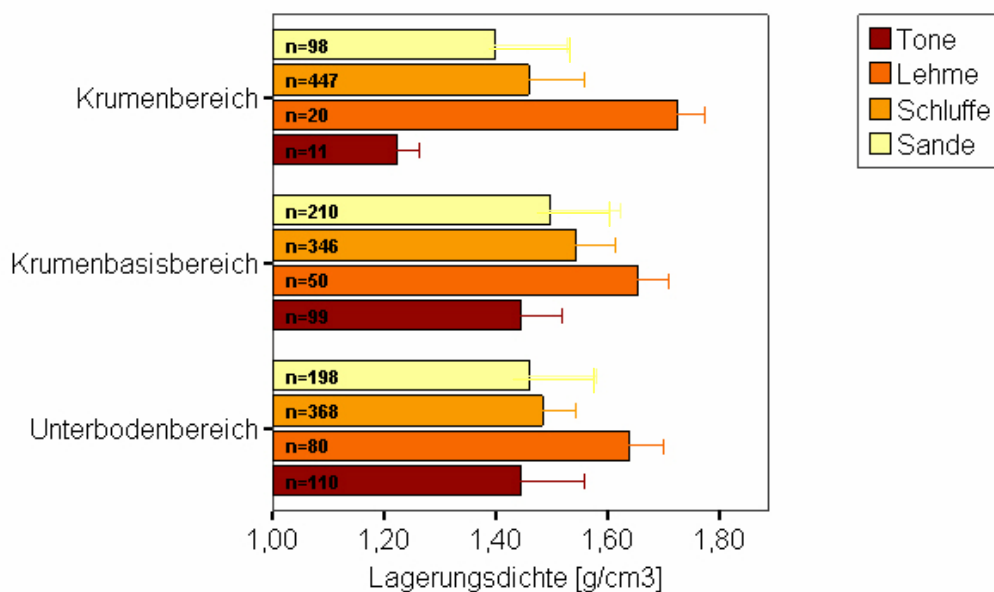


Abb. 30: Lagerungsdichte (g/cm^3) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden ($n=2036$)

Tab. 14 zeigt die Kenndaten der Porengrößenverteilung in Abhängigkeit von den einzelnen Untersuchungstiefen und Bodenarten. Die Gesamtporenvolumina der beprobten *Unterböden* reichen von 37,7 Vol.-% bei den Lehmen bis hin zu 43,9 Vol.-% bei den Sanden und Schluffen bzw. 44,3 Vol.-% bei den Tonen. Die Anteile der weiten Grobporen liegen mit ca. 8 Vol.-% bei den Lehmen und Schluffen im mittleren Bereich. Bei den Lehmen und Tonen sind weite Grobporen kaum zu finden. Der Anteil an Mittelporen bewegt sich zwischen 10,5 Vol.-% (Sande) und 18,7 Vol.-% (Schluffe). In den untersuchten *Krumenbasen* sind bezogen auf die Gesamtporenvolumina und dem Anteil weiter Grobporen bei allen Bodenarten mit Ausnahme der Tone geringere Werte als im Unterboden gemessen worden, der Anteil an Mittelporen hat sich hingegen erhöht. Während im Bereich der *Krumen* die Tone die höchsten und die Lehme die geringsten Gesamtporenvolumina aufweisen, bewegen sich die Sande (44,8 Vol.-%) und die Schluffe (44,2 Vol.-%) im mittleren Bereich. Weite Grobporen sind in den tonigen Unterböden wieder kaum vorhanden. Die Unterböden der Lehme und Schluffe bewegen sich die Werte nur knapp über dem nach dem Indikatorenmodell definierten Grenzbereich von 5 Vol.-%. Tone und Schluffe zeichnen sich durch relativ hohe, Sande und Lehme durch einen relativ geringen Anteil an Mittelporen aus. Die Feinporenanteile, die primär durch den Tongehalt beeinflusst werden (NISSEN 1999), liegen bei den Sanden am niedrigsten und bei den Tonen am höchsten.

Tab. 14: Porengrößenverteilung in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)

		Gesamtporen- volumen (%)	weite Grobporen (%)	enge Grobporen (%)	Mittelporen (%)	Feinporen (%)
Krume	Tone	49,4	0,9	0,9	20,2	27,4
	Lehme	34,4	5,7	1,8	13,8	13,1
	Schluffe	44,2	6,4	4,0	21,4	12,7
	Sande	44,8	14,9	6,0	15,3	8,6
Krumen- basis	Tone	44,4	3,2	1,7	15,6	23,9
	Lehme	36,8	5,3	2,1	12,0	17,5
	Schluffe	41,4	5,9	4,2	19,3	12,3
	Sande	41,7	13,9	8,4	13,6	5,8
Unter- boden	Tone	44,3	1,6	1,2	16,1	25,5
	Lehme	37,7	8,2	3,8	11,7	14,0
	Schluffe	43,9	8,3	3,6	18,7	13,8
	Sande	43,9	20,0	10,1	10,5	3,3

In Abb. 31 sind die tiefen- und bodenartspezifischen gemittelten logarithmierten Einzelwerte der gesättigten Wasserleitfähigkeit aufgeführt. Sandböden weisen durchweg die höchsten, Tonböden die niedrigsten Permeabilitäten auf. Im *Unterbodenbereich* liegen die Lehme und Schluffe bei ca. 30 cm/d. Im *Krumenbasisbereich* verringern sich die Wasserleitfähigkeitswerte der Sande und Schluffe auf 151 cm/d bzw. 31 cm/d ($\log 2,18$ cm/d bzw. $\log 1,49$ cm/d), bei den Lehmen bleiben sie in etwa konstant, bei den Tonen erhöhen sie sich sogar. Die *Krume* ist -wenn man von den tonigen Böden absieht- insgesamt durch hohe Wasserleitfähigkeitswerte gekennzeichnet.

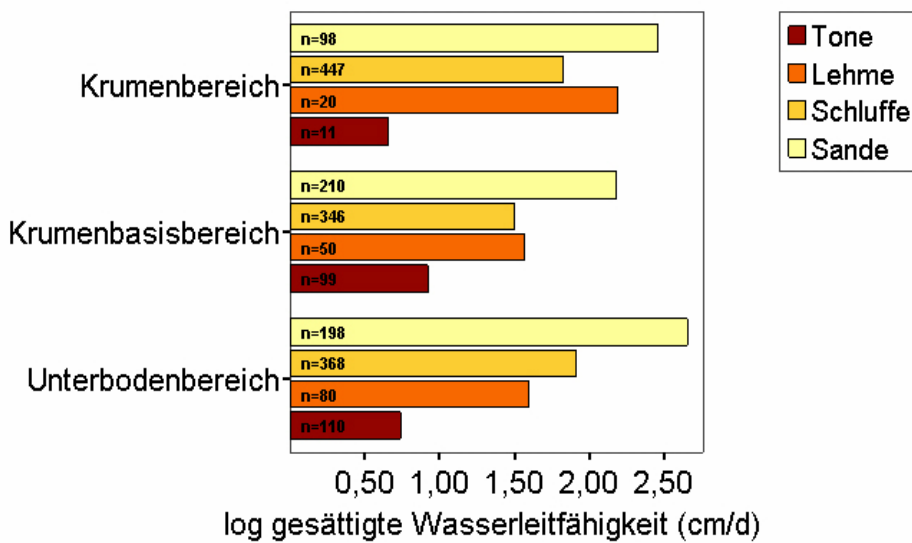


Abb. 31: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)

Bei den abgebildeten Messergebnissen der intrinsischen Luftleitfähigkeit (Abb. 32) weisen die Schluffe im *Unterboden* die höchsten die Tone die geringsten Werte auf. Lehme, Schluffe und Sande weisen im *Krumenbasisbereich* mit ca. 10 cm^2 ($\log 1,00 \text{ cm}^2$) vergleichbare Permeabilitätswerte für Luft auf. Im nicht gelockerten *Krumenbereich* des Standortes 19a (n=11) wurden Luftleitfähigkeiten nahe 0 cm^2 ($\log < 0 \text{ cm}^2$) gemessen. Folgt man der Klasseinteilung des Luftleitfähigkeitskoeffizienten nach KMOCH & HANUS (1965), so liegt ein Großteil der Messergebnisse im geringen ($10\text{-}22 \text{ cm}^2$ bzw. $\log 1\text{-}1,34 \text{ cm}^2$) bis sehr geringen ($< 10 \text{ cm}^2$ bzw. $< \log 1 \text{ cm}^2$) Bereich.

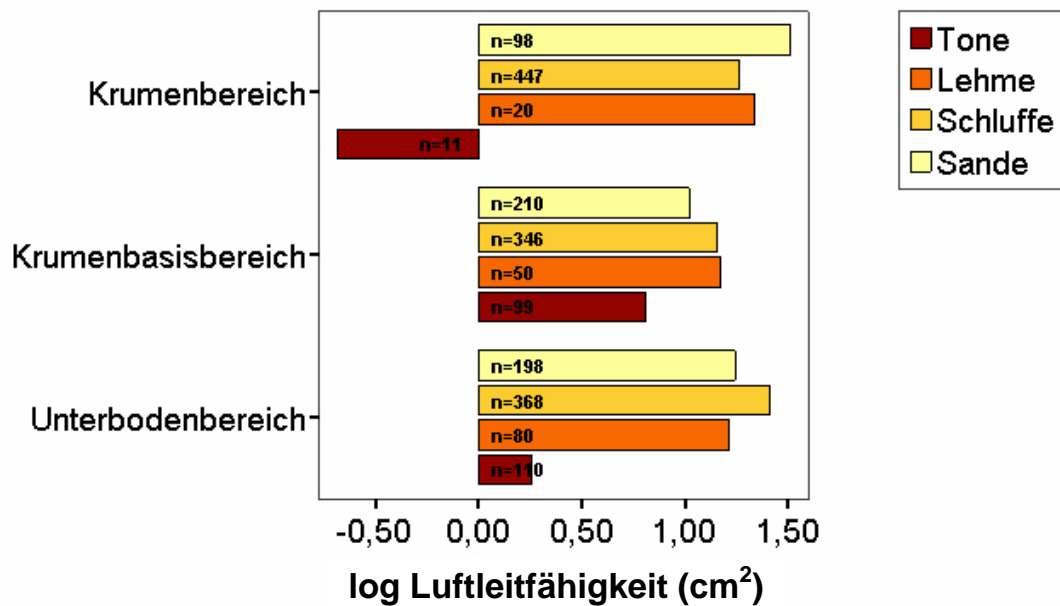


Abb. 32: Intrinsische Luftleitfähigkeit (cm^2) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden ($n=2036$)

4.1.3 Anwendung des Indikatorenmodells

Nach dem von LEBERT et al. (2004) vorgestellten Indikatorensystem sind *Luftkapazitäten* von unter 5 Vol.-%, *gesättigte Wasserleitfähigkeiten* von unter 10 cm/d und die Einstufung der *Feldgefügekennwerte* (Spatendiagnose, Effektive Lagerungsdichte, Packungsdichte) in die Klassen 4 und 5 Kennzeichen schadverdichteter Böden. Grundsätzlich erfolgt die eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung über die Kombination der einzelnen Parameter, wobei die Kriterien der Luftkapazität, der Wasserleitfähigkeit und jeweils ein Kennwert der Feldgefügeansprache gleichzeitig erfüllt sein müssen. So ist z.B. eine Luftkapazität von unter 5 Vol.-% allein noch kein sicheres Indiz für einen Gefügeschaden, da solche Werte entweder substratspezifisch oder bodengenetisch bedingt auch als Hintergrundwerte vorkommen können, wie z.B. in Gleyen oder Bt-Horizonten von Parabraunerden. Erst die zusammenfassende Betrachtung der Luftverhältnisse, der Leitfähigkeit und morphologischer Bodenbeschaffenheit erlauben eine Bewertung des Bodenstrukturzustandes (LEBERT et al. 2004).

In der Abb. 33 sind alle Einzelwerte der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit ($n=2036$) der 43 untersuchten Ackerflächen für die jeweiligen Untersuchungstiefen in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe aufgeführt.

Die Darstellung der Einzelwerte wurde gewählt, um die bei bodenphysikalischen Untersuchungen auftretenden Schwankungen -auch innerhalb gleicher Bodenartenhauptgruppen- zu verdeutlichen. Zunächst wird auf die Darstellung der Feldparameter verzichtet. In die Diagramme sind die Schadschwellenwerte nach LEBERT et al. (2004) in Form der roten Linie für die Luftkapazität und der blauen Linie für die Wasserleitfähigkeit (logarithmische Einteilung) eingezeichnet. Das Diagramm teilt sich somit in 4 Rechtecke, wobei alle im 1. Rechteck befindlichen Punkte keine der beiden Schadschwellen unterschreiten. Punkte im 2. und 3. Rechteck liegen bei jeweils einem der zwei Parameter unter der kritischen Grenze, bei den Punkten im 4. Rechteck wird gleichermaßen die Grenze der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit unterschritten.

Im Bereich des *Unterbodens* liegt ein Großteil der Messergebnisse im 1. Rechteck, wobei vor allem die Sandböden Luftkapazitäten >10 Vol.-% und gesättigte Wasserleitfähigkeiten >100 cm/d aufweisen. Bei den Böden aus Schluff wurden zwar niedrigere Luftkapazitäten (ca. 5-12 Vol.-%) gemessen, auffallend sind aber die teilweise enorm hohen Wasserleitfähigkeiten, die mit Werten >10000 cm/d nur mit Hilfe logarithmischer Datentransformation dargestellt werden können. Die Werte der Lehme, die mit 80 Einzelproben den geringsten Stichprobenumfang ausmachen, sind sehr verstreut und in allen 4 Rechtecken zu finden. Charakteristisch für die Unterböden der untersuchten Tone sind die fast ausnahmslos unter 5 Vol.-% gemessenen Luftkapazitäten sowie Wasserleitfähigkeiten, die die Marke von 10 cm/d unterschreiten. Bei Betrachtung der *Krumenbasisergebnisse* zeigt sich -ohne zunächst auf die einzelnen Bodenartengruppen einzugehen- eine Konzentration der Punkte um den Schnittpunkt der beiden Grenzgeraden. Vor allem bei den Schluffen, die mit $n=368$ den höchsten Stichprobenumfang ausmachen, sind verringerte Luftkapazitäten deutlich zu erkennen. Zusätzlich ist die Anzahl der Messungen mit äußerst hohen Wasserleitfähigkeiten im Vergleich zum Unterboden nicht mehr so ausgeprägt. Die Punkte der untersuchten Sandböden liegen enger zusammen, im Vergleich zum Unterboden ist die Probenanzahl im 3. Rechteck erhöht, die im 1. Rechteck verringert. Bei den Tonen liegen nahezu 50 % der Punkte im 4. Rechteck. Lehme sind durch eine verminderte Luftkapazität gekennzeichnet, wobei nahezu alle Punkte die 10 Vol.-% Marke unterschreiten und dem 3. bzw. 4. Rechteck zuzuordnen sind. In der Krume schwanken in allen Bodenarten die Werte sehr stark. Überprägt wird die Abbildung wiederum durch den hohen Stichprobenumfang der Schluffe ($n=447$), wohingegen die Tone und Lehme mit nur 11 bzw. 20 Einzelmessungen

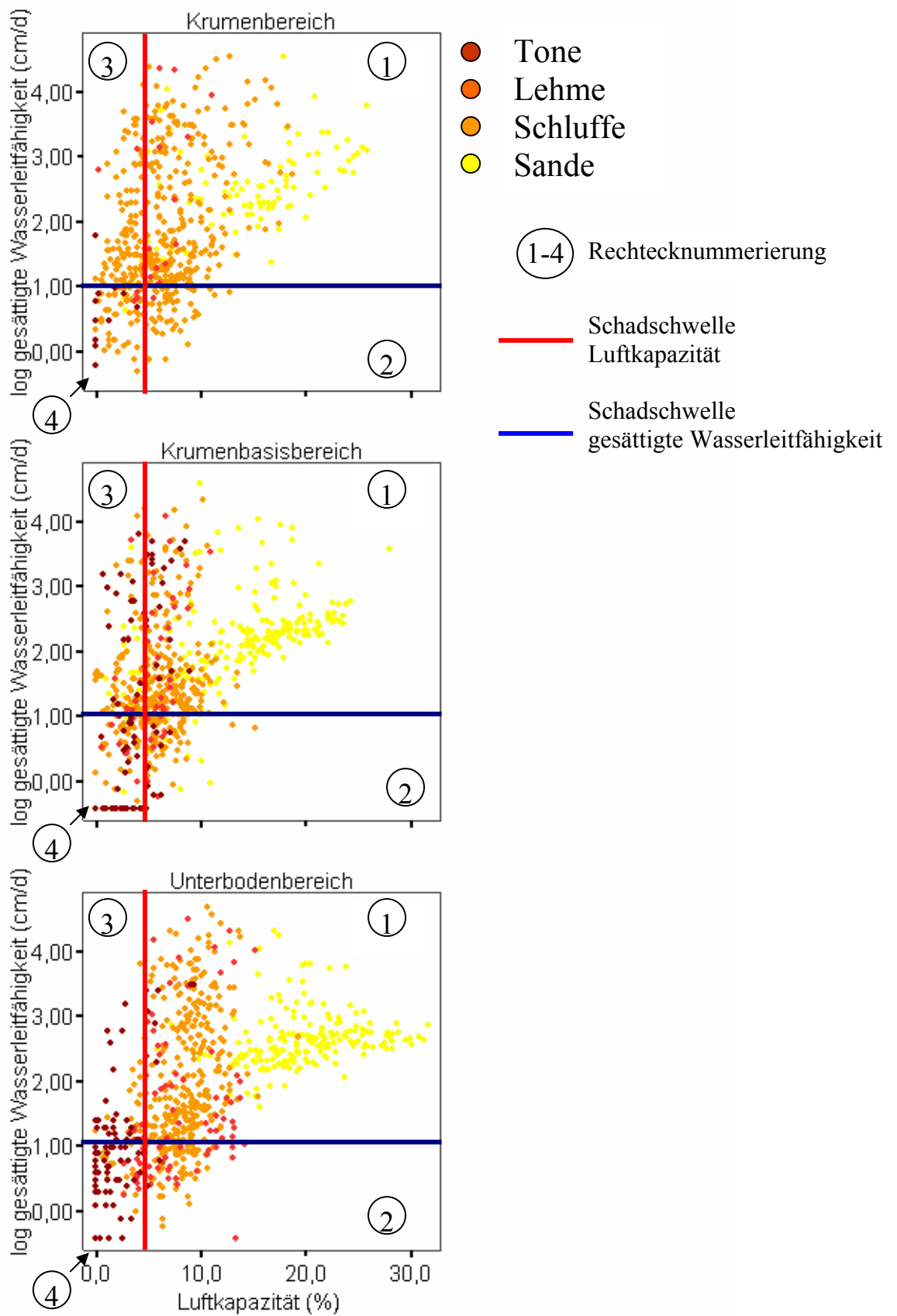


Abb. 33: Luftkapazität (%) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden

einen geringen Anteil der Stichprobe bilden. Ein Großteil der Schluffwerte liegt im 3. bzw. 4. Rechteck und unterschreitet somit die kritische Marke der Luftkapazität von 5 Vol.-%. Ähnlich der Krümenbasisdarstellung ist auch hier -wenn auch nicht so ausgeprägt- eine vermehrte Ansammlung um den Schnittpunkt der Geraden zu erkennen. Die vornehmlich gepflügten Krümenbereiche der Sandböden weisen im Vergleich mit den beiden anderen Untersuchungstiefen hohe und weit schwankende Wasserleitfähigkeiten auf.

In allen Untersuchungstiefen unterschreiten zahlreiche Einzelmessungen die Schadschwellenwerte der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit. Um jedoch unter zusätzlicher Berücksichtigung der Feldgefügekennwerte zu einer schlagspezifischen Bewertung nach dem Indikatorenmodell zu kommen, sind in der folgenden Tab. 15 für jeden Standort bzw. Schlag [inkl. Grünland (Standort 11b) und Stilllegung (Standort 9c+14h)] die einzelnen Indikatoren zusammenfassend tiefenabhängig dargestellt. Liegen auf einem Schlag bei mindestens einer der zwei beprobten Profilgruben in der entsprechenden Tiefe die arithmetischen Mittelwerte der Luftkapazität unter 5 Vol.-%, die geometrischen Mittelwerte (entsprechen dem arithmetischen Mittel der logarithmierten Werte) der gesättigten Wasserleitfähigkeit unter 10 cm/d und einer der 3 Feldgefügekennwerte in den Stufen 4 oder 5, wird dies durch das entsprechende Symbol (X) in den Spalten 2,3,5 markiert. Zur besseren Interpretation wird zusätzlich angegeben, wenn die Mittelwerte der Luftkapazität die nach PAUL (2004) für Krümenbereiche nötige Menge von 8 Vol.-% unterschreiten (Spalte 1). Zusätzlich enthält die Tabelle Angaben zur Häufigkeitsverteilung der Wasserleitfähigkeitswerte. Der jeweilige Standort erhält eine Markierung, wenn mindestens 50 % der Messwerte einer Profilgrube eines Schlages unter der Schadschwelle von 10 cm/d liegen. Dies erscheint sinnvoll, da dieser Parameter aufgrund biogener Makroporen extremen Schwankungen unterworfen sein kann. Bei ausschließlicher Verwendung geometrischer Mittelwerte können insbesondere einige wenige Messergebnisse der gesättigten Wasserleitfähigkeit einen geometrischen Mittelwert unter 10 cm/d bedingen. Dies führt dazu, dass Böden mit vorwiegend hohen Permeabilitätseigenschaften fälschlicherweise als schlecht wasser-durchlässig eingestuft werden (Fehlinterpretation) (vgl. Kapitel 4.1.3). Ein Schlag wird in der Spalte 6 rot markiert, wenn er die Kriterien der Spalten 2,3 und 5 gleichzeitig erfüllt und somit der Definition nach LEBERT et al. (2004) in die Kategorie „schadverdichtet“ eingestuft wird. Nicht beprobte Untersuchungstiefen sind grau hinterlegt. Unter den jeweiligen Spalten ist die Summe der Anzahl der Schläge aufgeführt, bei denen die definierten Bedingungen erfüllt sind.

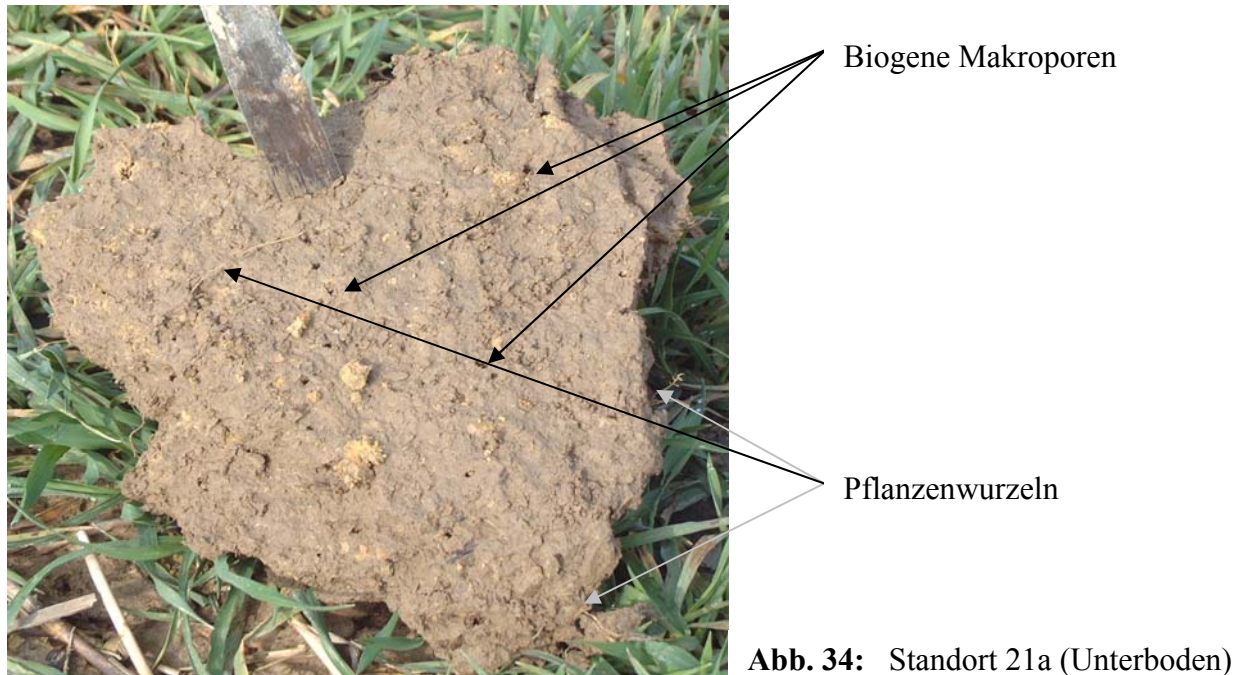
Im Bereich des *Unterbodens* spiegelt die Tab. 15 deutlich das bereits in Abb. 33 dargestellte Bild eines günstigen Gefügezustandes wider. Nach dem Bewertungsmaßstab des Indikatorenmodells werden in den untersuchten Profilgruben keine Schadverdichtungen festgestellt. Zwar sind auf den Schlägen mit höheren Tonanteilen (Standorte 11c+20-23) nur geringe Luftkapazitäten und Wasserleitfähigkeiten zu erkennen, die Feldgefügeansprache zeugt hingegen von einer günstigen Gefügestruktur. Abb. 34 zeigt den strukturierten durchwurzelten Unterboden des Standortes 21a. Zahlreiche Makroporen lassen auf einen biologisch aktiven Boden schließen. Auch bei den Schluff- und Lehmstandorten werden durchschnittliche Luftkapazitäten unter 8 Vol.-% (14 Schläge) gemessen bzw. gesättigte Wasserleitfähigkeiten, die bei 50 % der Einzelproben den kritischen Wert von 10 cm/d unterschreiten (5 Schläge). Trotzdem bescheinigt die Feldgefügeansprache einen positiven Bodenstrukturzustand.

Bei Betrachtung der *Krumenbasis* fällt das Bild hinsichtlich der Feldgefügeansprache deutlich negativer aus. Auch wenn hier keiner der untersuchten Ackerschläge im Bereich der Profilgrube als schadverdichtet nach dem Indikatorenmodell eingestuft werden kann, so sind bei nahezu einem Viertel visuelle Schäden am Bodengefüge im Feld erkennbar. Dies betrifft gleichermaßen die Standorte mit überwiegend lehmigen und schluffigen Böden, als auch die Flächen mit sandigen Bodensubstraten. Letztere weisen zwar körnungsbedingt hohe Wasserleitfähigkeiten auf, bei der Feldgefügeansprache ist der Untersuchungshorizont aber unverkennbar als schadverdichtet anzusprechen (Standort 5a, 2b). Grundsätzlich weisen fast alle Krumenbasisproben mit Ausnahme der Sande Luftkapazitäten unter 8 Vol.-% auf, bei 17 Schlägen wurden sogar durchschnittliche Luftkapazitäten unter 5 Vol.-% gemessen. Somit kann selbst bei Luftkapazitäten über 5 Vol.-% eine Schadverdichtung im Sinne der Ausgleichs- und Regelungsfunktion des Bodens bestehen. Tatsächlich werden in der bodenkundlichen Fachliteratur häufig anzustrebende Luftkapazitätswerte von mindestens 10 Vol.-% gefordert (u.a. CZERATZKI 1972, RENGER 1974, WERNER & PITTELKOW 1979, MOHR 1980, GUPTA & LARSON 1982, XU et al. 1992, DEXTER 1988).

Im Bereich der *Krume* werden nach dem Indikatorenmodell 2 Schläge im Bereich der untersuchten Profilgrube(n) in den Zustand „schadverdichtet“ eingeordnet. Dabei handelt es sich um einen Boden aus Löss (Standort 14g) und einem Auenboden (Standort 19a).

Tab. 15: Bewertung des Bodengefügezustandes 46 landwirtschaftlicher Flächen (Schläge) für drei Untersuchungstiefen nach definierten Schadschwellen

Standort	Schlag	Krumme						Krumenbasis						Unterboden					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		Luftkapazität $\leq 8\%$	Luftkapazität $\leq 5\%$	Wasserleitfähigkeit ($\leq 10\text{cm/d}$)	Wasserleitfähigkeit (mind. $50\% \leq 10\text{cm/d}$)	Feldefügekenwert ≥ 4	schadverdichtet	Luftkapazität $\leq 8\%$	Luftkapazität $\leq 5\%$	Wasserleitfähigkeit ($\leq 10\text{cm/d}$)	Wasserleitfähigkeit (mind. $50\% \leq 10\text{cm/d}$)	Feldefügekenwert ≥ 4	schadverdichtet	Luftkapazität $\leq 8\%$	Luftkapazität $\leq 5\%$	Wasserleitfähigkeit ($\leq 10\text{cm/d}$)	Wasserleitfähigkeit (mind. $50\% \leq 10\text{cm/d}$)	Feldefügekenwert ≥ 4	schadverdichtet
1	a																		
	b																		
2	a																		
	b							X	X				X						
3	a																		
	b																		
4	a																		
5	a												X						
6	a																		
7	a	X						X	X									X	
	b	X				X		X					X		X				
8	a							X					X						
	b							X	X				X						
9	a							X	X		X	X		X				X	
	b	X				X		X						X				X	
	c	X	X					X						X					
10	a	X	X					X			X			X					
	b							X	X									X	
11	a	X						X						X					
	b	X						X						X					
	c	X	X											X	X	X	X		
12	a	X			X			X	X				X		X				
	b	X	X					X	X				X						
13	a							X	X										
	b	X						X						X				X	
14	a	X			X			X		X									
	b	X		X	X			X											
	c	X						X						X					
	d	X						X											
	e			X	X			X											
	f	X																	
	g	X	X	X	X	X	X							X	X			X	X
	h	X																	
15	a							X					X						
	b	X						X	X		X			X					
16	a							X	X		X	X		X	X				
	b							X	X	X	X								
17	a	X	X		X			X											
18	a	X				X		X					X						
19	a	X	X	X	X	X	X	X	X		X								
20	a	X	X					X	X	X	X			X	X	X	X		
	b	X	X					X	X	X	X			X	X	X	X		
21	a							X	X					X	X	X	X		
	b	X						X	X					X	X				
22	a	X	X	X	X														
23	a	X	X					X	X	X	X			X	X	X	X		
Σ		27	12	5	8	5	2	33	17	5	9	11	0	20	8	5	11	1	0



Hier werden alle abgebildeten Grenzwerte unterschritten und der Boden bei der Feldgefügeansprache negativ bewertet. Die Fotos (Abb. 35 und Abb. 36) stammen von den Standorten 14g und 19a und verdeutlichen die ungünstige Gefügestruktur. Das horizontal ausgerichtete Plattengefüge wirkt wasserstauend und verhindert ein ausgeprägtes, weit verzweigtes Wurzelsystem (Abb. 35). Ein auf dem Standort 19a vorgefundenes scharfkantiges Polyedergefüge zeugt von oberflächennahen Verdichtungen (Abb. 36). Eingeschränkte Luftkapazitäten und Wasserleitfähigkeiten finden sich überwiegend in ungelockerten Krumenhorizonten, ihr Gefüge ist aber zumindest der Stufe 3 nach den Feldansprachen zuzuordnen. Ausnahmslos günstige Gefügestrukturen finden sich in gelockerten Krumenbereichen (Abb. 37).

Bemerkenswert ist, dass auch langjährig nicht bewirtschaftete Standorte sowie Flächen unter Grünlandnutzung geringe Luftkapazitätswerte unter 8 Vol.-% bzw. 5 Vol.-% aufweisen (Standort 9c, 14h, 11b).



Abb. 35 (links und rechts): Standort 14g (Krume)



Abb. 36: Standort 19a (Krume)

Abb. 37: Standort 10a (Krume)

4.1.4 Diskussion

Die bodenart- und tiefenabhängige Auswertung der Feld- und Laboranalysen sowie die schlagspezifischen Indikatorenergebnisse haben gezeigt, dass nordrhein-westfälische Böden maßgebliche Unterschiede hinsichtlich ihres Gefügestandes aufweisen.

Welche Böden sind nun in welchen Tiefen am stärksten von Verdichtungen betroffen, und wie können solche Strukturunterschiede plausibel erklärt werden? Welche Gefährdungspotenziale lassen sich daraus ableiten? Diese Diskussionspunkte sind Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen. Sie sollen zusätzlich mit der Antwort abschließen, ob das von LEBERT et al. (2004) vorgestellte Indikatorenmodell eine praxistaugliche Anwendung für nordrhein-westfälische Bodenbedingungen erlaubt.

Die *Unterböden* der beprobten Ackerschläge sind nach den Ergebnissen der Abb. 25-33 und den Tab. 14 und 15 zufolge nicht von Bodenschadverdichtungen betroffen. Allein die Feldansprache vor Ort lässt erkennen, dass sich die untersuchten Böden in einem guten Bodengefügestand befinden. Zwar zeigen die erhobenen Parameter zum Teil bodenart- und

standortspezifische Unterschiede, diese sind aber pedo- und geogenetisch zu erklären. So weisen Sandböden aufgrund ihrer körnungsbedingten Primärporen recht gleichmäßige hohe gesättigte Wasserleitfähigkeiten und intrinsischen Luftleitfähigkeiten auf. Mit steigenden Tongehalten und wachsendem Feinporenanteil sinken jedoch die Permeabilitäten, so dass die ermittelten Werte durchaus mit den in der Literatur angegebenen hydraulischen Leitfähigkeiten eines Tonbodens übereinstimmen (BLUME 2004). Generell bewegt sich die Luftpermeabilität zwar im geringen bis sehr geringen Bereich, diese Klassifizierung nach KMOCH & HANUS (1965) beruht jedoch auf Betrachtung von 1000 Einzelwerten, die überwiegend aus dem Oberboden stammen und von denen 80 % im Messbereich zwischen 10 und 100 cm² lagen. Die hier ermittelten Daten liegen also weit unterhalb des Messbereiches, die Klassifizierung nach KMOCH & HANUS (1965) nur bedingt verwendbar. Hinzu kommt nach FREDE (1986) und FLÜHLER (1973) Gase im Boden vornehmlich über Diffusion und nicht durch Massenfluss. Sie spielen daher für den Gasaustausch im Boden nur eine untergeordnete Rolle und erlauben daher nur bedingt eine bodenfunktionale Bewertung.

Weiterhin kommt im Unterboden der zunehmende Einfluss biogener Makroporen zum Ausdruck, der die körnungsbedingten Einflüsse überlagert. Vor allem bei den Lehmen und Schluffen führen diese Poren (Äquivalentporendurchmesser >300 µm), die nach DEXTER (1988) insbesondere durch Pflanzenwurzeln, Würmer und größere Bodentiere geschaffen werden, zu sehr hohen Wasserleitfähigkeitswerten über 10000 cm/d. Diese Poren leisten somit einen enormen Beitrag zu vertikalen Wasserinfiltration.

Die gemessenen Eindringwiderstände lassen ebenfalls den Rückschluss auf ein nicht verdichtetes Unterbodengefüge zu. Die Werte liegen grundsätzlich unterhalb der in der Literatur diskutierten Grenze von 2 MPa (LINDNER et al. 1974, TAYLOR 1974, EHLERS et al. 1983, HARRACH 1984, DANNOWSKI 1992). Eine Ausnahme bilden die Sande, die teilweise aufgrund geogenetisch bedingter fluviatiler Einregelungsprozesse hohe Eindringwiderstände aufweisen (Standort 2b, 4a, 5a). Diese weisen nach der KA5 (AG Boden 2005) zusätzlich sehr hohe Lagerungsdichten auf. Solche natürlichen Dichtlagerungen sind dann nur durch die Feldgefügeansprache vor Ort von anthropogen bedingten Verdichtungen zu unterscheiden.

Auch die Porenverteilungsgrößen, die hinsichtlich der Primärporen von der Körnung und der Kornform abhängig sind, folgen vornehmlich den in der Literatur beschriebenen Gesetzmäßigkeiten (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998, BLUME 2004, AG

BODEN 1994). Sandböden enthalten viele Grobporen, Lehm- und Schluffböden viele Mittelporen und Tonböden viele Feinporen. Gerade bei letzteren besteht zwischen dem Anteil der Feinporen und dem Tongehalt eine enge Beziehung, die sich, wenn auch weniger stark ausgeprägt, im Gesamtporenvolumen widerspiegelt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Dennoch unterschreiten die Luftkapazitäten -wenn man von den tonreichen Standorten absieht- vielfach die Marke von 8 Vol.-% (vgl. Tab.15), die nach AYRES et al. (1973) und WERNER & UNGER (1977) als kritisch angesehen wird. HARRACH (1984), FLÜHLER (1973) sowie PAUL & WERNER (1986) beziffern Luftkapazitäten unter 5 Vol.-% als unzureichend. Zu dieser Schadschwellengrenze kommen auch LEBERT et al. (2004) nach einer umfangreichen Literaturlauswertung. Gerade bei den schluffreichen Standorten bewegen sich demnach die Luftkapazitätswerte in einem Bereich, der an die Untergrenze des in der Literatur beschriebenen minimalen Optimums reicht. Dies kann ein Hinweis für die einsetzende Degradierung des Unterbodens sein, deren Gründe in ständig höher werdenden Radlasten bei unterproportional steigenden Reifenaufstandsflächen zu suchen sind (BOLLING & SÖHNE 1982). Auch SOMMER (1998b) spricht von einem gestiegenen Risiko für Unterbodenverdichtungen aufgrund höherer Radlasten. Messtechnisch lassen sich solche Vermutungen allerdings nur durch langjährige Versuche bestätigen, da geringe Abnahmen der Luftkapazität aufgrund einer schleichenden Bodenverformung im jährlichen Turnus nicht nachzuweisen sind. Demnach halten wir fest, die Werte sind alarmierend.

Im Bereich der *Krumenbasis* sind die Bodengefügezustände deutlich schlechter zu beurteilen. Bei nahezu einem Viertel der untersuchten Ackerschläge ist die Ansprache bei einer der drei Feldgefügemethoden dem schadhafte Bereich zuzuordnen. Die Anteile makroskopisch sichtbarer Poren sind deutlich eingeschränkt, was auf eine verminderte biologische Aktivität in dieser Bodentiefe schließen lässt. Daneben sind im Vergleich zum Unterboden höhere Eindringwiderstände und geringere Leitfähigkeitswerte für Luft und Wasser zu erkennen. Davon betroffen sind vor allem die Schluff-, Lehm- und Sandböden. Die Abbildung der Porengrößenverteilung zeigt (vgl. Tab. 14), dass es im Bereich der Krumenbasis zu einer Porenverteilung gekommen ist. Der Anteil weiter Grobporen ($> 50 \mu\text{m}$) ist mit Ausnahme der Tonböden im Vergleich zum Unterboden deutlich reduziert, und der Anteil an Mittel- ($10\text{-}0,2 \mu\text{m}$) und Feinporen ($<0,2 \mu\text{m}$) wesentlich erhöht. Ähnliche Erkenntnisse im Bereich verdichteter Krumenbasishorizonte wurden auch von DUMBECK (1986) veröffentlicht. Im Vergleich zum Unterboden, wo sich Unterschiede der bodenkundlichen Untersuchungen vornehmlich durch Prozesse der Pedo- und Geogenese

erklären lassen, scheint im Bereich der Krumbasis verstärkt der Einfluss anthropogener Faktoren zum Tragen zu kommen. Ein Grund dürfte bei den untersuchten Böden in der Art der Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug zu suchen sein. Beim Fahren des Schlepperrades in der Pflugfurche entstehen unterhalb der Krume Verdichtungen die sich aufgrund der höheren Schlepperleistungen bis in Tiefen um 35 cm verlagert haben. Durch Schlupf und der damit verbundenen seitlichen Teilchenverschiebung wird das Porensystem zerstört und die Porenkontinuität unterbrochen (DÜRR et al. 1995, SEMMEL & HORN 1995). Auch auf heute pluglos bewirtschafteten Flächen (z.B. Standort 12a+b) sind anthropogen bedingte Krumbasisverdichtungen vorhanden. Die Fähigkeit zur Selbstauflockerung verdichteter Horizonte durch natürliche Regenerationsprozesse muss auf diesen Flächen als sehr gering eingeschätzt werden, Unterbodenverdichtungen sind dagegen offenbar persistent und selbst in Gebieten mit jährlich tiefem Eindringen des Frostes noch nach Jahren nachgewiesen worden (DÜRR et al. 1995). Bekräftigt werden solche Aussagen durch die geringen Luftkapazitätswerte der beprobten Stilllegungsflächen (z.B. Standort 9c). Auch wenn dieses Ödland über Jahre nicht mechanisch belastet wurde, so zeugt der geringe Anteil an weiten Grobporen von der Dauerhaftigkeit schädlicher Bodenveränderungen.

Die Bodengefügezustände im Bereich der *Krume* sind insgesamt durch starke Unterschiede und hohe Schwankungsbreiten gekennzeichnet. Dies mag insbesondere an dem Einfluss der Primärbodenbearbeitung liegen. Von den 37 untersuchten Krumbereichen sind 11 dem Verfahren der wendenden Bodenbearbeitung zuzuordnen. Hier erfolgt eine Probeentnahme im meist in Krümelstruktur vorliegenden Ap-Horizont, der geringe Lagerungsdichten, hohe Luftkapazitäten und insgesamt gute Durchlässigkeitsbeiwerte aufweist. Je nach Zeitpunkt der Untersuchung kann jedoch diese lockere instabile Bodenstruktur durch die Befahrung wieder zunichte gemacht worden sein, so dass auf einigen Standorten geringe Luftkapazitäten unter 8 Vol.-% festgestellt wurden (z.B. Standort 7a+b). Solche Krumbasisverdichtungen können allerdings nach KÜHNER (1998) bei der Grundbodenbearbeitung problemlos unterfahren und beseitigt werden. Schlechte Luftkapazitäten, die teilweise die Marke von 5 Vol.-% unterschreiten, werden auch im verfestigten Unterkrumbereich nicht gelockerter Ap-Horizonte bei nicht wendenden Bodenbearbeitungsverfahren festgestellt. Durch die verminderte Eingriffsintensität steigt die Lagerungsdichte an (BALL et al. 1988, EHLERS & CLAUPEIN 1994), die Porosität nimmt vor allem in den ersten Jahren nach Änderung des Bodenbearbeitungsverfahrens ab (VOORHEES & LINDSTROM 1984). Auch die zwei nach dem Indikatorenmodell als schadverdichtet eingestuften Flächen (Standort 14g+19a) werden

pfluglos bewirtschaftet. Ein Grund für den schlechten Gefügestand am Standort 14g kann in der schlechten Humusversorgung des Bodens liegen (Humusgehalt 1,3 %). Die weiter untersuchten Schläge a-f an diesem Standort weisen nämlich bei vergleichbaren Bedingungen wesentlich bessere Gefügestrukturen auf. Hohe Gehalte organischer Substanz haben nach GUERIF (1994) einen positiven Einfluss auf die Stabilität von Böden. Vor allem hochpolymere Verbindungen wie z.B. Polysaccharide sind aufgrund ihrer reaktiven chemischen Gruppe in der Lage, Bindungen mit mineralischen Primärteilchen aufzubauen. Dadurch entsteht aus physikalischer Sicht ein stabiles grobporiges Aggregatgefüge (KÜHNER 1998).

Generell gilt für alle Bodentiefen, dass die mechanische Belastung bei witterungsbedingt ungünstigen Bodenverhältnissen als Grund für die unterschiedlichen Bodenstrukturzustände in den einzelnen Betrieben herangezogen werden kann. Dies ist z.B. bei den schluffreichen Lössböden im Raum Mettmann der Fall (Standort 12+18), die schlechtere Gefügestände aufweisen. Kennzeichnend für diese Standorte sind hohe jährliche Gesamtniederschlagsmengen von über 1100 mm. Das bestätigt die Aussagen ANGERMAYRS (1982), wonach in humiden Klimabereichen eine Tendenz zunehmender Bodenverdichtungen festgestellt wurde. Aber auch grundwasserbeeinflusste Böden sind nach SCHWAB & WEISSKOPF (1988) und ROWELL (1997) besonders verdichtungsgefährdet. Die Gleyböden an den Standorten 2b und 5a bestätigen solche Vermutungen.

Anhand des von LEBERT et al. (2004) vorgestellten Indikatorsystems soll eine Bodenschadverdichtung unter Berücksichtigung der 5 Parameter (Luftkapazität, Gesättigte Wasserleitfähigkeit, 3 Feldgefügekennwerte) zweifelsfrei durch bodenkundliche Fachleute nachgewiesen werden können. Orientiert man sich an den vorgegebenen Kriterien, so würde keiner der 43 untersuchten Ackerflächen weder im Unterboden noch im Bereich der Krumbasis den Status „schadverdichtet“ erhalten. Die oberflächennahe Krume wäre in 2 Fällen als schadverdichtet anzusprechen. Dass jedoch nach dem Indikatorenmodell gerade anthropogen bedingte Krumbasisverdichtungen kein Problem der bewirtschafteten Flächen darstellen, widerspricht den eigenen Ergebnissen der Feldgefügeansprachen. Aus diesem Grund wird das Indikatorenmodell im Folgenden einer Schwachstellenanalyse unterzogen, d.h. es werden die Punkte herausgestellt, die die praxistaugliche Anwendung des Modells einschränken könnten.

Schadensschwelle

Sande und lehmige Sande, die einen Anteil von 25 % (GEOLOGISCHER DIENST 2004) am gesamten Bodenartenspektrum in NRW ausmachen und vor allem im Münsterland verbreitet und intensiv landwirtschaftlich genutzt werden, stellen ein Problem für das Indikatorensystem dar. Diese grobkörnigen Böden verfügen auch bei hoher Dichte über ausreichend Grobporen und eine entsprechend hohe Wasserdurchlässigkeit. Allerdings hemmen sie nach HORN (2004) die Durchwurzelung der Pflanzen. Selbst wenn die Feldbeurteilung zweifelsfrei eine Schadverdichtung erkennen lässt, muss dies nicht zwanghaft zu Luftkapazitäten unter 5 Vol.-% und gesättigten Wasserleitfähigkeiten unter 10 cm/d führen (z.B. Standort 5a). Selbst sehr hohe mechanische Belastungen, die mit der heute eingesetzten Landtechnik gar nicht erreicht werden, ist ein Sandboden nicht oder nur sehr schwer auf unter 5 Vol.-% Luftkapazität zu verdichten. Dies wird aus der nachfolgenden Drucksetzungskurve für einen Sandboden deutlich (Abb. 38). Mit steigender Last verringert sich zwar die Luftkapazität, sie liegt aber bei einer Belastung von 650 kPa immer noch bei knapp 12 Vol.-%. Ein solcher Boden würde also trotz Vorliegens eines schlechten Bodengefüges nach dem Indikatorenmodell nicht den Status „schadverdichtet“ erhalten können. LEBERT et al. (2004) empfehlen, dass bei solchen sandigen Böden entweder eine alleinige Bewertung anhand der Feldgefügeansprache oder eine Festlegung substratspezifischer Grenzwerte erfolgen sollte.

Ein ähnliches Problem existiert in der Weise für tonreiche Böden. Diese charakterisieren sich aufgrund des hohen Feinporenanteils durch sehr geringe Wasserleitfähigkeiten und geringe Luftkapazitäten. Nach der KA5 (AG BODEN 2005) variieren die Luftkapazitäten in der Bodenartenhauptgruppe Ton bei mittlerer effektiver Lagerungsdichte im Bereich zwischen 2,5 und 5,5 Vol.-% und liegen somit größtenteils unter der kritischen Marke von 5 Vol.-%. Auch HARTGE & HORN (1991) beziffern die üblichen Luftkapazitäten für Tonböden auf 0 bis 5 Vol.-%. Die Ansprache der morphologischen Bodenbeschaffenheit verhindert jedoch, dass diese Böden fälschlicherweise als „schadverdichtet“ angesprochen werden. Dieser Sachverhalt verdeutlicht, dass die Bewertung des Bodenstrukturzustandes nicht durch alleinige Laboruntersuchungen erfolgen kann, sondern darüber hinaus immer die Ansprache des Bodens vor Ort erfolgen muss. Dies ist bei Tonböden und bei geogenetisch oder pedogenetisch verdichteten Flächen, wie sie z.B. bei Gleyen, Bt-Horizonten von Parabraunerden oder Bh- und Bs-Horizonten von Podsolon auftreten, erforderlich. Eine Eisenverlagerung in Podsolon kann z.B. so stark sein, dass es zur Ausbildung von Raseneisenstein kommt. Dieser ist sehr verfestigt, eine Entnahme ungestörter Bodenproben

gar nicht möglich. Liegt diese „Druckbarriere“ auf solchen Standorten nahe der Bodenoberfläche, so sind Unterbodenverdichtungen nicht zu erwarten (Abb. 39).

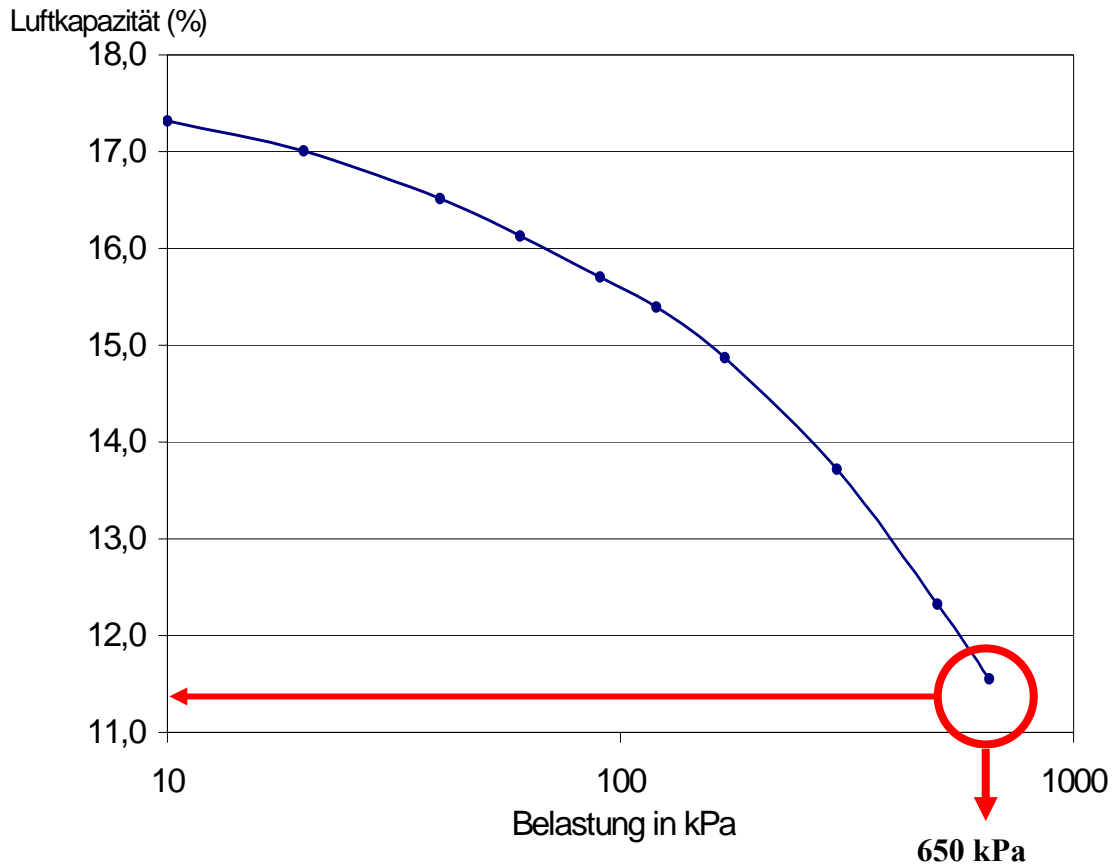


Abb. 38: Typische Drucksetzungskurve für einen nordrhein-westfälischen Sandboden



Eisenausfällung führt zur Bildung von Raseneisenstein

Abb. 39: Raseneisenstein auf einer münsterländischen Ackerfläche

Die untersuchten Schluff-, Lehm- und Sandböden weisen im Bereich der Krumbasis teilweise erhebliche Bodengefügeschäden auf, die anhand der Feldgefügekennwerte festgestellt worden sind. Trotzdem ist der Anteil weiter Poren größer als 5 Vol.-%, so dass diese Böden als nicht „schadverdichtet“ zu klassifizieren sind. Dies lässt die Schlussfolgerungen zu, dass der von LEBERT et al. (2004) aus Literaturquellen festgesetzte Grenzwert ein absolutes Minimum darstellt. Dieser sollte also nicht als anzustrebender Orientierungswert für eine optimale Bodenstruktur, sondern als Maßnahmewert im Sinne des Bodenschutzvollzuges interpretiert werden.

Heterogenität

In Zusammenhang mit der Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit bringt das Indikatorenmodell Probleme hinsichtlich der natürlichen Bodenheterogenität mit sich. Wie aus der Abb. 33 ersichtlich ist, schwanken die Permeabilitätswerte für Wasser teilweise um Zehnerpotenzen. Verantwortlich dafür ist zumeist ein sekundäres Porensystem, was bedingt durch Schrumpfungsrisse oder Regenwurmporen das korngößenbedingte Primärporensystem überlagert und eine große Streuung der Permeabilität verursacht. Es kommt zu dem in der Literatur beschriebenen By Pass Flow (BOOLTINK & BOUMA 1991, EDWARDS et al. 1993), wodurch sich in der Regel eine zweigipflige Häufigkeitsverteilung der Leitfähigkeitskoeffizienten ergibt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Die Bildung eines geometrischen Mittelwertes eignet sich nur bedingt zur Handhabung solcher Schwankungen. In Abb. 40 sind als Beispiel die Wasserleitfähigkeitswerte der Krumbasis (Profilgrube 1) vom Standort 9a aufgeführt. Hohe Einzelergebnisse bedingen ein geometrisches Mittel von 17,4 cm/d, obwohl 50 % der Messwerte unterhalb der kritischen Grenze von 10 cm/d liegen. Um einen Grenzwert der Wasserleitfähigkeit im Sinne des Bodenschutzvollzuges justiziabel umzusetzen, wird vorgeschlagen, neben dem geometrischen Mittel eine Häufigkeitsverteilung anzugeben. Liegt dann z.B. eine festzulegende Anzahl an Werten der Wasserleitfähigkeit (z.B. 50 %) unter der kritischen Marke von 10 cm/d, so könnte dies als Kriterium für einen schadverdichteten Boden herangezogen werden.

Mächtigkeit und Flächenanteil

Bei der Einstufung, inwieweit im konkreten Fall von einer schadverdichteten Fläche ausgegangen werden kann, ist der Gesamtanteil der verdichteten Bodenschicht an der Fläche sowie deren Tiefenlage und Mächtigkeit zu berücksichtigen (LEBERT et al. 2004). Dass

Fläche auch nur partiell verdichtet sein können, zeigt SCHÖN (2004) in seinen Untersuchungen: Er hat mehrere Transekte mit dem Penetrometer quer zur Bearbeitungsrichtung von Ackerflächen angelegt, wobei sich sehr unterschiedliche Eindringwiderstände ergaben. Auch SCHREY (1991) führte Penetrometermessungen auf rekultivierten Flächen durch und bildete flächenhafte Vertikalschnitte der gemessenen Eindringwiderstände. Danach ist unterhalb des Ap-Horizontes nicht auf der ganzen Fläche sondern nur stellenweise ein stark verfestigter Bodenbereich zu erkennen.

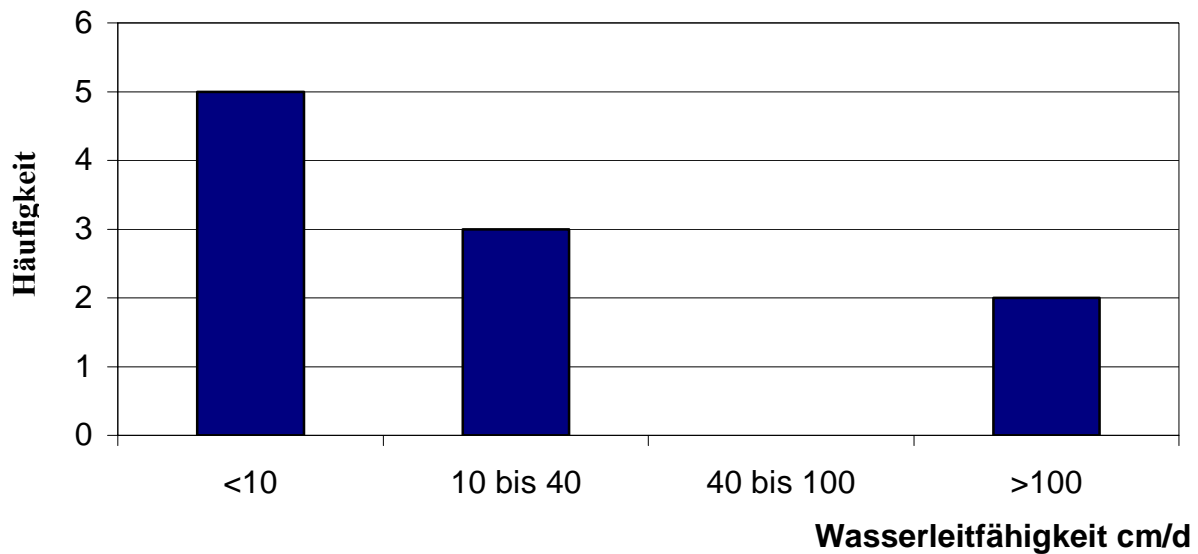


Abb. 40: Häufigkeitsverteilung der Wasserleitfähigkeit in 10-facher Wiederholung im Bt-Horizont einer Parabraunerde aus Löss

Pflanzenbauliche Bewertung

Für den praktizierenden Landwirt ist die Ertragsfähigkeit seiner Ackerflächen wichtigstes Kriterium bei der Beurteilung des Gefügezustandes. Anhand der bodenphysikalischen Kennwerte Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit kann allerdings nicht sicher bewertet werden, ob die Pflanzenwurzel durch mechanische Bodenwiderstände oder Sauerstoffmangel an ihrem Wachstum gehindert werden (LEBERT et al. 2004). So ist z.B. die Krume am Standort 19a nach dem Indikatorenmodell schadverdichtet, die Pflanzenwurzeln schaffen es aber dennoch - wenn auch in geringem Ausmaße - diese verdichtete Bodenschicht zu durchstoßen (Abb. 41). Demnach sind auch keine augenscheinlichen Ertragsminderungen festgestellt worden (WELS 2005). Um Flächen pflanzenbaulich zu bewerten, muss daher immer die Durchwurzelung berücksichtigt werden.



Abb. 41: Durchwurzelter Krumenbereich eines scharfkantigen verdichteten Polyedergefüges (Standort 19a)

Auf der anderen Seite muss eine Bodenschadverdichtung nicht immer eine Ertragsminderung nach sich ziehen. Am Standort 14g wo die Krume erheblich schadverdichtet und das Wurzelwachstum nahezu auf den gelockerten Krumenbereich beschränkt ist, werden Erträge erreicht, wie sie auf nicht schadverdichteten Flächen gemessen wurden (vgl. Abb. 35) (STEMANN 2005). Stehen Wasser und Nährstoffe im Krumenbereich in ausreichendem Maße zur Verfügung, sind Ertragsausfälle auch auf schadverdichteten Flächen nicht zu erwarten.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Unterböden der beprobten Ackerflächen derzeit ihre Funktion der Wasser- und Luftführung erfüllen. Geringe Luftkapazitäten deuten allerdings auf eine einsetzende Verformung des Bodens hin. Wesentlich stärker von Bodenverdichtungen sind die Krumenbasis- und die nicht gelockerten Krumenbereiche betroffen. Vor allem die negativen Feldgefügeansprachen und die unter der Schadschwelle liegende Luftkapazität zeugen von den Wirkungen technogener Lasteinträge. Zur Identifikation einer Bodenschadverdichtung im Sinne des BBodSchG sollten die Schadschwellenwerte speziell für Sandböden überarbeitet werden. Der Grenzwert der gesättigten Wasserleitfähigkeit sollte nicht ausschließlich anhand einer statistischen Maßzahl, sondern zusätzlich durch eine Häufigkeitsverteilung definiert werden. Des Weiteren ergeben sich

offene Fragen bezüglich der Mächtigkeit schädlicher Bodenverdichtungen, d.h. wann im konkreten Fall von einer verdichteten Fläche gesprochen werden kann.

4.2 Validierung der Prognosekonzepte zur Vermeidung von schädlichen Bodenveränderungen

Die in Kapitel 4.1 aufgeführten Erhebungsuntersuchungen beschreiben zwar den Bodengefügezustand, sie erlauben aber nicht, das Entstehen einer Schadverdichtung vor deren Eintritt zu erkennen. Dazu sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prognosemodelle (Vorbelastung, Druckbelastungsquotient, Schadverdichtungsgefährdungsklassen) erforderlich.

Abb. 42 zeigt, wie für die einzelnen Ansätze angefangen vom zugrunde gelegten Parameter die maximale Bodenbelastbarkeit abgeleitet und daraus schließlich die tolerierte mechanische Belastung berechnet werden kann. Eine Überprüfung der einzelnen Modelle kann demnach an verschiedenen Punkten ansetzen, wobei zum einen die jeweiligen Indikatoren der Verdichtungsgefährdung (Abb. 42; Validierung 1), die zugrunde gelegten Versuchsbedingungen

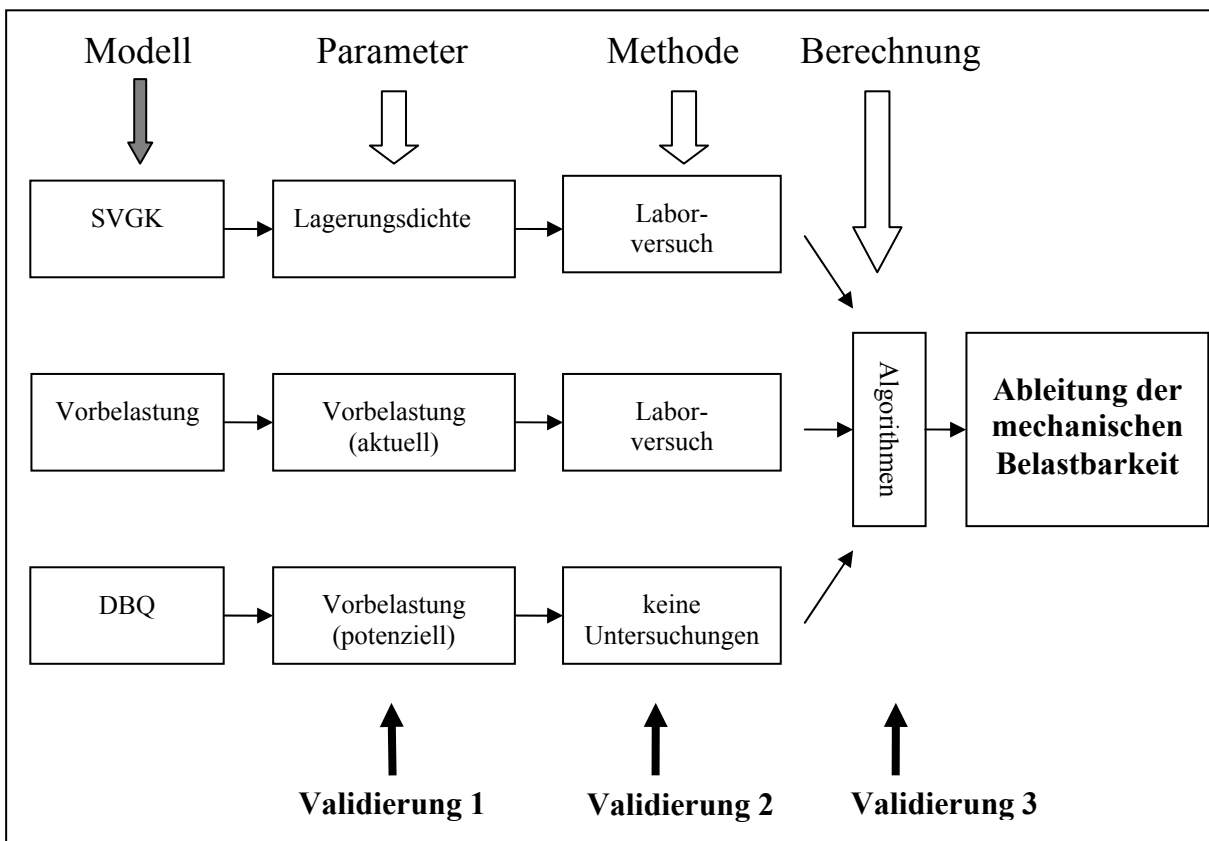


Abb. 42: Fließschema zur Modellvalidierung

(Abb. 42; Validierung 2) und die Berechnungsweisen (Abb. 42; Validierung 3) im Mittelpunkt stehen. Die Validierung der einzelnen Konzepte orientiert sich an folgenden Versuchsfragen, die jeweils gesondert in den nachfolgenden Kapiteln abgehandelt werden:

1. Eignet sich der jeweilige Verdichtungsindikator grundsätzlich zur Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit?
2. Spiegeln die zugrunde gelegten Versuchsbedingungen im Labor die realen in-situ Verhältnisse wider?
3. Welche der zugrunde gelegten Algorithmen liefern verlässliche Schätzungen zur Druckbelastbarkeit der Böden?

Mittels der erhobenen Daten soll jede Frage diskutiert werden, um daraus eine Aussage über die Anwendbarkeit der einzelnen Modelle abzuleiten. Die Modelle Vorbelastung und DBQ beruhen auf vergleichbaren Versuchsbedingungen und Berechnungsweisen, so dass es bei der Überprüfung zu einer Überschneidung beider in großen Teilen nahezu identischen Verfahren kommt. Im Fazit (Kapitel 4.2.4) erfolgt dann eine gemeinsame Betrachtung aller drei Modelle. Die Aussagen bilden die Grundlage für die Entwicklung eines auf nordrhein-westfälische Bodenbedingungen abgestimmten Bewertungsmaßstabes, welcher in Kapitel 4.3 vorgestellt wird.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass bei der Validierung besonders der Schutz des Unterbodens im Vordergrund steht. In dieser Bodentiefe ist die Fähigkeit zur Selbstauflockerung durch natürliche Vorgänge als nicht ausreichend anzusehen. Schadverdichtungen sind somit nahezu irreversibel. Eine mechanische Tiefenlockerung ist sehr kostenintensiv, die Wiederherstellung natürlicher Gefügestrukturen nach einer solchen Maßnahme als äußerst langwierig einzustufen (DÜRR et al. 1995, WEYER 2003).

4.2.1 Prognosekonzept Schadverdichtungsgefährdungsklassen

Das Modell *SVGK* geht auf Arbeiten von PETELKAU et al. (2000) zurück, die für die Grundmoränenlandschaften des Landes Brandenburg die potenzielle Verdichtungsgefährdung anhand substratspezifischer Bereiche der optimalen Lagerungsdichte ableiten. Prinzip des Ansatzes ist es, die durch landwirtschaftliche Maschinen verursachten Spannungen soweit zu begrenzen, dass keine bleibende oder nachhaltige Verformung des Bodens im Wurzelraum hervorgerufen wird, die über pflanzenökologisch tolerierbare Grenzwerte hinausgeht.

4.2.1.1 Einzelindikator Lagerungsdichte

Nach dem Modell SVGK erfüllt der Boden im Bereich der optimalen Lagerungsdichte alle für ein uneingeschränktes Pflanzenwachstum erforderlichen Funktionen der Luft- und Wasserführung. Dies garantiert höchste Pflanzenerträge.

Die substratspezifischen Lagerungsdichtegrenzwerte wurden für den Bereich der Krume und der Krumbasis unterschiedlich bestimmt:

Für die Krume erfolgt dies anhand gefügeabhängiger Ertragskurven, d.h. der optimale Lagerungsdichtebereich ist hier definiert als der Lagerungsdichtewert $\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, bei dem sich der Maximalertrag als Funktion der Lagerungsdichte ergibt. Dieses Optimum wurde aus den Ergebnissen langjähriger Feld-, Modell- und Gefäßversuche abgeleitet, wobei hoch gesicherte Beziehungen zwischen der Lagerungsdichte im Ap-Horizont und den Erträgen der wichtigsten landwirtschaftlichen Fruchtarten quantifiziert werden konnten (PETELKAU et al. 1988). Nach PETELKAU et al. (1988) erklären sich die kausalen Zusammenhänge dadurch, dass „hohe“ Dichtewerte maßgeblich die Durchwurzelbarkeit des Bodens beeinflussen und somit ein direkter Bezug zur Produktionsfunktion des Bodens besteht. Grundlage für die Bestimmung der optimalen Lagerungsverhältnisse im Bereich der Krumbasis sind hingegen nicht Ertragsmessungen sondern Kompressionstest an gesiebttem Bodenmaterial. Der Boden wird im Labor so lange verdichtet, dass die pneumatische Luftleitfähigkeit nach dem Verfahren von GÄTKE (1989) noch über 1 cm/s liegt. Die Grenzwerte lassen sich unter Berücksichtigung der Kenndaten von Humusgehalt und Korngrößenverteilung berechnen:

$$\text{Krume} \quad y = 1,4772 - 0,0037168 x_1 + 0,000026574 x_1^2 + 0,0022037 x_2 - \\ 0,000037645 x_2^2 + 0,028195 x_3 - 0,0082145 x_3^2$$

$$\text{Krumbasis} \quad y = 1,6723 - 0,0043661 x_1 - 0,00056209 x_2, \quad \text{wobei}$$

y = Lagerungsdichtegrenzwert x_2 = Schluffgehalt in %

x_1 = Tongehalt in % x_3 = Gehalt an organischer Bodensubstanz in %

Bei Überschreitung der optimalen Lagerungsdichte um $0,05 \text{ g/cm}^3$ werden die Böden als „mäßig schadverdichtet“ bzw. bei $0,20 \text{ g/cm}^3$ als „sehr stark schadverdichtet“ eingestuft.

Die Bewertung der Druckbelastbarkeit durch landwirtschaftliche Arbeitsverfahren orientiert sich beim SVGK-Modell an der Einhaltung einer definierten Lagerungsdichte. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass der Parameter Lagerungsdichte beim Prognosemodell

SVGK als Indikator für eine Bodenschadverdichtung herangezogen wird. Um zu überprüfen, ob dies auch für die untersuchten Böden zutreffend ist, wurden Korrelationsrechnungen durchgeführt, wobei das umfangreiche Datenmaterial auf statistische Zusammenhänge zwischen der Lagerungsdichte und weiteren wichtigen bodenphysikalischen Parametern überprüft wurde. Wesentliche laboranalytische Indikatoren, die die Funktionalität eines Bodengefüges beschreiben, sind die in Kapitel 4.1 behandelten Parameter Luftkapazität und die gesättigte Wasserleitfähigkeit.

Die Analysen wurden unter Berücksichtigung der Bodenartenhauptgruppe (vgl. Tab. 13) und der Untersuchungstiefe durchgeführt. Neben den Tiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden wurde an 2 Standorten (3b und 6a) der tiefere Unterbodenbereich (ca. 70 cm) beprobt. Zusätzlich wird zwischen dem regelmäßig gelockerten und dem ungelockerten Krumenbereich unterschieden. Damit soll geprüft werden, ob ein gestörtes homogenisiertes Bodengefüge stärkere statistische Beziehungen aufweist. In den graphischen Darstellungen (Abb. 43-45) werden die jeweils engsten berechneten statistischen Zusammenhänge abgebildet. Die vollständige Grafik, die die Abhängigkeiten unter Berücksichtigung aller Bodentiefen und Bodenartenhauptgruppen darstellt, findet sich im Anhang A9a und A9b.

Abb. 43 zeigt die linearen Zusammenhänge und das 95 %-Konfidenzintervall zwischen der Lagerungsdichte und der Luftkapazität für den gelockerten und nicht gelockerten Krumenbereich der Sande. Durch den Korrelationstest nach PEARSON wurde nachgewiesen, dass hier die Luftkapazität sehr eng mit der Lagerungsdichte linear korreliert ($r=0,945$ bzw. $r=0,870$). Der Zusammenhang ist höchst signifikant. Ebenfalls statistisch abgesicherte hochsignifikante Beziehungen ergeben sich für die Schluffe im Bereich der Krumenbasis und des Unterbodens. Hier führt eine zunehmende Lagerungsdichte zu einer eindeutigen Reduktion weiter Grobporen (Abb. 44). Bei den anderen Bodenartenhauptgruppen sind zwar Zusammenhänge zu erkennen, diese sind aber nicht sehr eng und erreichen allenfalls bei geringem Stichprobenumfang, wie z.B. im Krumenbereich der Tone höhere Korrelationskoeffizienten (vgl. Anhang A9a).

Inwieweit sich aus der gemessenen Lagerungsdichte Rückschlüsse auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) ziehen lassen, ist für den gelockerten Krumenbereich der Schluffe und Sande in der Abb. 45 dargestellt. Um lineare Beziehungen darstellen zu können, wurden die einzelnen Leitfähigkeitswerte einer logarithmischen Transformation unterworfen.

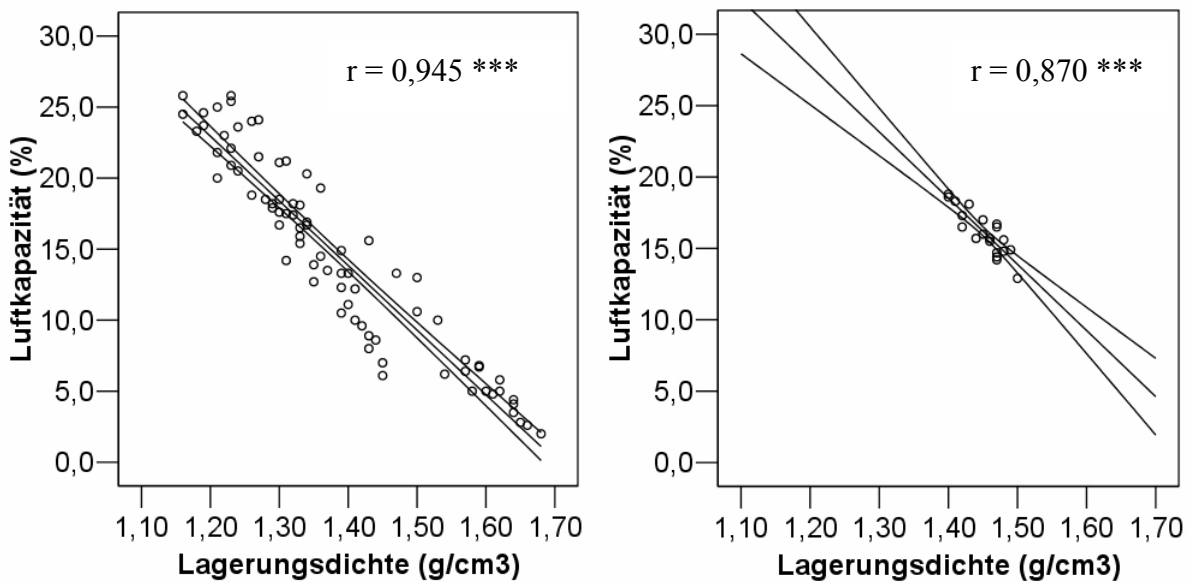


Abb. 43: Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Luftkapazität für den gelockerten (links) und nicht gelockerten (rechts) Krumenbereich der beprobten Sande ($n=78$ bzw. 20)

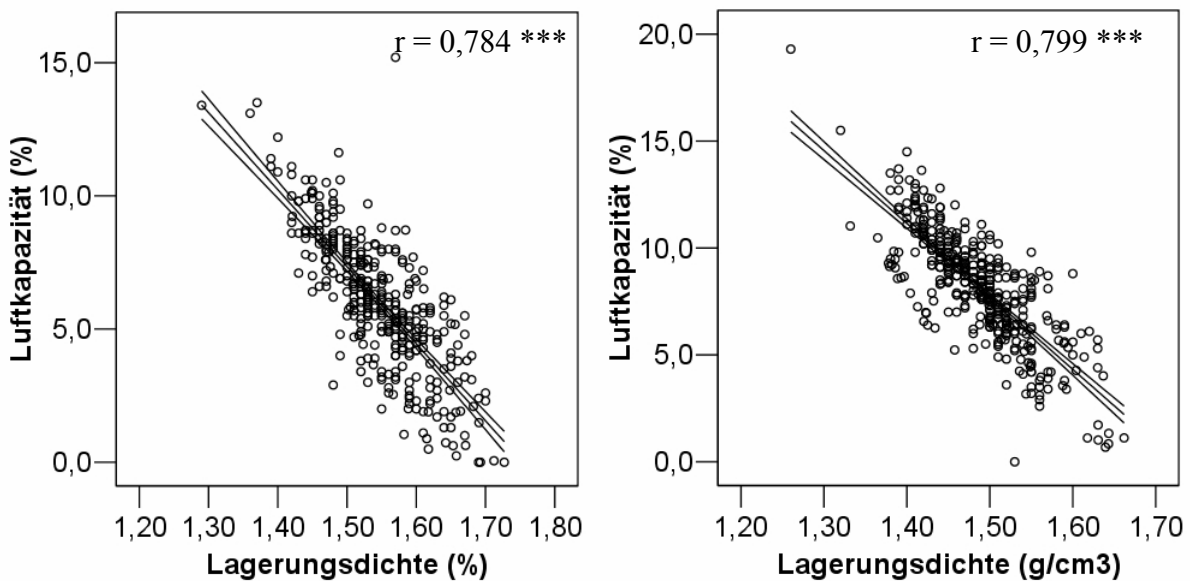


Abb. 44: Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Luftkapazität für die Krumenbasis (links) und den Unterboden (rechts) der beprobten Schluffe ($n=366$ bzw. 399)

Die Korrelationskoeffizienten verdeutlichen, dass die Beziehung schwach linear ist. Der Zusammenhang ist auch hier hochsignifikant, dies begründet sich aber allein im hohen

Stichprobenumfang. Bei den anderen Bodenartenhauptgruppen und Untersuchungstiefen wurden wesentlich geringere Korrelationen berechnet (vgl. Anhang A9b).

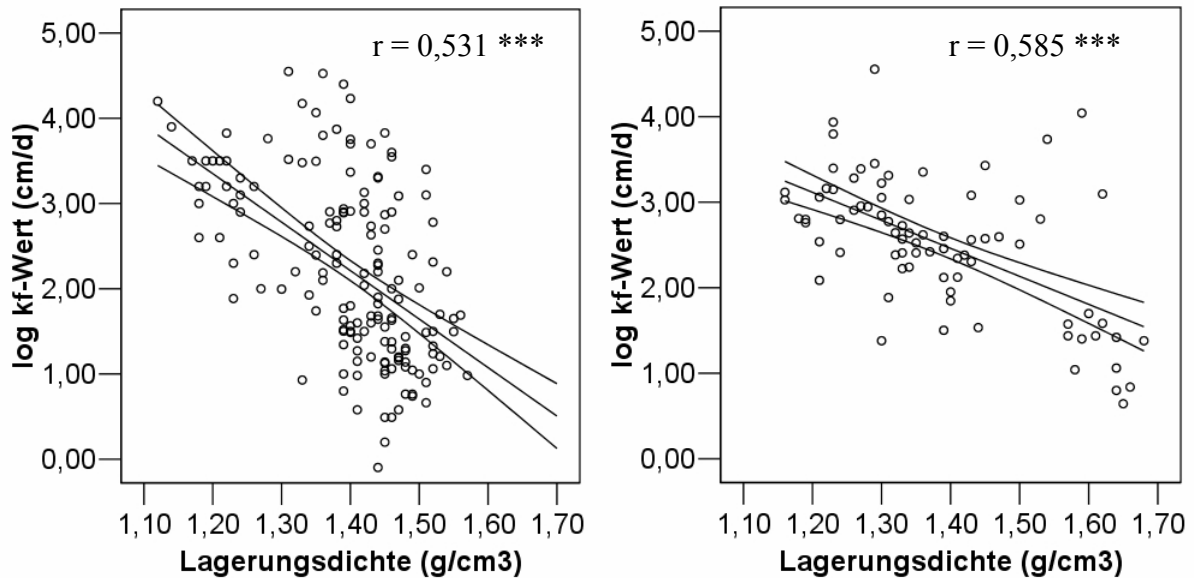


Abb. 45: Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und gesättigter Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) für den gelockerten Krumenbereich der Schluffe (links) und Sande (rechts) (n=157 bzw. 78)

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen decken sich weitestgehend mit den in der Bodenkunde verbreiteten Erkenntnissen. Die Lagerungsdichte ist ein sehr einfach zu bestimmender Parameter, der aber als reine physikalische Dichte keinen direkten bodenfunktionalen Bezug hat (LEBERT et al. 2004). Diese Auffassung teilen auch GUPTA et. al. (1989), nach denen ein Boden bei gleicher Dichte unterschiedliche Porenanordnungen und Porengeometrien besitzen kann. Bei Befahrungsversuchen auf einem tonigen Boden stellten DAWIDOWSKI & KOOLEN (1987) signifikante negative Veränderungen bodenphysikalischer Eigenschaften fest, obwohl sich die Lagerungsdichte nicht änderte. Deutlich wird dies bei den statistischen Zusammenhängen zur gesättigten Wasserleitfähigkeit. Allenfalls bei den schwach aggregierten Sandböden sind im Krumenbereich gewisse lineare Gesetzmäßigkeiten zu erkennen. Eine gefügebedingte Wasserleitfähigkeit lässt sich -wenn auch nur schwach- über die Lagerungsdichte beschreiben. Demgegenüber zeigt HARRACH (1981), dass sich bei Betrachtung von Böden aus einer geologischen Einheit und gleicher Körnung die Lagerungsdichte doch zur Kennzeichnung des Bodengefüges eignet. Diese Zusammenhänge spiegeln in etwa die Ergebnisse der untersuchten Schluffstandorte (vgl. Abb. 44) wider, bei denen fast ausschließlich Löss das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung

darstellt. Diese Auffassung konnte von TENHOLTERN (2000) durch die im Unterboden untersuchter Kipplösse gewonnenen Ergebnisse bestätigt werden. Für insgesamt 9 Standorte berechnete er mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,67 und 0,96 meist hoch signifikante Beziehungen zwischen der Luftkapazität und der Lagerungsdichte. Gleiches gilt für homogenisierte Sandböden im Bereich der bearbeiteten Krume. Nach PETELKAU & KUNZE (1980) determiniert die Lagerungsdichte hier die Porositätsverhältnisse des Bodens innerhalb substratspezifischer Grenzen.

Aufgrund der teilweise stark differierenden Auffassungen werden daher Ansätze nach CZERATZKI (1972) und MAIDL & FISCHECK (1985), die versuchen, eine optimale Lagerungsdichte im Hinblick auf das Pflanzenwachstum zu definieren, in heutiger Zeit kritisch bewertet (DÜRR et. al. 1995). Weitestgehend Einigkeit herrscht darüber, dass in gestörten Krumböden die Makroporosität und Luftdurchlässigkeit sowie die Durchwurzelbarkeit eng mit der Saatbettlagerungsdichte korreliert und somit ein gewisser Zusammenhang zum Ertrag besteht.

4.2.1.2 Versuchsbedingungen

Nach der Einstufung der SVGK reagiert ein Boden mit zunehmendem Sandanteil empfindlicher auf mechanische Belastungen. Reine bzw. schwach tonige und schwach schluffige Sande werden dem Schadverdichtungsgefährdungsdreieck nach PETELKAU et al. (2000) folgend in den Bereich „sehr stark“ verdichtungsempfindlich eingestuft. Tonigere Böden bzw. reine Tone gelten hingegen nur als „gering“ verdichtungsgefährdet (vgl. Abb. 9). LEBERT et al. (2004) erwähnen in ihren Ausführungen, dass diese Einstufung aus bodenkundlicher Sicht sehr überraschend ist, „denn die klassische bodenkundliche Vorstellung ist, dass sich Schäden am Bodengefüge umso gravierender negativ auf den Wasser- und Lufthaushalt auswirken, je feinkörniger und damit je weniger leitfähig der Boden ist“.

In den Bodenwissenschaften herrscht überwiegend die Meinung vor, dass besonders schluffreiche Böden am verdichtungsempfindlichsten reagieren. Diesen Böden fehlt es aufgrund des geringen Tongehaltes an ausreichenden Brücken- und Kontaktflächenbildnern zwischen organischen und mineralischen Komponenten, die zu einer Gefügestabilisierung beitragen (FREDE 1991). Bei mechanischer Belastung stellt sich zuerst bei schluffreichen Böden ein verdichtungsbedingter Luftmangel ein (SEMMELE & HORN 1995). Ein lehmiger Sand lässt

sich ab 18 M.-% Feuchte zwar sehr schnell verdichten (BOLLING & SÖHNE 1982), da bei sandigen Böden die Aggregatstrukturen sehr schwach ausgeprägt sind und diese somit nur einen geringen Verformungswiderstand aufweisen. Dennoch ist die Gefahr der ökologisch negativen Auswirkungen auf sandreichen Böden am geringsten, da bei Sandböden die geringe nutzbare Feldkapazität mit der Verdichtung zunimmt und ein Luftmangel erst sehr spät eintritt (SEMMELE & HORN 1995). Demgegenüber gilt nach BOLLING & SÖHNE (1982) ein lehmiger Ton als sehr verdichtungsempfindlich, da er die Bodenfeuchte nur langsam wieder abgibt und insbesondere gegenüber Langzeitbelastungen empfindlich reagiert (KÜHNER 1998).

Warum werden nach PETELKAU et al. (2000) vor allem die Sandböden als sehr stark verdichtungsgefährdet eingestuft, wogegen die Tonböden die größte mechanische Belastung erfahren dürfen? LEBERT et al. (2004) führen dies auf die Versuchsbedingungen zurück: Zur Bestimmung der Druckbelastbarkeit im Modell SVGK wird eine gesiebte entnahmefeuchte Bodenprobe in einem zylindrischen Probenbehälter im Kompressions- und Scherversuch nach PETELKAU et al. (1988) Stempeldruckmomentbelastungen in mehreren Stufen von 50 kPa bis 500 kPa ausgesetzt. Nach der letzten Komprimierung wird die verdichtete Bodenprobe spannungsfrei abgeschert und der Maximalwert der Scherkraft gemessen. In Abb. 46 ist das von PETELKAU et al. (1988) entwickelte Kompressions- und Schergerät abgebildet.

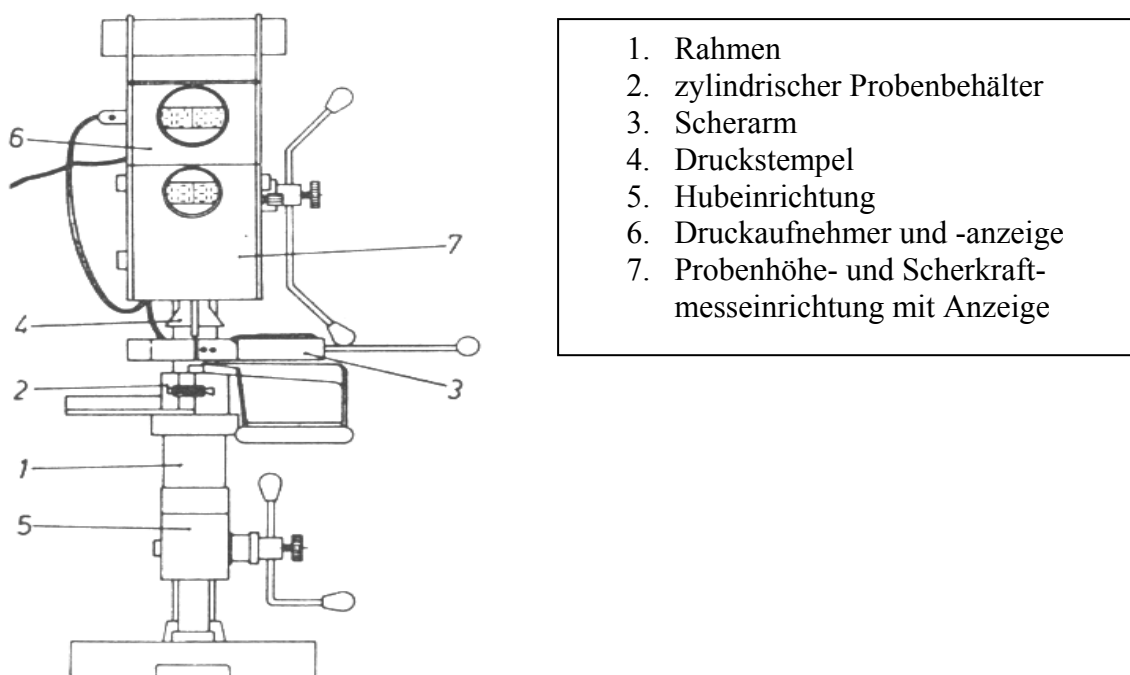


Abb. 46: Kompressions- und Schergerät nach PETELKAU et al. (1988)

Die Verwendung einer gesiebten Bodenprobe bedeutet, dass die natürliche, bodengenetisch gebildete Gefügestruktur zerstört wird. HARTGE (1994) führt auf, dass für die Gefügebewertung gewachsener Böden kein homogenisiertes Bodenmaterial verwendet werden darf. Nach LEBERT et al. (2004) bedeutet der Siebvorgang für Sandböden, dass dann die bodenbildungsbedingten Stabilitätsbrücken an den Kornkontakten fehlen und sich dadurch eine verminderte Druckstabilität ergibt. Bei bindigen Böden werden zwar die Aggregate ebenfalls auf Siebgröße zerkleinert und mögliche kohäsive Verbindungen gestört, die Einzelaggregatstabilität kann jedoch sehr hoch sein (hydrostatische Vorbelastung) (HARTGE & HORN 1991, zit. in LEBERT et al. 2004). Füllt man diese einzelnen Aggregate dann wieder in den Kompressionsring, so ergeben sich außergewöhnliche Hohlräume zwischen den Aggregaten. Beim Zusammenpressen der Bodenprobe müssen diese Aggregate dann gesichert werden, wozu aber außergewöhnlich hohe Kräfte erforderlich sind (HORN et al. 1994). LEBERT et al. (2004), die in ihrem Bericht diesen Sachverhalt bereits ausführlich beschreiben, kommen zu dem Schluss, dass ein künstlich gelockertes Gefüge nicht die Freilandbedingungen für Unterböden widerspiegelt. Der Aggregierungsgrad ist wesentliches Stabilitätskennzeichen der Böden. Aus diesem Grunde muss von einer Verwendung des Modells Schadverdichtungsgefährdungsklassen abgeraten werden.

4.2.2 Prognosekonzept Vorbelastung

Der Ansatz *Vorbelastung* basiert auf der Tatsache, dass Böden über eine horizontspezifische Eigenfestigkeit verfügen, die anhand des Wertes der Vorbelastung gekennzeichnet wird. Bei Belastungen auf den Boden bis zum Wert der Vorbelastung treten keine weiteren irreversiblen plastischen Veränderungen ein, so dass die Porendichte und Porenfunktionen erhalten bleiben (HORN et al. 2002). Das Modell zielt also dahingehend, den Lasteintrag durch landwirtschaftliche Maschinen so zu beschränken, dass die Eigenstabilität des Bodens nicht überschritten wird, der aktuelle Zustand des Bodengefüges erhalten bleibt und weitere Verdichtungen nicht zugelassen werden.

4.2.2.1 Einzelindikator Vorbelastung (aktuell)

Die Indikatorgröße Vorbelastung definiert eine mechanisch quantifizierbare Festigkeit. Sie wird in der Druckeinheit kPa angegeben, ist ein Maß für die Gefügestabilität und beschreibt direkt die aktuelle Tragfähigkeit des Bodens. Der Wert der Vorbelastung wird durch

Bodenentwicklungsprozesse beeinflusst. Dazu zählen die chemische und biologische Stabilisierung, natürliche Kompressionsvorgänge (z.B. Eisdruck) sowie Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungsprozesse im Rahmen der Bodengefügebildung (HORN 2004). Daneben können hohe Vorbelastungswerte auch in anthropogenen Kompressionen, verursacht durch Überfahrten mit schweren, nicht standortangepassten Landmaschinen, begründet sein. Im Gegensatz zu dem im Zusammenhang mit dem SVGK-Modell diskutierten Parameter Lagerungsdichte orientiert sich die maximale Belastung nicht an einer ökologisch definierten Schadensschwelle (Wurzelausbreitung, Luftleitfähigkeit), sondern einer rein mechanischen Stabilitätsgröße.

Um die Orientierung der Druckbelastbarkeit an einen solchen Parameter zu bewerten, sind in der Tab. 16 die PEARSONSchen Korrelationskoeffizienten r für die Beziehung zwischen physikalischen/mechanischen Bodenparametern und der Vorbelastung aufgeführt. Die Daten wurden profilgrubenspezifisch arithmetisch gemittelt und für den Unterboden ausgewertet.

Tab. 16: Zusammenhang zwischen physikalischen Kennwerten und der Vorbelastung für $n=43$ Wertepaare in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung

	Vorbelastung (pF 1,8) (n=43)	Vorbelastung (pF 2,5) (n=43)
	Korrelation nach Pearson	Korrelation nach Pearson
Ton	0,539***	0,503***
Schluff	0,634***	0,556***
Sand	0,662***	0,590***
Humus	0,128 ^{n.s.}	0,178 ^{n.s.}
Lagerungsdichte	0,515***	0,517***
Gesamtporenvolumen	0,541***	0,545***
Weite Grobporen	0,349*	0,394***
Feinporen	0,548***	0,526***
Wasserleitfähigkeit k_f (log)	0,386**	0,362*
Luftleitfähigkeit k_l (log)	0,102 ^{n.s.}	0,031 ^{n.s.}
Luftleitfähigkeit PL (log)	0,640***	0,611***
Eindringwiderstand	0,867***	0,852***

Die Ergebnisse beweisen zwar, dass aufgrund der Anzahl von 43 Wertepaaren sehr viele teilweise statistisch hoch gesicherte Ergebnisse festgestellt werden, diese aber aufgrund des niedrigen r nur sehr schwache Zusammenhänge zwischen den jeweils betrachteten Merkmalen beschreiben. Erst Korrelationskoeffizienten $>0,7$ werden im Falle des Suchens nach engen Beziehungen zwischen zwei Merkmalen interessant, weil ab diesem Wert das eine Merkmal hauptsächlich durch das andere erklärbar ist ($r^2 > 0,5$).

Dies trifft ausschließlich für die bodenmechanische Kenngröße des Eindringwiderstandes zu. Zu diesen Ergebnissen kommt auch HORN (1984), der signifikante Zusammenhänge zwischen der Vorbelastung und dem Eindringwiderstand feststellt. Daneben muss den Aussagen nach KIRBY (1991), SALIRE et al. (1994), Mc BRIDE & JOSSE (1996), und QASEM et al. (2000), dass die Lagerungsdichte eng mit der Vorbelastung korreliert, widersprochen werden. Bei Betrachtung der weiteren bodenphysikalischen Parameter sind nur sehr schwache Korrelationen zu erkennen.

Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass aus dem Wert der Vorbelastung keine Aussagen über den funktionalen Zustand des Bodengefüges gezogen werden können. Ein Vorbelastungswert erlaubt nur eine Aussage über die Bodentragfähigkeit. Orientiert sich bei der Bemessung der mechanischen Belastung an dem Wert der Vorbelastung, so ist dies kein Indiz dafür, dass der Boden nicht schon verdichtet und in der Erfüllung seiner Funktionen beeinträchtigt ist.

Wird allerdings die gemessene Vorbelastung überschritten, so werden die Böden deutlich in ihrer Funktion beeinträchtigt. Die Abb. 47 zeigt exemplarisch für verschiedene Bodenarten NRWs den Einfluss von mechanischer Belastung auf die Luftkapazität im Unterboden bei einer Bodenwasserspannung von pF 1,8. Im Wiederverdichtungsbereich bleibt der Boden stabil, die Luftkapazität wird nur wenig verringert. Im Erstverdichtungsbereich hingegen erfolgt eine intensive Setzung, die Luftverhältnisse im Boden werden negativ beeinflusst. Demnach ist bei mechanischen Belastungen, die über die Eigenstabilität des Bodens hinausgehen, mit einer deutlichen Reduktion des Grobporenanteils und somit einer Funktionseinschränkung der Böden zu rechnen.

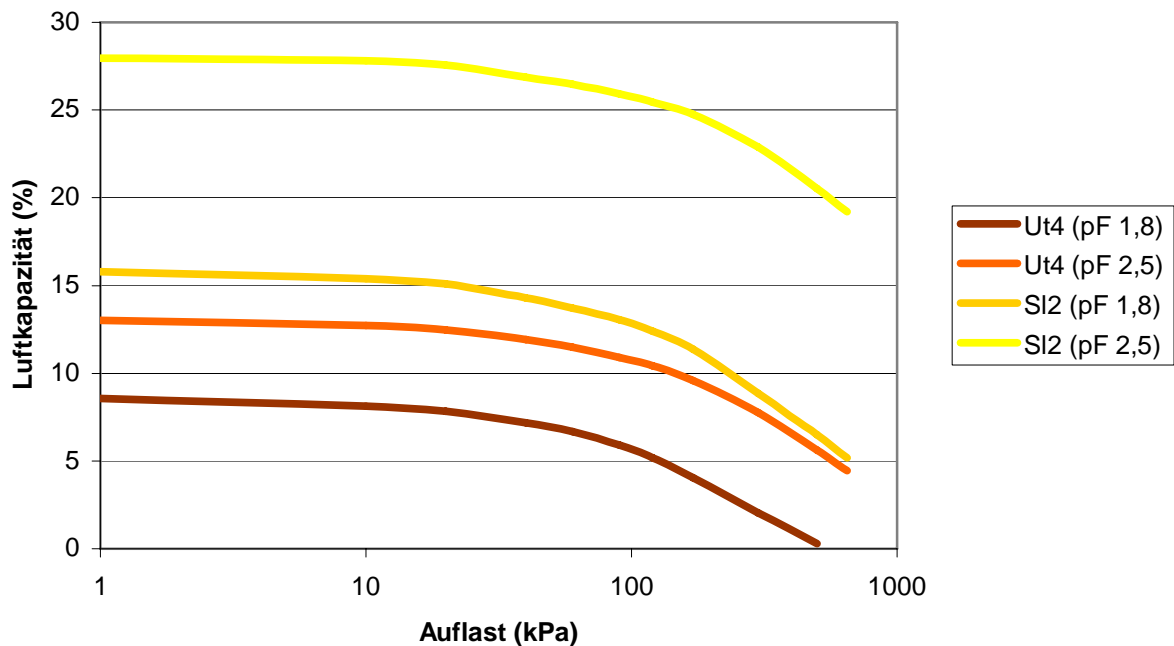


Abb. 47: Luftkapazität (%) in Abhängigkeit von der Auflast (kPa) für verschieden texturierte Bodenproben bei unterschiedlicher Bodenwasserspannung

4.2.2.2 Versuchsbedingungen

Gleichermaßen dem Modell SVGK folgend sollen für das Konzept Vorbelastung die Unschärfen des zugrunde liegenden Messverfahrens herausgestellt werden:

Seitlich begrenzter Druckversuch – keine Berücksichtigung von Scherung und Knetung

Beim Ödometerversuch (vgl. Abb. 21) wird eine ungestörte zylindrische Bodenprobe in axialer Richtung stufenweise belastet. Der die Probe umgebende Stahlring verhindert eine Verformung in radialer Richtung, d.h. die Bestimmung des Vorbelastungswertes beruht immer auf einer eindimensionalen Setzung. Die am Kompressionsprozess beteiligten Prozesse Scherung und Knetung bleiben unberücksichtigt.

Um die Ergebnisse auf in-situ-Bedingungen zu übertragen, wurden zur Verminderung der Wandreibungseffekte relativ flache Stechzylinder mit großem Durchmesser ($h=3$ cm; $d=10$ cm) verwendet. Trotzdem muss davon ausgegangen werden, dass durch das Laborverfahren die reale Bodenstabilität unterschätzt wird. Unter Freilandbedingungen wird der Boden bei mechanischer Belastung in alle Richtungen verformt, so dass die vertikale Setzung vermindert wird, was eine höhere Vorbelastung bedingt. Eine Möglichkeit, die Freilandbedingungen exakter nachzubilden, ist der Triaxialscherversuch. Ein durch Flüssigkeit oder Luft erzeugter

Seitendruck wirkt der axialen Belastung entgegen. Damit kann der Spannungs-Verformungs-widerstand unter beliebigen radialsymmetrischen Zuständen nachgebildet werden. Dieser Versuch liefert demnach auch wichtige Daten zum Scherfestigkeitsverhalten von Böden. Er wird allerdings aus Kostengründen kaum angewendet und wurde auch hier nicht durchgeführt.

Konsolidierte Bedingungen

Die Vorbelastung wird nach vollständiger Konsolidierung unter Langzeitbelastungen ermittelt. Tatsächlich aber wird beim technogenen Verdichtungsprozess durch landwirtschaftliche Maschinen und Transportfahrzeuge der Boden nur impulsartig belastet. Diese Momentbelastungen schwanken je nach Fahrgeschwindigkeit von 1-5 m/s (DÜRR et al. 1995), und liegen im Bereich der Sofortsetzung (Auspressen von Porenluft). Es kommt also bei einer Überfahrt nicht zur Konsolidierung als Endzustand der primären Verdichtungssetzung, da das Porenwasser an der Lastaufnahme beteiligt ist.

Gerade Tonböden sind aufgrund geringerer Wasserleitfähigkeiten nicht so empfindlich gegenüber Kurzzeitbelastungen. Das in den Feinporen der Tonböden reichlich vorhandene Wasser kann bei einwirkenden Drücken nicht so schnell abfließen und wirkt somit als Druckpolster (KÜHNER 1998). Sandböden hingegen weisen körnungsbedingt hohe Wasserleitfähigkeiten auf, so dass der mechanischen Belastung entgegenwirkende Porenwasserüberdrücke nicht auftreten und die Bodenprobe schon nach wenigen Minuten ihren Endsetzungszustand erreicht. Eine geringe Wasserleitfähigkeit und Kontinuität des Porensystems resultiert bei Tonböden bei Kurzzeitbelastungen (z.B. 30 Sekunden) in einer höheren Druckstabilität, da die Setzungsraten geringer, die Drucksetzungskurve flacher und somit der Punkt der stärksten Krümmung weiter nach rechts verlagert wird.

Nach HORN (2004) ist jedoch die zeitabhängige Betrachtung als Argument für eine höhere Belastbarkeit von Böden unter landwirtschaftlichen Maschinen nicht korrekt. Jede kurzfristige Überschreitung der Eigenstabilität führt zu einer zwar geringen plastischen Verformung des Bodens, langjährig aufsummierende Einzelereignissen hingegen ziehen eine deutliche Setzung und somit messbare negative Veränderung bodenfunktionaler Parameter nach sich. Anders ausgedrückt: Mehrfach wiederholte Belastungen entsprechen in ihrer Verdichtungswirkung einer Langzeitbelastung. Die Bestimmung der Vorbelastung nach abgeschlossener Konsolidierung ist also als langjähriges Schutzkonzept ausgelegt.

Ob die unter Praxisbedingungen bei kurzen aufsummierten Belastungsimpulsen auftretenden Gefügeänderungen mit den Ergebnissen aus Ödometerversuchen verglichen werden können, kann daher abschließend noch nicht geklärt werden. Eine solche Validierung erfordert langjährig angelegte Feldversuche (Dauerbeobachtungsflächen), bei denen die Bodenstabilität langfristig überschritten und die prognostizierte Änderung bodenphysikalischer Kenndaten dokumentiert werden muss.

Streubreitenproblematik

In der Literatur existieren nur wenig Aussagen zur Flächenvariabilität der Vorbelastung (QASEM et al. 2000). In Abb. 48 sind zur Verdeutlichung der Streubreitenproblematik die Vorbelastungsergebnisse eines jeden Standortes aus den entsprechenden Untersuchungstiefen für die Bodenwasserspannung p_F 1,8 anhand von Box-Plots dargestellt. Box-Plots dienen der graphischen Darstellung der Lage und Verteilung der Werte einer Variablen. Die dunkelgraue horizontale Linie innerhalb der roten Fläche eines Box-Plots kennzeichnet die Lage des Medianes (50 % Perzentil). Die untere Grenze der Box stellt das 25 % Perzentil und die obere Grenze das 75 % Perzentil der Vorbelastungswerte dar. Die dünnen Querstriche ober- und unterhalb der Box geben den größten bzw. die kleinsten Werte aus der jeweiligen Stichprobe an, der noch keinen Ausreißer oder Extremwert darstellt. Als Ausreißer werden solche Werte bezeichnet, die um mehr als das 1,5-fache der Höhe der Box über oder unterhalb der Box liegen. Extremwerte übersteigen um mehr als das dreifache der Boxhöhe das 75 % Perzentil bzw. das 25 % Perzentil.

Tatsächlich zeigen die Ergebnisse, dass die Vorbelastungswerte innerhalb eines untersuchten Horizontes erheblich schwanken können. Zwar weisen nur wenige Standorte „echte“ Ausreißer und Extremwerte auf, die Schwankungsbreiten können jedoch bis zu 100 kPa betragen. Insbesondere am Standort 9b treten in allen Untersuchungstiefen recht deutliche Mini- und Maximalwerte auf. Dies führt zu dem Schluss, dass die Vorbelastung immer an einer ausreichenden Anzahl an Wiederholungen bestimmt werden muss. Mit meist 4 Parallelmessungen je Schlag und Untersuchungstiefe ist die Wiederholungszahl bei den hier durchgeführten Untersuchungen relativ hoch.

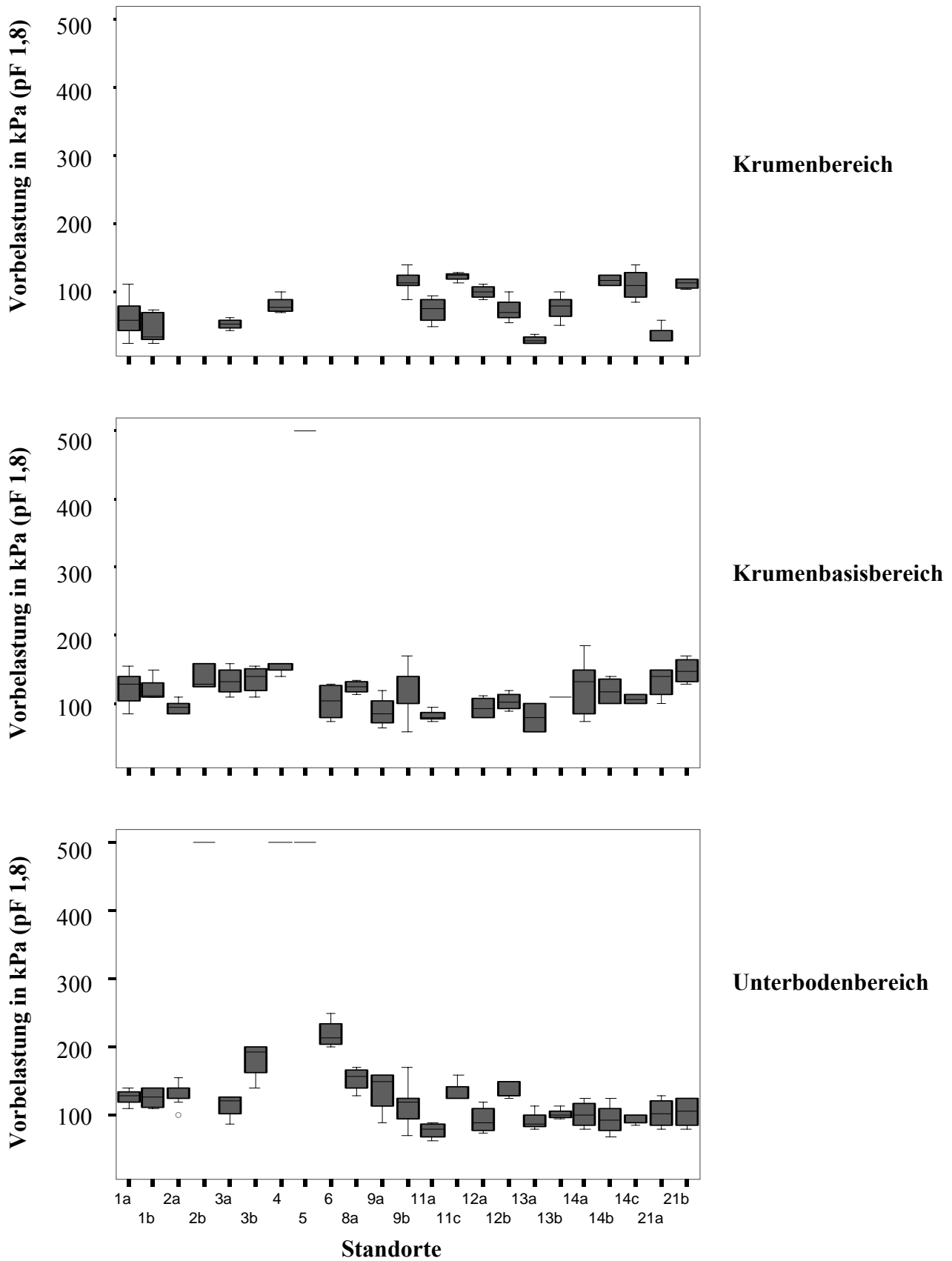


Abb. 48: Box-Plots der tiefenabhängigen Vorbelastungsergebnisse der einzelnen Standorte für eine Bodenwasserspannung von pF 1,8

4.2.2.3 Algorithmen

Aufgrund der sehr aufwendigen Messmethode zur Bestimmung der Vorbelastung wurden von mehreren Autoren (LEBERT 1989, NISSEN 1999, HENNINGS 2001) Pedotransferfunktionen ermittelt, die mittels multipler linearer und nicht linearer Regression eine Schätzung des Vorbelastungswertes bei Saugspannungen von 60 hPa (pF 1,8) und 300 hPa (pF 2,5) anhand einfach zu ermittelnder bodenphysikalischer Kenngrößen ermöglichen sollen. Die einzelnen Berechnungen sind Gegenstand der DVWK-Ansätze 234 (1995), 235 (1997) und 901 (2002) bzw. der DIN V 19688 (2000).

Diese Transferfunktionen können der räumlichen Risikoabschätzung dienen, die sich durch die Landnutzung für Umweltsysteme ergeben und bilden eine Entscheidungsgrundlage für die Wahl einer nachhaltigen Form der Bewirtschaftung (TOBIAS 2001). Sie sind stets anhand einer beschränkten Anzahl erhobener Daten entwickelt worden. LEBERT (1989) erstellte einen Regressionsansatz auf der Grundlage bayrischer Böden (37 Böden), der in das DVWK-Merkblatt 234 (1995) übernommen wurde. NISSEN (1999) erweiterte die Datenbasis für typische deutsche Bodenlandschaften (25 Böden) und stellte neue Regressionsgleichungen vor, die Gegenstand des DVWK-Merkblattes 901 (2002) sind. Auf Grundlage beider Datensätze wurde nach Berechnungen von HENNINGS (2001) die DIN V 19688 (2000) entwickelt.

In Tab. 17 sind die einzelnen Gleichungssysteme dargestellt. Sie unterscheiden sich durch verschiedene Bodenartengruppierungen sowie differierende Variablen. Das Modell nach LEBERT (1989) hebt sich vom DVWK-Ansatz 234 (1995) nur durch die Zuordnung der Bodenartengruppe Ut4 ab. Da diese bei den untersuchten Böden sehr häufig auftritt, sollen beide Regressionsmodelle berücksichtigt werden. Die DIN V 19688 (2001) wurde nur für eine Bodenwasserspannung von pF 1,8 entwickelt.

Um die Vorhersagegenauigkeit der modellierten Vorbelastungswerte zu bestimmen, werden im Folgenden die einzelnen Gleichungssysteme anhand des eigenen Datensatzes einer ausführlichen Validierung und Plausibilitätsprüfung unterzogen. Damit soll geprüft werden welches System zur modellhaften Berechnung geeigneter ist. Der Vergleich wurde ausschließlich für die Datenmatrix des Unterbodens durchgeführt. Insgesamt umfasst die Datengrundlage 193 Vorbelastungswerte, davon 98 für die Bodenwasserspannung von pF 1,8 und 95 für die Bodenwasserspannung von pF 2,5. Die notwendigen Eingangsparameter (Lagerungsdichte, Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität) wurden an 236-cm³ Stechzylindern, die Angaben zur gesättigten Wasserleitfähigkeit an 100-cm³ Stechzylindern sowie der

Feinporenanteil an gestörten Bodenproben ermittelt. Die Scherparameter Kohäsion (c) und Winkel der inneren Reibung (ϕ) ließen sich aus der Schätztabelle nach dem DVWK-Merkblatt 234 (1995) ablesen^(*). Die profilgruben- und tiefenspezifischen Mittelwerte sind dem Anhang A6 zu entnehmen.

In Tab. 18 sind für jede einzelne Gleichung des entsprechenden Regressionsmodells die gemittelten Mess- und Schätzwerte sowie die linearen Korrelationskoeffizienten nach PEARSON abgebildet. Jedes Modell enthält Gleichungen, die die Vorbelastung sowohl relativ genau als auch unsicher abschätzten. Beim DVWK 234 bzw. LEBERT-Ansatz werden die Bodenstabilitäten vor allem für sandige Böden hinreichend berechnet, wohingegen nach den NISSEN- Gleichungen besonders die Tone und Lehme hohe Korrelationen aufweisen. Das höchste r wird für die 2. Gleichung der DIN V 19688 erreicht. Zu erwähnen sei noch, dass die Gleichungen 3 und 4 nach LEBERT wesentlich bessere Zusammenhänge aufweisen, als die 3. und 4. Gleichung nach DVWK-234. Dies liegt an der unterschiedlichen Zuordnung der Bodenartengruppe Ut4. LEBERT et al. (2004) überprüften ebenfalls die einzelnen Gleichungssysteme. Die festgestellten Zusammenhänge lagen aber deutlich unter den hier berechneten. Bei Betrachtung der Tab. 18 ist zu berücksichtigen, dass hohe Signifikanzen aufgrund hoher Stichprobenumfänge nicht gleichzeitig auf eine Korrelation hinweisen. Erst Korrelationskoeffizienten $>0,7$ deuten auf einen engeren Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen hin, weil ab diesem Wert das eine Merkmal hauptsächlich durch das andere erklärbar ist ($r^2 > 0,5$).

Obwohl die Korrelationskoeffizienten ein Maß für die Stärke des Zusammenhangs darstellen, so sagen sie doch zu wenig über die Eignung des jeweiligen Modells aus. So weist zwar die 1. Gleichung nach DVWK 234 bzw. LEBERT einen relativ hohen Korrelationskoeffizienten r auf, die Gleichung neigt aber stark zum unterschätzen der gemessenen Vorbelastung. Demgegenüber muss z.B. die 3. Gleichung nach LEBERT als vorhersagegenauer eingestuft werden, da zwar ein geringeres r errechnet, die Messwerte aber den Schätzwerten wesentlich näher kommen. Die Gleichungen nach DIN V 19688 und NISSEN modellieren bei der Feuchtestufe $p_f 1,8$ bzw. $p_f 2,5$ (nur NISSEN) deutlich niedrigere Vorbelastungswerte.

Nach TIETJE & TAPKENHINRICHS (1993) hängt die Vorhersagegenauigkeit nicht von der

^(*) Die Schätztabelle für die Scherparameter c und ϕ enthält nur eine begrenzte Auswahl vorkommender Gefügeformen. Zur Anwendung der Gleichungen mussten die beprobten Horizonte einer in der Tabelle vorhandenen Aggregatklasse zugeordnet werden, die die Freilandverhältnisse möglichst nahe widerspiegelt.

Art der Modelle (theoretisch oder empirisch) ab, sondern vielmehr vom Umfang der Datenbasis (Bodengruppen), aufgrund derer die Modelle entwickelt worden sind. Aus diesem Grunde soll sich die Validierung der einzelnen Gleichungssysteme nicht allein auf den statistischen Vergleich beschränken. Vielmehr sollen die Ergebnisse differenzierter betrachtet

Tab. 17: Gleichungssysteme zur Berechnung der Vorbelastung bei pF 1,8 und pF 2,5 nach verschiedenen Regressionsmodellen

Modellansatz	Nr.	Bodenart	Gleichungen pF 1,8	Gleichungen pF 2,5
LEBERT (1989)	1	SS, Su, Slu, Sl, St2	$438,10 \text{ (dB)} - 0,008 \text{ (}\phi\text{)}^3 - 3,14 \text{ (TW)} - 0,11 \text{ (nFK)}^2 - 465,60$	$410,75 \text{ (dB)} - 0,0007 \text{ (}\phi\text{)}^3 - 3,41 \text{ (TW)} - 0,35 \text{ (nFK)}^2 - 384,71$
	2	St3, Ls	$169,30 \text{ (dB)} - 29,03 \text{ (org)}^{0,5} + 6,45 + 32,18 \log(c) - 9,44 \text{ (}\phi\text{)} + 27,25 \sin(\text{TW}) + 119,74 \log(\text{nFK}) + 19,51$	$89,50 \text{ (dB)} - 23,99 \text{ (org)}^{0,5} - 2,89 \text{ kf} + 125,76 \log(c) - 1,14 \text{ (}\phi\text{)} + 26,90 \sin(\text{TW}) - 51,46 \log(\text{nFK}) - 77,25$
	3	Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3, Ut4	$374,15 \text{ (dB)} - 4,10 \text{ (org)} + 3,38 \text{ (LK)} - 1,58 \text{ (kf)}^{-0,5} + 1,79 \text{ (c)} + 1,09 \text{ (TW)} - 6,37 \text{ (}\phi\text{)}^{0,67} + 0,088 \text{ (nFK)}^2 - 472,77$	$460,71 \text{ (dB)} - 20,33 \text{ (org)} + 9,08 \text{ (LK)} - 2,38 \text{ (kf)}^{-0,5} + 2,86 \text{ (c)} + 4,50 \text{ (TW)} - 20,96 \text{ (}\phi\text{)}^{0,67} + 0,304 \text{ (nFK)}^2 - 610,62$
	4	Lu, Lt2, Ts4	$10^{(0,843 \text{ (dB)} - 0,544 \text{ (kf)}^{0,33} - 0,022 \text{ (TW)} + 7,03 \text{ (c)}^{-1} + 0,024 \text{ (}\phi\text{)} - 0,015 \text{ (nFK)} + 0,725$	$10^{(0,844 \text{ (dB)} - 0,456 \text{ (kf)}^{0,5} - 0,026 \text{ (TW)} + 12,88 \text{ (c)}^{-1} + 0,003 \text{ (}\phi\text{)} - 0,016 \text{ (nFK)} + 1,419$
	5	Lt3, Tu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, Tt	$4,59 \text{ (dB)} - 1,02 \text{ (org)} - 16,43 \text{ (kf)}^{0,33} + 0,31 \text{ (TW)} - 1,57 \text{ (nFK)} + 3,55 \text{ (c)} + 1,18 \text{ (}\phi\text{)} - 18,03$	$70,65 \text{ (dB)} - 0,55 \text{ (org)} - 7,01 \text{ (kf)}^{0,33} + 1,32 \text{ (TW)} - 1,08 \text{ (nFK)} + 1,72 \text{ (c)} + 1,05 \text{ (}\phi\text{)} - 100,94$
DVWK (1995)	1	SS, Su, Slu, Sl, St2	$438,10 \text{ (dB)} - 0,008 \text{ (}\phi\text{)}^3 - 3,14 \text{ (TW)} - 0,11 \text{ (nFK)}^2 - 465,60$	$410,75 \text{ (dB)} - 0,0007 \text{ (}\phi\text{)}^3 - 3,41 \text{ (TW)} - 0,35 \text{ (nFK)}^2 - 384,71$
	2	St3, Ls	$169,30 \text{ (dB)} - 29,03 \text{ (org)}^{0,5} + 6,45 + 32,18 \log c - 9,44 \text{ (}\phi\text{)} + 27,25 \sin(\text{TW}) + 119,74 \log(\text{nFK}) + 19,51$	$89,50 \text{ (dB)} - 23,99 \text{ (org)}^{0,5} - 2,89 \text{ kf} + 125,76 \log c - 1,14 \text{ (}\phi\text{)} + 26,90 \sin(\text{TW}) - 51,46 \log(\text{nFK}) - 77,25$
	3	Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3	$374,15 \text{ (dB)} - 4,10 \text{ (org)} + 3,38 \text{ (LK)} - 1,58 \text{ (kf)}^{-0,5} + 1,79 \text{ c} + 1,09 \text{ (TW)} - 6,37 \text{ (}\phi\text{)}^{0,67} + 0,088 \text{ (nFK)}^2 - 472,77$	$460,71 \text{ (dB)} - 20,33 \text{ (org)} + 9,08 \text{ (LK)} - 2,38 \text{ (kf)}^{-0,5} + 2,86 \text{ c} + 4,50 \text{ (TW)} - 20,96 \text{ (}\phi\text{)}^{0,67} + 0,304 \text{ (nFK)}^2 - 610,62$
	4	Lu, Ut4, Lt2, Ts4	$10^{(0,843 \text{ (dB)} - 0,544 \text{ (kf)}^{0,33} - 0,022 \text{ (TW)} + 7,03 \text{ c}^{-1} + 0,024 \text{ (}\phi\text{)} - 0,015 \text{ (nFK)} + 0,725$	$10^{(0,844 \text{ (dB)} - 0,456 \text{ (kf)}^{0,5} - 0,026 \text{ (TW)} + 12,88 \text{ c}^{-1} + 0,003 \text{ (}\phi\text{)} - 0,016 \text{ (nFK)} + 1,419$
	5	Lt3, Tu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, Tt	$4,59 \text{ (dB)} - 1,02 \text{ (org)} - 16,43 \text{ (kf)}^{0,33} + 0,31 \text{ (TW)} - 1,57 \text{ (nFK)} + 3,55 \text{ c} + 1,18 \text{ (}\phi\text{)} - 18,03$	$70,65 \text{ (dB)} - 0,55 \text{ (org)} - 7,01 \text{ (kf)}^{0,33} + 1,32 \text{ (TW)} - 1,08 \text{ (nFK)} + 1,72 \text{ c} + 1,05 \text{ (}\phi\text{)} - 100,94$
NISSEN (1998)	1	S und U	$68,0 \text{ (dB)} - 3,09 \text{ (TW)} - 32,2 \text{ (org)}^{0,67} - 0,64 \text{ (S)} + 13,7 \text{ (c)}^{0,5} + 35,0$	$-7,79 + 0,484 \text{ (c)} + 1,74 \text{ (}\phi\text{)} + 38,3 \text{ (dB)} - 44,1 \text{ (org)}^{0,67} + 3,09 \text{ (TW)}$
	2	L und T	$(6,20 \text{ (dB)} + 0,284 \text{ (nFK)} + 0,260 \text{ (TW)} - 0,597 \text{ (org)} + 0,049 \text{ (S)} - 11,2)^2$	$-125,3 + 0,689 \text{ (c)} + 70,8 \text{ (dB)} + 3,70 \text{ (nFK)} + 1,75 \text{ (TW)} - 7,78 \text{ (org)} + 0,49 \text{ (S)}$
DIN V-19688 (2001)	1	Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Slu, Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3	$69,5 \text{ (dB)} - 13,3 \text{ (org)} - 23,3 \text{ (LK)}^{0,5} + 1,45 \text{ (c)} + 0,085 \text{ (}\phi\text{)}^2 - 56,6$	--
	2	Ss, Sl4, St2, Ut4, Ls2, Ls3, Ls4, Lu, Tu4	$119,9 \text{ (dB)} - 10,1 \text{ (org)} - 12,6 \text{ (TW)}^{0,5} + 11,1 \text{ (c)}^{0,5} - 78,9$	--
	3	St3, Lt2, Lt3, Lts, Ts2, Tu3, Tl, Tt	$-42,7 \text{ (dB)} - 20,7 \text{ (org)}^{0,5} - 14,2 \text{ (nFK)}^{0,5} - 20,8 \text{ (LK)}^{0,5} + 5,17 \text{ (}\phi\text{)}^{0,5} + 1,23 \text{ (c)}^{0,5} + 231$	--

und die einzelnen Abweichungen erklärt werden. Daher werden im Folgenden die gemessenen und geschätzten Einzelwerte der Vorbelastung nicht nur nach den einzelnen Gleichungen und der Bodenwasserspannung sondern auch nach den jeweiligen Bodenartenhauptgruppen ausgewertet. Dies bedingt eine genauere Betrachtungsweise und ermöglicht es, die Gründe für die teilweise schlechte Vorhersagegenauigkeit besser zu interpretieren.

Tab. 18: Mess- und Schätzwerte sowie korrelative Beziehungen der einzelnen Regressionsmodelle zur Abschätzung der Vorbelastung für 2 Bodenwasserspannungen

	Nr.	pF 1,8				pF 2,5			
		n	Messwert	Schätzwert	Korrelationskoeffizienten r	n	Messwert	Schätzwert	Korrelationskoeffizienten r
LEBERT (1989)	1	45	241	113	0,71***	41	268	147	0,71***
	2	--	--	--	--	--	--	--	--
	3	17	106	123	0,40 ^{n.s.}	16	169	186	0,38 ^{n.s.}
	4	25	105	188	0,28 ^{n.s.}	22	146	170	0,19 ^{n.s.}
	5	11	113	130	0,52 ^{n.s.}	11	149	161	0,64*
DVWK (1995)	1	45	241	113	0,71***	41	268	147	0,71***
	2	--	--	--	--	--	--	--	--
	3	33	100	122	0,46**	32	155	185	0,05 ^{n.s.}
	4	9	126	166	0,48 ^{n.s.}	6	158	137	0,74 ^{n.s.}
	5	11	113	130	0,52 ^{n.s.}	11	149	161	0,64*
NISSEN (1998)	1	78	182	100	0,09 ^{n.s.}	73	219	110	0,17 ^{n.s.}
	2	20	119	80	0,60**	17	152	125	0,08 ^{n.s.}
DIN V- 19688 (2001)	1	37	132	59	0,07 ^{n.s.}	--	--	--	--
	2	44	220	105	0,87***	--	--	--	--
	3	17	116	92	0,49*	--	--	--	--

Die Abb. 49-52 zeigen für die Bodenartenhauptgruppen die gemessenen (blaue Linie) und die nach den einzelnen Gleichungen modellierten Werte der Vorbelastung (rosa/gelbe/türkise/violette Linie). Jeder Punkt symbolisiert einen Messwert, die Ergebnisse sind aufsteigend sortiert.

Bezogen auf die schluffreichen Böden (Abb. 49a und 49b) schätzen alle Ansätze mit Ausnahme der DVWK 234-Gleichungen die Vorbelastung relativ genau. Die Überschätzung durch den DVWK 234-Ansatz kommt dadurch zustande, dass die Bodenart Ut4, die mit $n=20$ stark vertreten ist, in die ursprüngliche Gruppe der Tone und tonigen Lehme (<35 % Ton) nach LEBERT (1989) eingestuft wurde. Warum diese Umgruppierung vorgenommen wurde ist nicht nachzuvollziehen (LEBERT et al. 2004). Für die Bodenwasserspannung pF 2,5 werden vor allem geringe Stabilitätswerte überschätzt, höhere Vorbelastungen werden mit hinreichender Genauigkeit vorhergesagt. Insgesamt lassen sich noch relativ gute Übereinstimmungen zwischen berechneten und modellierten Werten feststellen. Dies ist auch nicht verwunderlich, da die Schluffböden aus Löss mit insgesamt 4 Standorten in den jeweiligen Originaldatensätzen vorhanden sind.

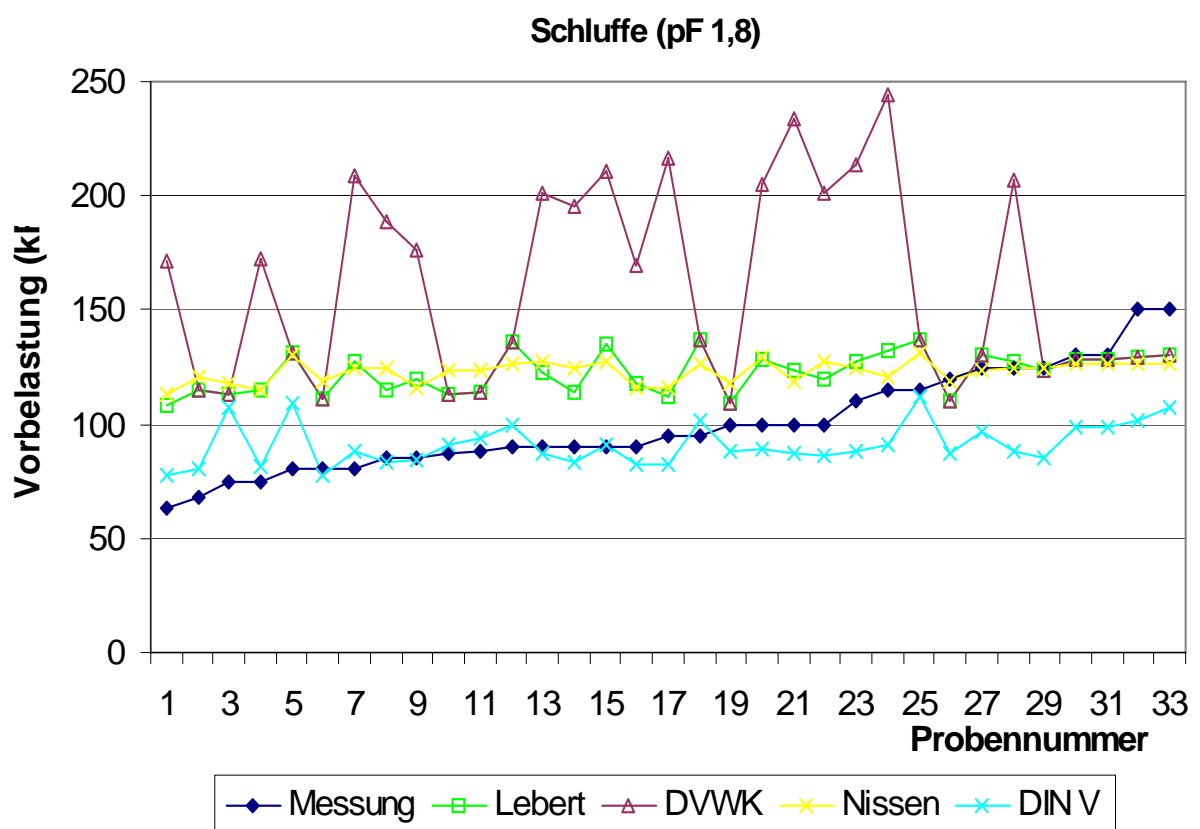


Abb. 49a: Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Schluffstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen

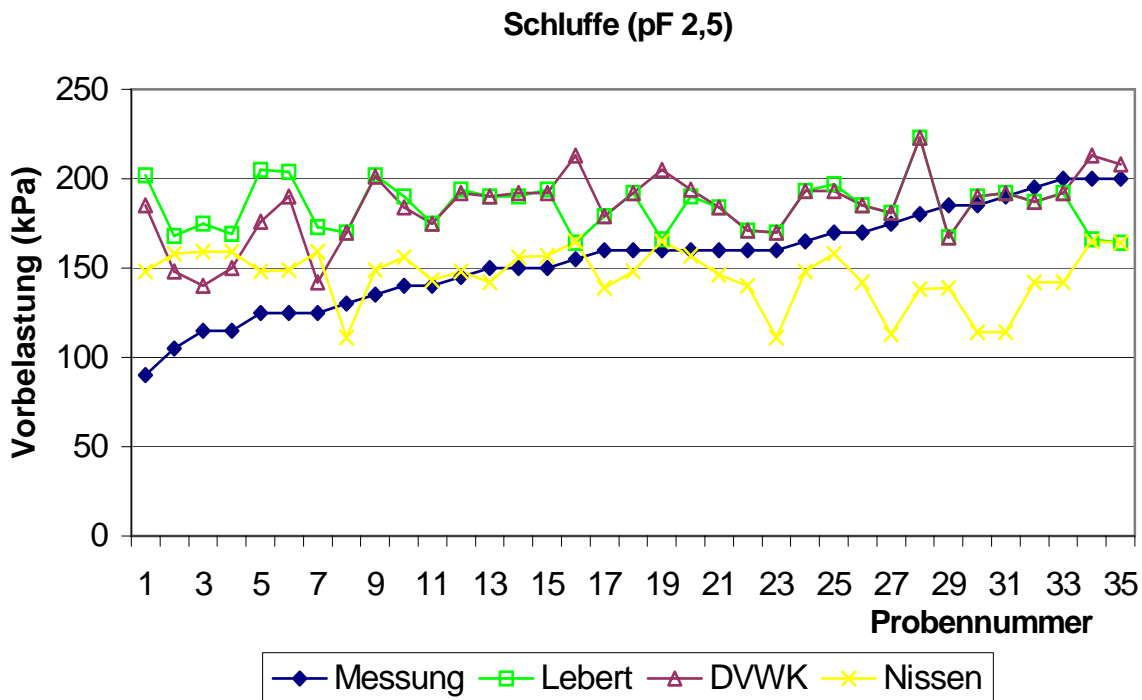


Abb. 49b: Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Schluffstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen

Die Gruppe der tonigen Böden wird durch insgesamt 2 Standorten und 33 Einzelmessungen repräsentiert (Abb. 50a und 50b). Der Modellansatz von NISSEN unterschätzt vor allem gemessene Vorbelastungen über 120 kPa. Der Grund dürfte darin liegen, dass die Scherparameter in der Gleichung für Tone nicht berücksichtigt werden. Gerade bei diesen Böden können Aggregierungsprozesse hohe Stabilitäten bedingen. Die DVWK 234-Gleichungen berechnen für die Bodenwasserspannung pF 2,5 relativ genaue Vorbelastungswerte, für die Spannung pF 1,8 werden vor allem niedrige Vorbelastungswerte überschätzt. Letztere treten vor allem bei Bodenproben mit geringen Lagerungsdichten auf. Die Lagerungsdichte hat aber bei der Wasserspannung von pF 1,8 nach dem DVWK 234-Ansatz nur einen geringen Einfluss auf die Vorbelastung (Faktor $4,59 \cdot \text{Lagerungsdichte}$, vgl. Tab. 18), so dass hier der Grund für die Überschätzung liegen dürfte. Demgegenüber ist bei einer Wasserspannung von pF 2,5 die Lagerungsdichte stärker gewichtet (Faktor $70,65 \cdot \text{Lagerungsdichte}$, vgl. Tab. 18).

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Gruppe der Lehme (Abb. 51a und 51b). Hier weichen allerdings die Schätzwerte nach NISSEN und der DIN V 19688 noch wesentlich stärker von den gemessenen Ergebnissen ab. Die beprobten Lehme stammen von den Standorten 8a, 9a, 9b. Obwohl alle Standorte vergleichbare Lagerungsdichten, Luftkapazitäten etc. aufweisen schwanken die gemessenen Vorbelastungsergebnisse sehr stark. Ein Grund könnte hier wieder

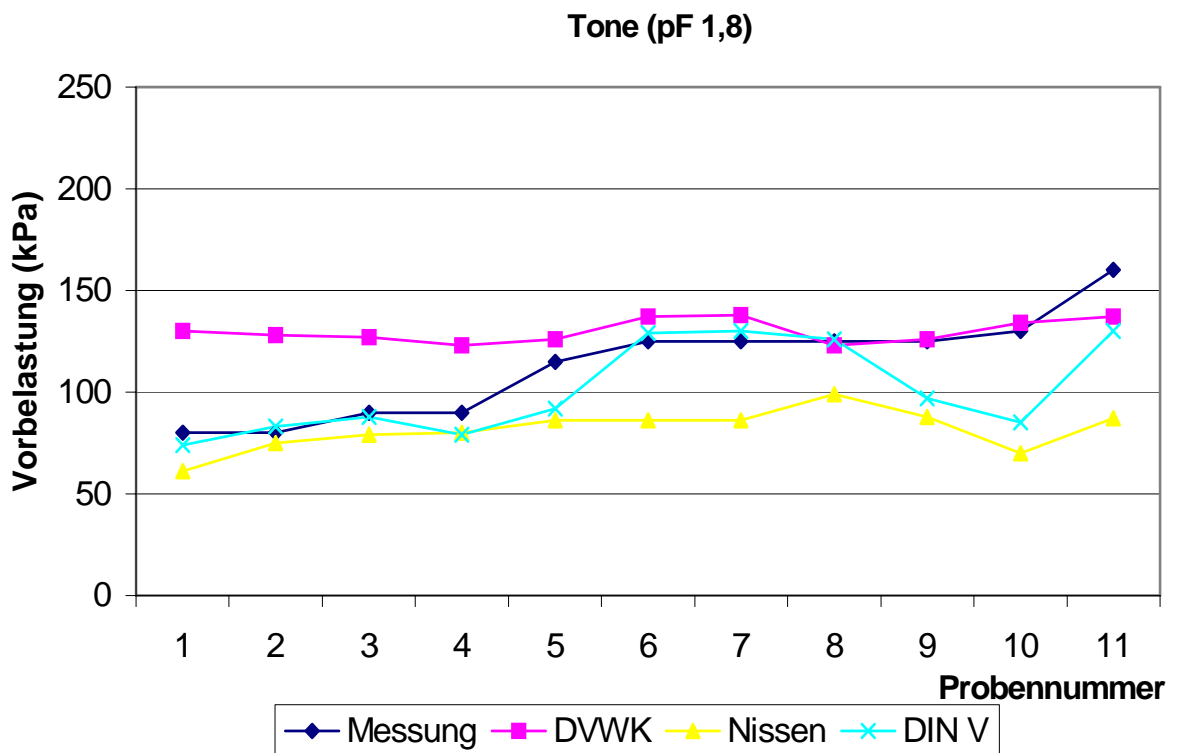


Abb. 50a: Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Tonstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen

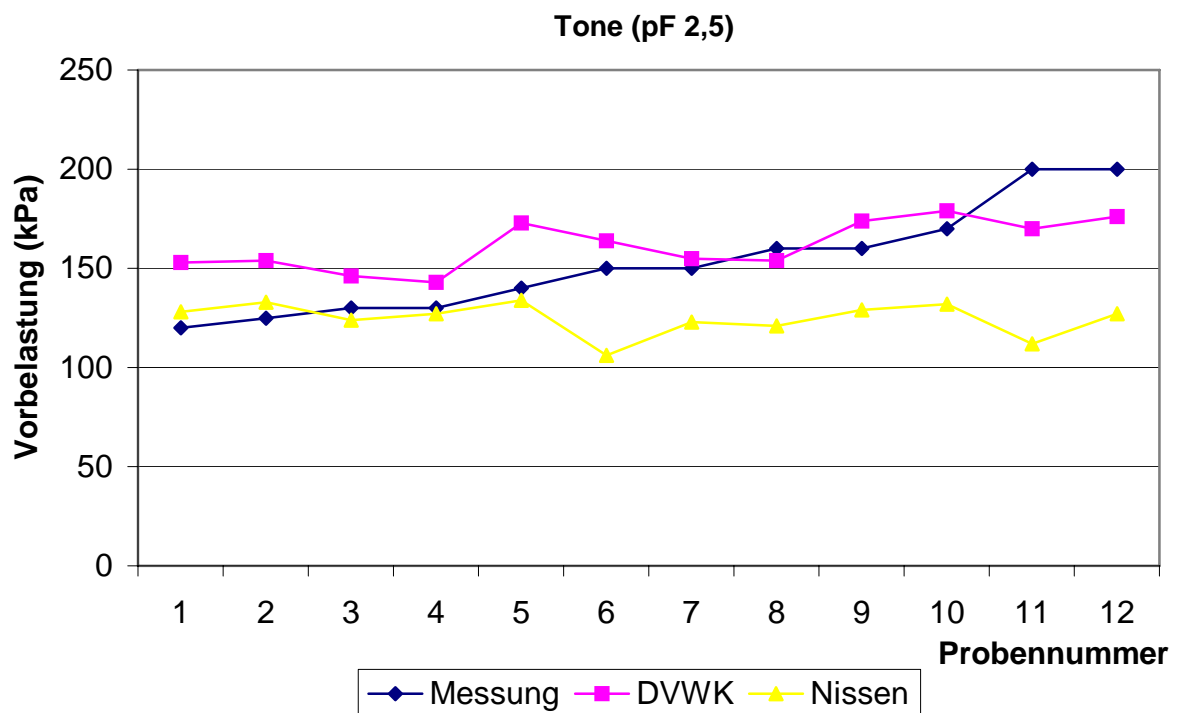


Abb. 50b: Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Tonstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen

in den unterschiedlichen Aggregierungsgraden liegen, die besonders am Standort 9a und 9b auftreten und bei den NISSEN-Gleichungen überhaupt nicht und bei den DIN V 19688 Gleichungen in zu geringem Maße berücksichtigt werden.

Bei den Sanden (Abb. 52a und 52b) unterschätzen alle Gleichungen sehr stark die gemessene Vorbelastung. Dies geht soweit, dass selbst bei gemessenen Vorbelastungen >100 kPa die berechneten Werte im negativen Bereich liegen und somit gleich null gesetzt werden. Das liegt daran, dass die untersuchten Sande selbst bei geringen Lagerungsdichten noch verhältnismäßig hohe Stabilitäten aufweisen, die Lagerungsdichte aber bei dieser Bodenart den Haupteinfluss auf die modellierten Werte ausübt. Der Einfluss kommt besonders bei den stabilen Unterböden der Standorte fluviatiler Sandablagerungen zum Ausdruck (Standort 2b, 5a, 6a). Hier werden sehr hohe Stabilitäten und gleichzeitig hohe Lagerungsdichten gemessen. Die Berechnungen spiegeln aber diese hohen Vorbelastungswerte nur unbefriedigend wider.

Eine Überprüfung der Regressionsgleichungen wurde bereits von mehreren Autoren durchgeführt (SCHÄFER-LANDEFELD & BRANDHUBER 2001, QASEM et al. 2000). Sie raten von einer Verwendung der Berechnungsmodelle ab. Selbst NISSEN (1999) bezeichnet seine eigenen Gleichungen mit mittleren Schätzfehlern von 50 kPa bis 60 kPa als sehr unsicher. Validierungsarbeiten wurden demnach schon **mehrfach** durchgeführt.

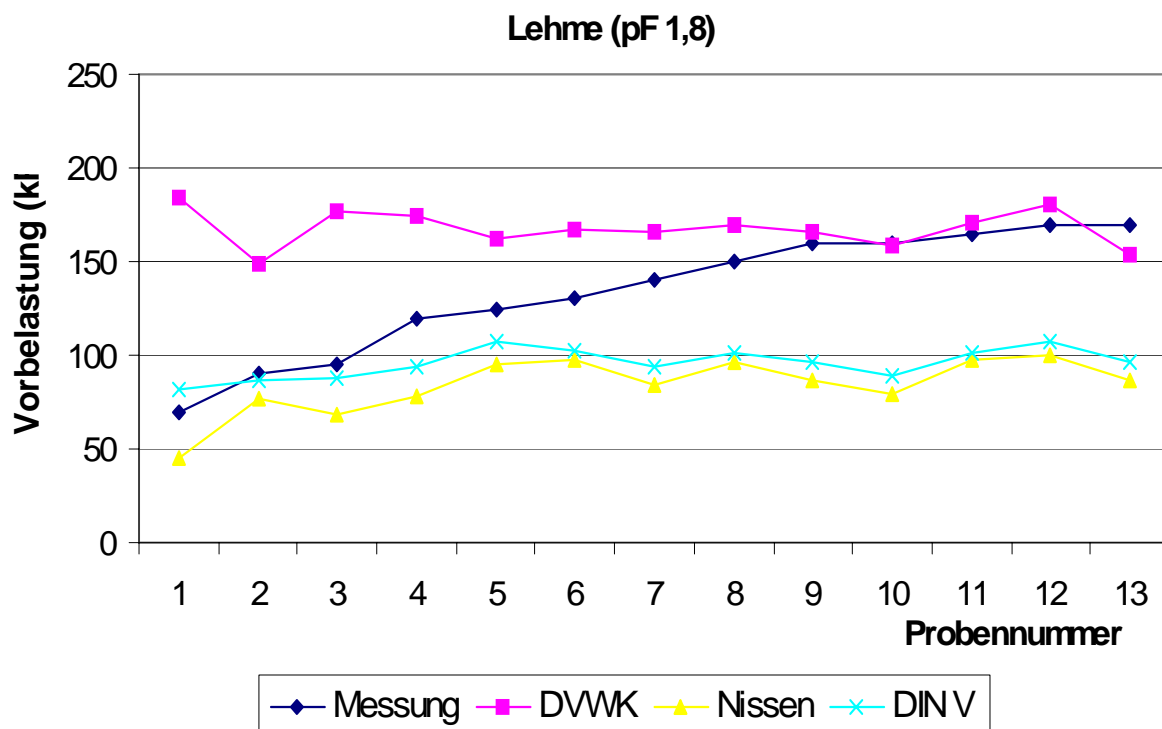


Abb. 51a: Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Lehmstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen

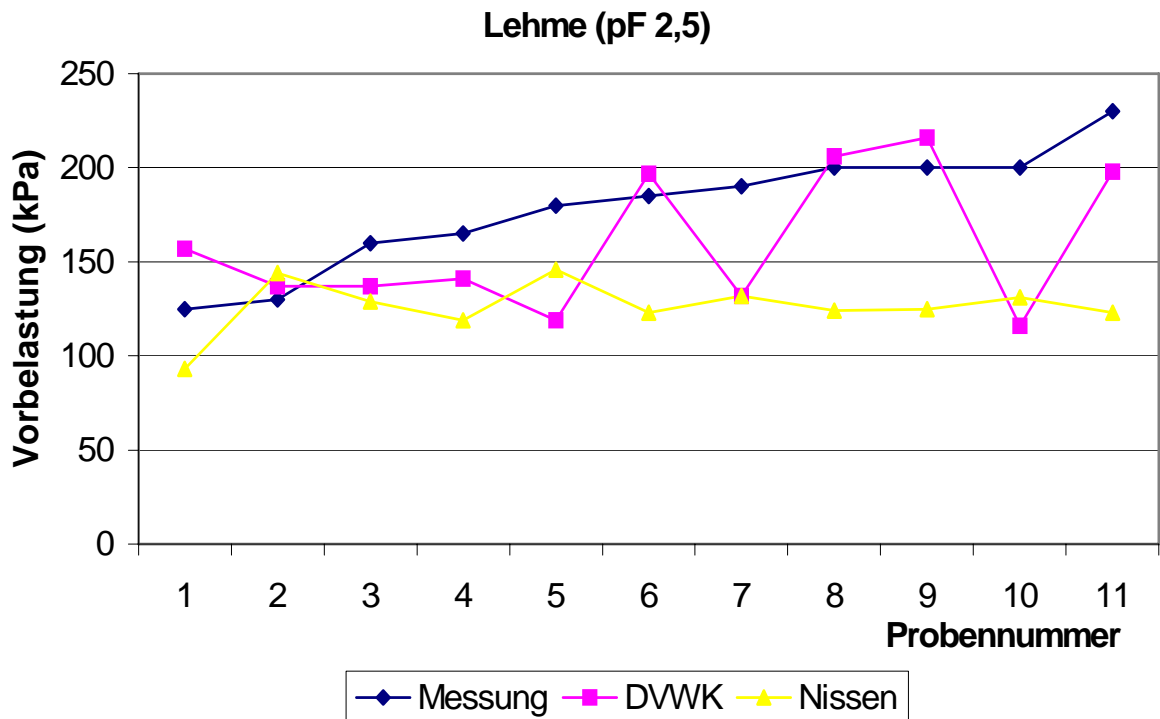


Abb. 51b: Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Lehmstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen

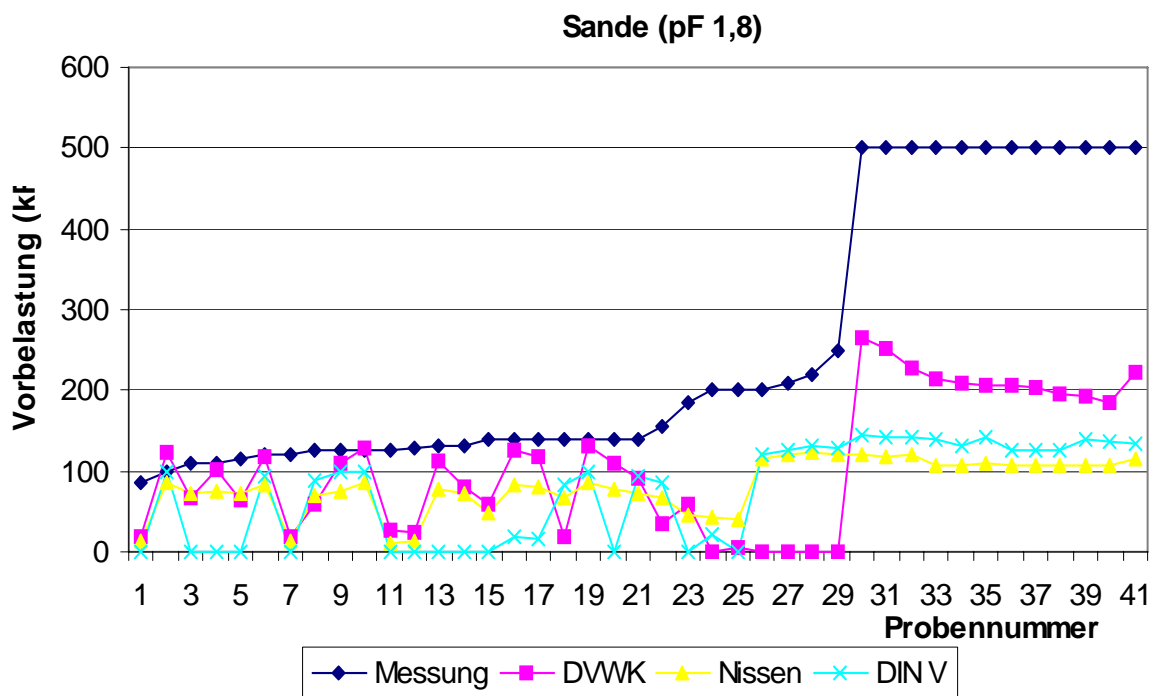


Abb. 52a: Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Sandstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen

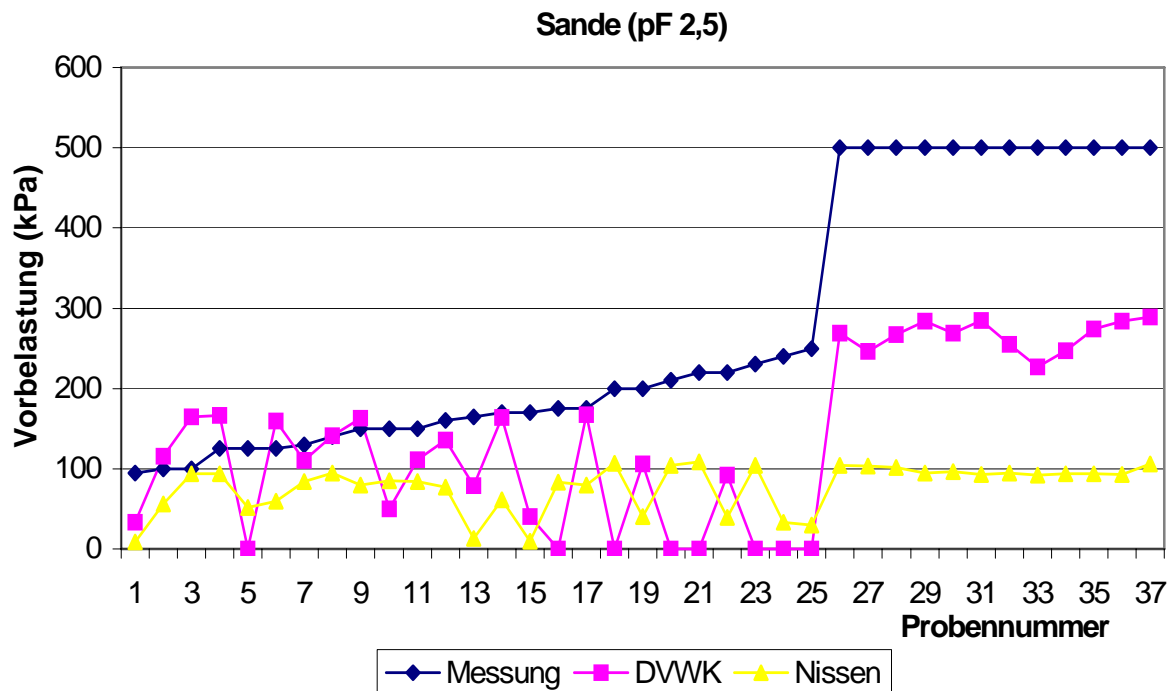


Abb. 52b: Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Sandstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen

4.2.3 Prognosekonzept Druckbelastungsquotient

Das Modell *DBQ* (PAUL 2004) beruht auf einer Weiterentwicklung des Modells der Vorbelastung, wobei die potenzielle Verdichtungsgefährdung und das Vorsorgeprinzip im Mittelpunkt stehen. Nach dem Verfahren DBQ darf der Boden bis an die Untergrenze der ökologischen Funktionsfähigkeit verdichtet werden. Ein Luftgehalt von 5 Vol.-% verbunden mit einer gesättigten Wasserleitfähigkeit von 10 cm/d bilden dabei im krumennahen Unterboden die Grenze ökologischer Mindestfunktionalität. Die maximale Druckbelastbarkeit kann nach diesem Verfahren höher oder geringer als die aktuelle Vorbelastung sein, je nachdem ob ein überlockerter oder ein schadverdichteter Boden vorliegt.

4.2.3.1 Einzelindikator Vorbelastung (potenziell)

Die bodentypische Druckbelastbarkeit wird ebenso wie im Vorbelastungsmodell in der Einheit kPa angegeben. Im Unterschied zur Vorbelastung im Sinne der aktuellen Verdichtungsgefährdung bildet der vertikale Bodendruck den Grenzwert für die maximale zulässige Belastung, bei dem sich im Ödometertest an den ungestörten Bodenproben eine Luftkapazität von 5 Vol.-% einstellt (vgl. Ab. 13).

Bei der Betrachtung der Abb. 13 stellt sich die Frage, ob die Luftkapazität als Maß für die maximale Belastbarkeit grundsätzlich als sinnvoll erscheint. Bereits die Diskussion des Indikatorenmodells hat gezeigt, dass ein Sandboden nur sehr schwer an die Luftkapazitätsgrenzen von 5 Vol.-% zu „drücken“ ist (vgl. Abb. 38). Diese Böden wären dann unendlich belastbar. Zwar tritt gerade bei Sandböden aufgrund der Korngrößen ein Luftmangel erst sehr spät eintritt (SEMMELE & HORN 1995), dennoch hemmen verdichtete Sandböden die Durchwurzelung und schränken den Boden somit in der Erfüllung seiner Funktion (Produktionsfunktion) ein.

Ein weiteres Problem ergibt sich bei tonreichen Böden. Diese weisen aufgrund ihres hohen Anteils feinsten Poren ($<2 \mu\text{m}$) „natürliche“ geringe Luftkapazitäten auf. Nach der KA5 (AG BODEN 2005) variieren diese in den Bodenartengruppen der Tone bei mittlerer effektiver Lagerungsdichte im Bereich zwischen 2,5 und 5,5 Vol.-%. Auch HARTGE & HORN (1991) beziffern die üblichen Luftkapazitäten für Tonböden auf 0 bis 5 Vol.-%. Dennoch befinden sich diese Böden nicht an der Untergrenze der ökologischen Funktionsfähigkeit. Die Ergebnisse der Statuserhebung in NRW haben bereits verdeutlicht, dass sich alle tonreichen Unterböden trotz geringer Luftkapazitäten in einem guten Gefügestand befinden (vgl. Tab.15).

Zumindest für Sand- und Tonböden ist demnach die Abschätzung der Druckbelastbarkeit nach dem Modell DBQ als fragwürdig einzustufen.

Für die Schluffböden führen Spannungen von ca. 130 kPa im Unterboden bei nassen und 150 kPa bei trockenen Verhältnissen zu Luftkapazitätswerten unter 5 % (vgl. Abb. 47). Hier stellt sich die zentrale Frage, ob eine weitere Degradierung des Unterbodens zugelassen werden sollte, oder ob nicht zumindest der vorhandene intakte Bodengefügestand erhalten bleiben sollte. Mit einer tolerierten Verdichtung der Böden bis an das Minimum ihrer Funktionsfähigkeit bewegt man sich im absoluten Grenzbereich schädlicher Bodenveränderungen (vgl. Kapitel 4.1.3). Ziel im Sinne der Vorsorge ist es aber, nicht Minimal- sondern Optimalzustände herbeizuführen. Nach SCHRÖDER & SCHNEIDER (2004) „dürfen Unterböden nirgends weiterverdichtet werden, denn es gibt keinen Boden, dessen Funktion dadurch nicht eingeschränkt werden würde“.

4.2.3.2 Versuchsbedingungen

Die Ermittlung der potenziellen Verdichtungsgefährdung erfolgt durch Berechnungen, die auf den Datensatz von LEBERT (1989) zurückgreift. Diese wiederum beruhen auf Belastungsversuchen im Ödometer, so dass die möglichen Fehlerquellen den Ausführungen in Kapitel 4.2.2.2 entsprechen.

4.2.3.3 Algorithmen

Die Ableitung der maximalen Druckbelastbarkeit erfolgt durch Einsetzen der entsprechenden Orientierungswerte für die Luftkapazität und Porenwegsamkeit einschließlich der sich damit verändernden Bodenparameter in die Regressionsgleichungen zur Berechnung der Vorbelastung nach LEBERT (1989). Die entsprechenden Algorithmen wurden bereits in Kapitel 4.2.2.3 einer Überprüfung unterzogen.

4.2.4 Fazit

Die Validierungsergebnisse haben gezeigt, auf welcher unterschiedlichen Weise die einzelnen Modelle an die Problematik der mechanischen Belastbarkeit herangehen. Während der Ansatz SVGK die tolerierte Belastung an pflanzenbaulich definierten Optimalbereichen ausrichtet, verwendet die Vorbelastung eine rein mechanische Stabilitätsgröße. Der DBQ verhindert das Überschreiten der bodeneigenen Stabilität am Kriterium der Luftkapazität.

Das Modell *SVGK* ist für die Abschätzung der Druckbelastbarkeit der untersuchten Böden nicht geeignet. Zum einen orientiert sich die Druckbelastbarkeit an Optimalbereichen der Lagerungsdichte, die es aber für aggregierte Unterböden nicht gibt. Zusammenhänge zwischen Lagerungsdichte und Parametern, die die Funktionsfähigkeit beschreiben, werden allenfalls für Böden gleicher Entstehung festgestellt. Was aber die Anwendung des PETELKAU-Ansatzes vielmehr in Frage stellt, ist die Tatsache, dass die Drucksetzungsversuche an gestörten Bodenproben durchgeführt wurden. Dies spiegelt nicht die Stabilitätskriterien aggregierter Unterböden wider. Das Modell eignet sich allenfalls für die Bereiche bearbeiteter Krumböden.

Der Ansatz *Vorbelastung* zielt auf die Konservierung des vorhandenen Unterbodengefüges ab. Der Indikator Vorbelastung und das Drucksetzungsverhalten stellen aussagekräftige

Parameter für die Beschreibung des Bodenstabilitätszustandes dar. Zieht man die Erhebungsuntersuchungen aus Kapitel 4.1 hinzu, so wird bei der Orientierung der Druckbelastbarkeit an die Vorbelastung das vorhandene nicht schadverdichtete Unterbodengefüge erhalten. Die Tatsache, dass bei Anwendung des Konzepts einem geschädigten Bodengefüge kein Spielraum für eine nötige Regeneration gelassen wird, muss für die untersuchten Böden als unerheblich eingestuft werden. Wird allerdings die Vorbelastung überschritten, so muss mit einer schleichenden Degradierung und somit Funktionseinschränkung der Böden gerechnet werden. Die Validierung der Regressionsgleichungen zeigt, dass von deren Verwendung abgeraten werden muss. Eine bundesweite Zusammenführung der Vorbelastungsdaten unter stärkerer Berücksichtigung der Gefügeformen dürfte aber eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit erwarten lassen. Für die Anwendung des Konzeptes ist es ohnehin unerheblich, ob die Vorbelastung experimentell oder rechnerisch ermittelt wird. Bezüglich der Versuchsbedingungen zeigt das Modell Vorbelastung ebenfalls Schwachstellen auf, mit der Verwendung ungestörter Bodenproben ist aber zumindest eine realistische Darstellung der in-situ Verhältnisse möglich. Allerdings sind hohe Wiederholungszahlen nötig, um der Streubreitenproblematik entgegenzuwirken. Die Berücksichtigung wechselnder Bodenwasserspannungen kann durch Ergänzungsmessungen erfolgen. Obwohl noch weitere Validierungs- und Ergänzungsarbeiten erforderlich sind, überzeugt das Modell Vorbelastung und lässt auf lange Sicht einen wirkungsvollen Beitrag zum Schutz des Unterbodengefüges erwarten. Zum weiteren Entwicklungsbedarf zählt u.a. die Abgleichung der erhobenen Ergebnisse mit den Datenbeständen anderer Bundesländer. So verfügt die Arbeitsgruppe HORN (CAU-Kiel) bereits über eine umfangreiche Datenbank bundesweiter Erhebungen. Aber auch in Sachsen und Bayern wurden Druckbelastungsversuche zur Bestimmung der Vorbelastung durchgeführt. Dies könnte zu einer besseren Abschätzung führen. Für die Unterböden der Lössböden ist z.B. eine Vorbelastung mit 100 kPa (pF 1,8) bereits sehr gut abgesichert (eigene Erhebungen (vgl. Kapitel 4.3.1), SCHNEIDER 1994, SEMMEL & HORN 1994, HORN et al. 2001, alle zit. in SCHRÖDER & SCHNEIDER 2004)

Der **DBQ** eignet sich für Ton- und Sandböden aufgrund der Luftkapazitätsgrenze von 5 Vol.-% nicht. Für Schluff- und Lehmböden ist eine Orientierung an der unteren Grenze der Funktionsfähigkeit der Böden als fragwürdig einzustufen. Man bewegt sich mit 5 Vol.-% im absoluten Grenzbereich. Dies steht im Widerspruch zu dem generellen Ziel eines Gefahrenabwehrkonzepts, das das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung bereits vor dessen Eintritt erkennen soll. Die Gefahr, dass die Unterböden irreversibel schadverdichtet

werden, ist bei dem Konzept DBQ zu groß. Darüber hinaus sind die von LEBERT (1989) entwickelten Algorithmen nicht auf die untersuchten Böden übertragbar.

4.3 Bewertungsmaßstäbe für eine gefügeschonende Landwirtschaft

Aufgrund der Sorge einer irreparablen Schädigung des Bodengefüges wird der Ruf nach Erarbeitung von entsprechenden Regelwerken bzw. nach Empfehlungen zur mechanischen Bodenbelastbarkeit immer lauter. Um diesen Forderungen gerecht zu werden, muss ein entsprechendes Prognosemodell entwickelt werden, das einen Bodengefügeschaden vor dessen Eintritt zu erkennen vermag. Ein solches Modell muss die mechanische Bodenbelastbarkeit mit der eigentlichen Bodenbelastung verknüpfen, um daraus eine Bewertung landwirtschaftlicher Arbeitsverfahren hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung abzuleiten. Grundsätzlich kann eine schädliche Bodengefügeveränderung nur dann eintreten, wenn die Bodenbelastung die vorhandene Bodenstabilität übersteigt (LEBERT et al. 2004).

Im folgenden Kapitel 4.3.1 werden die für einen Bewertungsmaßstab notwendigen Kriterien für nordrhein-westfälische Bedingungen ermittelt. Dabei wird zur Abschätzung der mechanischen Bodenbelastbarkeit die Vorbelastung für die verschiedenen Bodentypen und Bodenarten NRWs unter Berücksichtigung der Bodenwasserspannung dargestellt. Die eigentliche Bodenbelastung wird aus den auf nordrhein-westfälischen Betrieben üblicherweise eingesetzten landwirtschaftlichen Arbeits-, Ernte- und Transportmaschinen abgeleitet (vgl. Kapitel 4.3.2). Unter Berücksichtigung der Fahrzeugparameter (Radlast, Bereifung, Reifeninnendruck) erfolgt eine Berechnung der vertikalen Druckausbreitung im Boden. Zusätzlich werden die Einflussmöglichkeiten, die einem Landwirt/Lohnunternehmer durch den Einsatz bodenschonender Landtechnik gegeben werden, diskutiert. Die Gegenüberstellung der Druckbelastung mit der Druckbelastbarkeit ermöglicht schließlich eine Bewertung der eingesetzten Landtechnik hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung. Daraus ergeben sich Handlungsempfehlungen für eine gefügeschonende Landwirtschaft in NRW. Ein solcher modellhafter Ansatz wird in Kapitel 4.3.3 vorgestellt.

4.3.1 Standortspezifische Verdichtungsempfindlichkeit

Die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden bzw. Bodenhorizonten wird von natürlichen, biologischen, chemischen und hydraulischen Faktoren beeinflusst. Daneben können

anthropogene Belastungen zu einer Erhöhung der bodeneigenen Stabilität beitragen (HORN 2004). Jeder Boden verfügt also über eine seiner Vorgeschichte entsprechenden, ganz individuelle Eigenfestigkeit (Vorbelastung); diese kann kleinräumig starken Schwankungen unterworfen sein (vgl. Kapitel 4.2.2.2).

Um bei der Vielzahl der in NRW vorkommenden Bodentypen und -arten möglichst genaue Angaben zur Verdichtungsempfindlichkeit geben zu können, sollen die gemessenen Vorbelastungswerte standortspezifisch und damit möglichst praxisnah für die verschiedenen Regionen NRWs quantifiziert werden.

Insgesamt wurde die Vorbelastung an 14 Standorten auf insgesamt 26 Ackerschlägen in 2-3 Bodentiefen ermittelt. Die Einteilung der Ergebnisse aus 498 Drucksetzungskurven in die nachfolgend aufgeführten Bodengruppen ermöglicht schließlich die Zuordnung zu den entsprechenden Einheiten der naturräumlichen Gliederung NRWs (vgl. Kapitel 3.2.2).

Die graphische Darstellung der arithmetisch gemittelten Vorbelastungswerte erfolgt tiefen- und wasserspannungsabhängig. Daneben werden die arithmetischen Mittelwerte der Lagerungsdichte (gemessen an 236 cm³-Zylindern zur Ermittlung der Vorbelastung bei pF 1,8) aufgeführt. Die genauen schlag-, profilgruben- und tiefenspezifischen Daten sind dem Anhang A6 zu entnehmen.

Zusätzlich wurde mittels langjährig angelegter Bodenbearbeitungsversuche an den jeweiligen Schluff-, Lehm- und Tonstandorten der Einfluss unterschiedlicher Bestelltechniken bewertet. An den Versuchstandorten sind die Bodenverhältnisse sowie die Historie technogener Belastungseinträge vergleichbar, so dass hier Auswirkungen verschiedener Bearbeitungssysteme statistisch quantifiziert werden können.

4.3.1.1 Schluffstandorte

Die auf die Druckbelastbarkeit hin untersuchten Standorte 11a, 12a+b, 13a+b und 14a+b+c zählen naturräumlich zu den Bördegebieten NRWs, in denen der Löss das bodenbildende Ausgangsmaterial darstellt. Im Rahmen der Pedogenese haben sich bei allen Standorten tief entkalkte Parabraunerden entwickelt, die bei ausgeprägter Tonanreicherung im Bt-Horizont teilweise Pseudogleymerkmale aufweisen (vgl. Standort 12b, 14a+b+c). Die untersuchten Horizonte der Standorte weisen ausnahmslos tonige Schluffe auf, wobei im Bereich des Unterbodens mittel bis stark und im Bereich der Krume und der Krumenbasis vorwiegend

schwach tonige Schluffe vorherrschen. Die Humusgehalte der beprobten Krumböden liegen zwischen 1,6 % und 2,2 %, der Carbonatgehalt ist in allen Beprobungstiefen mit $<0,5$ % als carbonatarm bzw. carbonatfrei einzustufen. Bezogen auf die vorhandenen Gefügeformen haben Aggregierungsprozesse im Unterboden zur Ausbildung von Subpolyedern bzw. bei höherem Tongehalt von Polyedern geführt. Im Bereich der Krume und der Krumbasis finden sich die unterschiedlichsten Gefügeformen, die von Krümelgefüge bis hin zu einem horizontal ausgerichteten Plattengefüge reichen.

Die Ergebnisse der Ödometerversuche (Abb. 53) verdeutlichen, dass in allen Untersuchungstiefen mit steigender Entwässerung höhere Stabilitäten gemessen wurden. Die **Unterböden** weisen im Durchschnitt Vorbelastungswerte von 100 kPa (pF 1,8) und 155 kPa (pF 2,5) auf. Diese sind nach der DIN V 19688 (2000) somit als mittel bzw. sehr hoch zu klassifizieren. Gleichzeitig wurden mit $1,48 \text{ g/cm}^3$ mittlere Lagerungsdichten gemessen. Im Bereich der **Krumbasis** wurden bei Feldkapazität der Böden ähnliche Vorbelastungswerte festgestellt, bei pF 2,5 steigt die Bodenstabilität auf 137 kPa an. Allerdings wurden im Krumbasisbereich wesentlich höhere Lagerungsdichten ($\varnothing 1,56 \text{ g/cm}^3$) ermittelt. Hier treten außerdem mit 185 kPa bzw. 230 kPa die höchsten Einzel- Vorbelastungswerte auf (Standort 14a). Im Bereich der **Krume** ergaben die Drucksetzungskurven die geringsten Vorbelastungen. Am instabilsten ist mit 30 kPa (pF 1,8) bzw. 81 kPa (pF 2,5) der mit Pflug bewirtschaftete Standort 13a. Gleichzeitig weist die Krume mittlere durchschnittliche Lagerungsdichten ($1,48 \text{ g/cm}^3$) auf. Besonders hervorzuheben sind die hohen Schwankungsbreiten, die in allen Untersuchungstiefen beim Vergleich der zwei auf einem Schlag beprobten Profilgruben auftreten (vgl. Anhang A1).

Inwieweit das Bodengefüge durch unterschiedliche Bodenbearbeitungssysteme beeinflusst werden kann, zeigt die statistische Auswertung des seit 1998 angelegten Bodenbearbeitungsversuchs am Standort 14a-c (Tab. 19).

Bei der Pflugvariante konnten aufgrund der kurz vor der Probennahme durchgeführten wendenden Bodenbearbeitung keine Stechzylinder entnommen werden. Da es sich in dieser Tiefe ohnehin um weitestgehend gestörte homogenisierte Proben handelt, wurden als Vergleich die Vorbelastungsergebnisse der gelockerten (gepflügten) Krume vom Standort 13a herangezogen.

Im Bereich des Unterbodens, wo die Vorbelastung ca. 100 kPa (pF 1,8) aufweist, ist kein signifikanter Einfluss der Bodenbearbeitung zu erkennen. In der Krumbasis weist zwar die

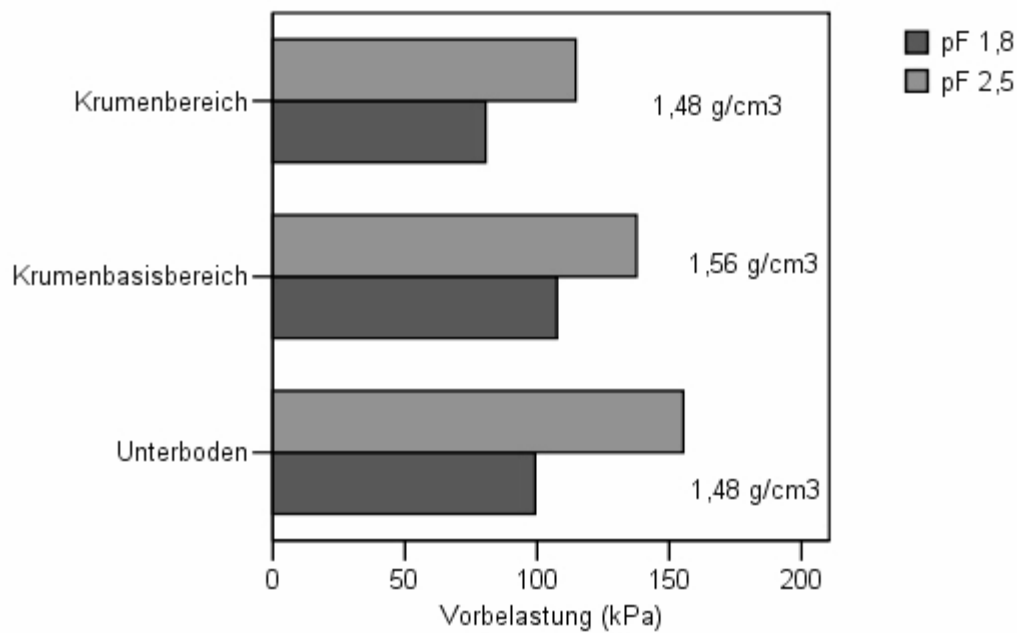


Abb. 53: Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Schluffstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=179)

Pflugvariante mit \emptyset 127 kPa (pF 1,8) die höchsten Vorbelastung auf, die Unterschiede sind jedoch nicht als signifikant abzusichern. Die in nicht wendender Bodenbearbeitung bewirtschafteten Krumenböden zeigen im Vergleich zur konservierenden Bodenbearbeitung bzw. Direktsaat signifikant geringere Vorbelastungswerte bei der Wasserspannung pF 1,8. Für pF 2,5 zeigen sich ähnliche Ergebnisse. Auffällig sind hier die signifikant höheren Stabilitäten des Unterbodens bei den Verfahren der Festbodenwirtschaft. Im Krumenbereich resultiert der Verzicht auf jegliche Form der Bodenbearbeitung in einer sehr hohen Vorbelastung.

Tab. 19: Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 14a-c

	pF 1,8			pF 2,5		
	wendend	konservierend	Direktsaat	wendend	konservierend	Direktsaat
Krume	30 ^a	118 ^b	111 ^b	81 ^a	93 ^a	145 ^b
Krumenbasis	127 ^a	119 ^a	108 ^a	163 ^a	133 ^a	120 ^a
Unterboden	101 ^a	95 ^a	93 ^a	119 ^a	170 ^b	154 ^b

Signifikante Unterschiede (Mittelwertvergleich durch SNK-Test, $\alpha=0,05$) innerhalb einer Zeile bei gleicher Bodenwasserspannung sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

4.3.1.2 Sandstandorte

Die Standorte 1-6, an denen auf insgesamt 9 Ackerschlägen Untersuchungen zur Bodenstabilität durchgeführt wurden, liegen in den Sandlandschaften NRW. Bodentypologisch sind diese Böden als Eschböden (Standort 1a+b, 3a) und Podsole anzusprechen, wobei bei letzteren ein mehr oder weniger starker Grundwassereinfluss zur Ausbildung von Podsol-Gleyen bzw. Gley-Podsolen bis hin zu reinen Gleyen (Standort 2b, 5a) geführt hat. Bezogen auf die Körnung handelt es sich vorwiegend um reine Sande bzw. schwach lehmige bzw. tonige Sande mit Sandgehalten über 70 % (Ausnahme Standort 1a). Die Humusgehalte der Ackerkrume schwanken zwischen 5,6 % bei den Eschböden und 3,3 % bei den Gley-Podsolen. Aufgrund der ton- und eisenoxidarmen Sande ist das Einzelkorngefüge die vorherrschende Gefügestufe. Ausnahmen bilden die infolge von Podsolierungsprozessen entstandenen verfestigten Bh- bzw. Bs-Horizonte (Humus- und Eisenanreicherung) der Standorte 3b und 6a. Dort hat die Verklebung von Einzelkörnern zur Ausbildung eines Kitt- bzw. Hüllengefüges geführt. Ein wesentliches Unterscheidungskriterium der beprobten Flächen liegt allerdings in dem geologischen Ausgangsmaterial, wobei zwischen sortiert abgelagerten äolischen Sanden (Flugsanden) und fluviatil eingeregelteten Sanden (Flusssanden) unterschieden werden muss. Zumindest im nicht durch Bearbeitung beeinflussten Bodenbereich hat dies einen erheblichen Einfluss auf die Druckbelastbarkeit der Böden, so dass nicht alle Standorte zusammenfassend bewertet werden können. Daher wurden die 9 untersuchten Ackerschläge zu Gruppen geogenetischer Vergleichbarkeit zusammengefasst:

1. Eschböden, Gley-Podsole bzw. reine Podsole aus unsortiert abgelagertem Bodenmaterial.
2. Gleye bzw. Podsol-Gleye in den Niederungen aus sortiert abgelagertem Bodenmaterial.

Die nachfolgende Abb. 54 und Abb. 55 zeigen die tiefenabhängigen Vorbelastungs- und Lagerungsdichtewerte beider Gruppen für 2 Bodenwasserspannungsstufen.

Mit zunehmender Austrocknung steigen bei beiden Gruppen in fast allen Untersuchungstiefen die durchschnittlichen Vorbelastungswerte an. Im Krumbasis- und Unterbodenbereich der sortiert abgelagerten Sande sind hingegen keine Stabilitätssteigerungen festgestellt worden.

Im Durchschnitt weisen die *Unterböden* der untersuchten Flusssande mit 500 kPa ^(*) enorm hohe Stabilitäten auf (Abb. 54). Zudem ist diese Bodentiefe mit \varnothing 1,68 g/cm³ sehr dicht gelagert. In der *Krumenbasis* sind ebenfalls teilweise sehr hohe Vorbelastungen in Verbindung mit relativ dichter Lagerung gemessen worden. Auffallend sind wiederum die hohen Schwankungsbreiten, die bei beiden Feuchtestufen von 125 kPa bis maximal 500 kPa reichen (vgl. Anhang A6). Die geringsten Werte wurden sowohl bei der Lagerungsdichte als auch bei der Vorbelastung in der *Krume* gemessen (82 kPa bzw. 170 kPa).

Eine ähnliche Tiefenverteilung der Stabilität zeigt sich auch bei den unsortiert abgelagerten Sanden (Abb. 55). Während in der *Krume* die geringsten Vorbelastungen (22 kPa bzw. 93 kPa) gemessen wurden, zeichnen sich die *Unterböden* durch die höchsten Messwerte aus. Allerdings liegen die Stabilitäten längst nicht in den Größenbereichen der fluviatilen Sande. Die Vorbelastungen bewegen sich vielmehr zwischen 147 kPa (pF 1,8) und 167 kPa (pF 2,5) in Verbindung mit wesentlich geringeren Lagerungsdichten. Der Krumenbasisbereich nimmt eine Mittelstellung ein.

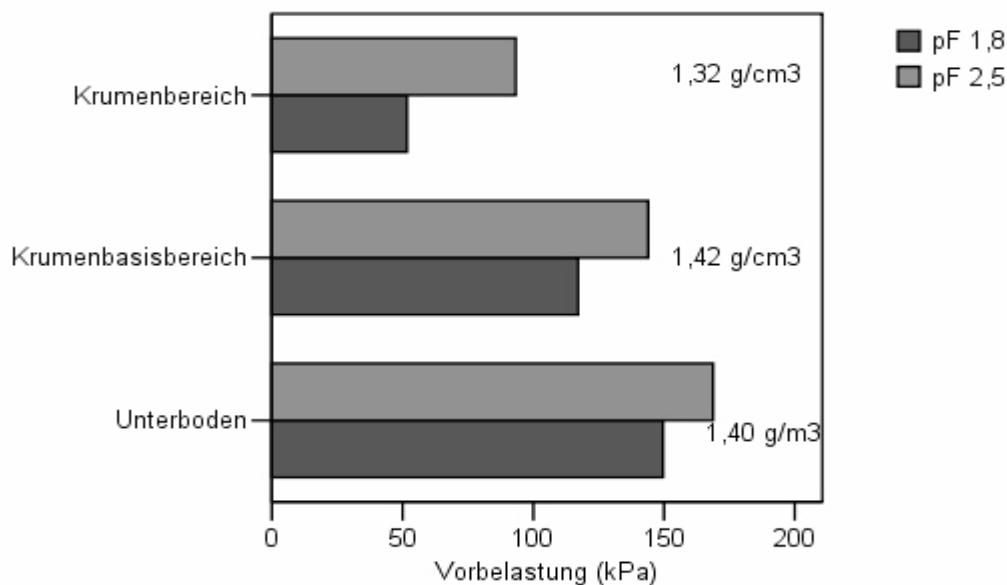


Abb. 54: Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die unsortiert abgelagerten Böden der Sandstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=129)

^(*) Zu beachten ist, dass dieser Zahlenwert die mit der eingesetzten Drucksetzungsanlage maximal messbare Vorbelastung wiedergibt. Die auflastabhängigen Setzungsanteile waren so gering, das selbst bei maximalen Belastungen von 650 kPa bei der Drucksetzungskurve kein Übergang zwischen Wieder- und Erstverdichtungsgerade erkennbar war. Aus diesem Grunde werden in der Anhangtab. 6 die Standardabweichungen mit $s = 0$ beziffert.

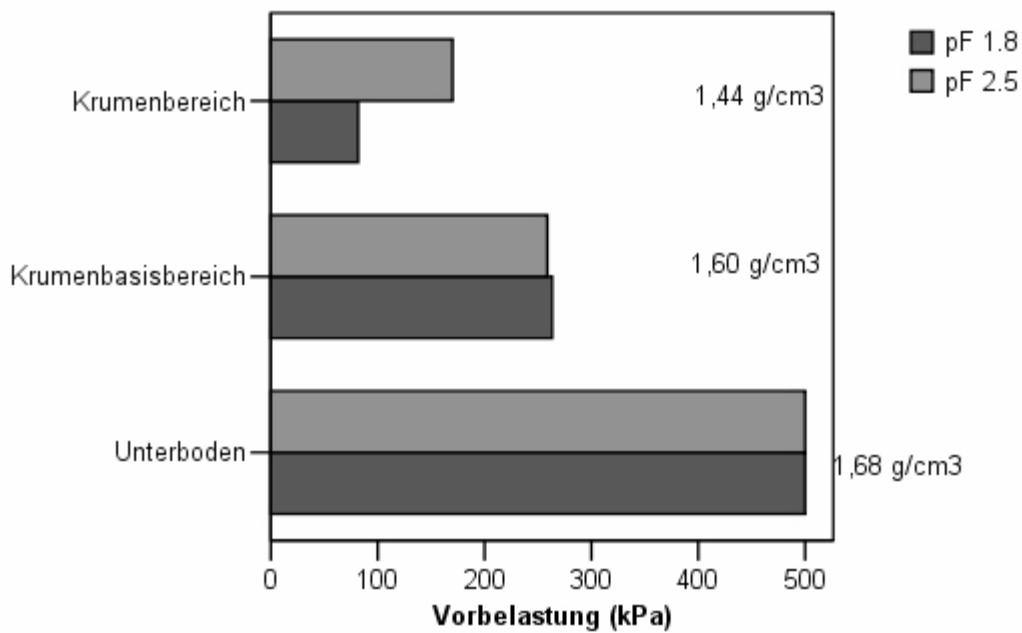


Abb. 55: Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte die für sortiert abgelagerten Böden der Sandstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=57)

4.3.1.3 Lehmstandorte

Die Lehmstandorte sind durch insgesamt 3 Ackerschläge (8a, 9a+b) vertreten. Sie liegen in der vom Rhein geprägten Flusslandschaft NRW. In den vom Wasser abgelagerten Hochflutlehm haben sich Parabraunerden bzw. braune Auenböden entwickelt. Die Böden aller Untersuchungstiefen sind den stark bzw. mittel lehmigen Sanden bzw. den schwach sandigen bzw. tonigen Lehmen zuzuordnen. Freies Calciumcarbonat ist auf keiner Fläche vorhanden, die Humusgehalte liegen bei ca. 1,5 %. Aufgrund der hohen Sandgehalte sind die Böden nur mäßig aggregiert. Neben subpolyedrischen Gefügeformen im Unterboden finden sich im Krumenbasisbereich Mischformen aus verfestigtem Kitt- und Plattengefüge. Die Krume ist bei den gepflügten Flächen (Standort 8a, 9a) durch ein gelockertes Krümelgefüge gekennzeichnet; am konservierend bearbeiteten Standort 9b sind bröckelige Gefügeformen festgestellt worden. Die Stabilitäts- und Dichtekennwerte sind in Abb. 56 dargestellt.

Neben der austrocknungsbedingt steigenden Bodenstabilität in allen Untersuchungstiefen werden im **Unterboden** mit 134 kPa (pF 1,8) bzw. 179 kPa (pF 2,5) die höchsten Festigkeitswerte ermittelt. Im **Krumenbasisbereich** hingegen werden deutlich geringere Vorbelastungen bei wesentlich höheren Lagerungsdichten (1,72 g/cm³) gemessen. Die Vorbelastung der nicht gelockerten **Krume** wurde am Standort 9b untersucht und liegt bei 116 kPa (pF 1,8) bzw. 143 kPa (pF 2,5). Gleichzeitig ist der Boden hier außerordentlich dicht gelagert.

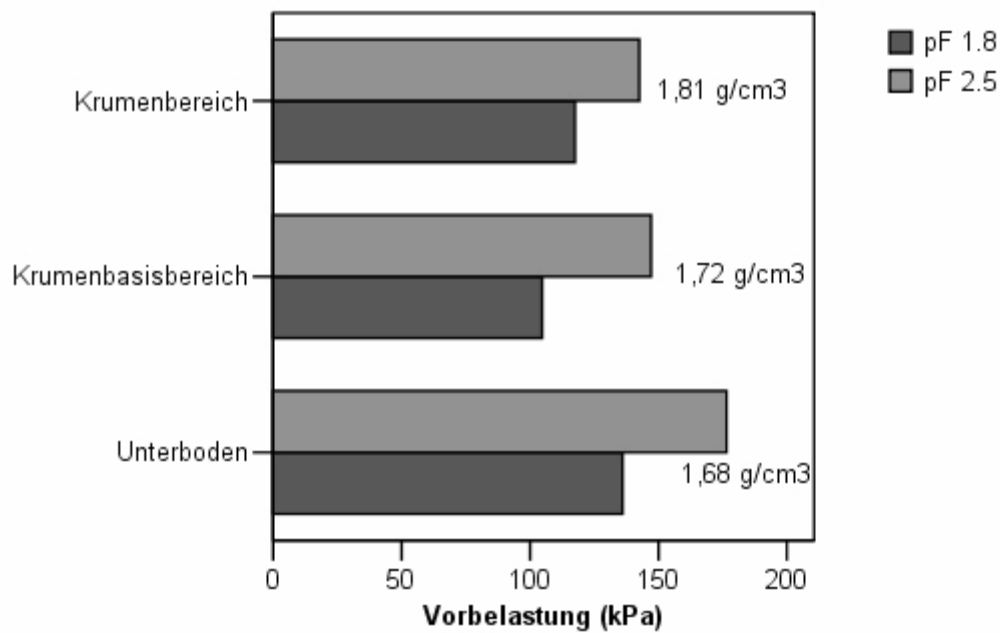


Abb. 56: Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Lehmstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=58)

Wie die reduzierte Bodenbearbeitung auf solchen lehmigen Standorten (Standort 9a+b) auf die mechanische Belastbarkeit wirkt, zeigen die Vorbelastungsergebnisse in Tab. 20. Im Unterboden sind keine signifikanten Unterschiede festgestellt worden. Im Bezug auf die Krumenbasis sind bei der Mulchvariante höhere Vorbelastungen gemessen worden, die Unterschiede sind jedoch auch hier nicht signifikant. Ergebnisse für den Krumenbereich liegen für die Pflugvariante nicht vor, da hier aufgrund des stark gelockerten Bodens eine Entnahme ungestörter Stechzylinderproben nicht möglich war. Die Krumenergebnisse der Mulchsaatvarianten sind mit 116 kPa (pF 1,8) bzw. 143 kPa (pF 2,5) nach DIN V 19688 (2000) als hoch bzw. sehr hoch einzustufen.

Tab. 20: Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 9a+b

	pF 1,8		pF 2,5	
	wendend	konservierend	wendend	konservierend
Krume	--	116	--	143
Krumenbasis	89 ^a	114 ^a	114 ^a	171 ^a
Unterboden	138 ^a	116 ^a	168 ^a	161 ^a

Signifikante Unterschiede (Mittelwertvergleich durch SNK-Test, $\alpha=0,05$) innerhalb einer Zeile bei gleicher Bodenwasserspannung sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

4.3.1.4 Tonstandorte

Die auf die Vorbelastung hin untersuchten Standorte 11c und 21a+b liegen in den Naturräumen des Siebengebirges und der Hellwegbörden (Haarstrang), wo sich aus Tonsteinen (Standort 11c) bzw. aus Mergelkalksteinen (Standort 21a+b) Braunerde-Pseudogleye bzw. Braunerden entwickelt haben. Im Bereich der Krume lassen sich die Böden den mittel bis stark tonigen Schluffen zuordnen. Die Unterböden und Krumenbasen sind durch schwach bis stark schluffige Tone gekennzeichnet. Die Humusgehalte schwanken zwischen 1,7 % und 2 %, freies Calciumcarbonat wurde nicht festgestellt. Aufgrund des hohen Tongehaltes weisen die Unterböden und die Krumenbasen stark aggregierte scharfkantige Polyedergefüge auf. Die Krumenbereiche sind entweder krümelig bei den gepflügten oder subpolyedrisch bei den nicht gepflügten Flächen strukturiert.

Zwar unterscheiden sich die beiden Standorte in ihrem geologischen Ausgangsmaterial, die vergleichbaren Bodenarten, Aggregationen und Lagerungsarten erlauben jedoch eine zusammenfassende Betrachtung der Vorbelastungs- und Lagerungsdichteergebnisse (Abb. 57).

Auch die Tonböden werden mit zunehmender Austrocknung deutlich stabiler. Die **Unterboden- und Krumenbasisbereiche** weisen ähnliche Stabilitäten wie die Schluffböden auf, allerdings bei deutlich geringeren Lagerungsdichten ($1,42 \text{ g/cm}^3$ bzw. $1,43 \text{ g/cm}^3$). Die Stabilitätserhöhungen aufgrund zunehmender Austrocknung sind dabei im Unterboden mit ca. 40 kPa stärker ausgeprägt als im Krumenbasisbereich (ca. 20 kPa). Die durchschnittlich gemessenen Vorbelastungen der Krume liegen zwischen 92 kPa (pF 1,8) und 135 kPa (pF 2,5) und sind als mittlere Werte zu klassifizieren. Die Schwankungsbreiten sind jedoch aufgrund der gemeinsamen Darstellung wendend und nicht wendend bearbeiteter Krumenböden relativ hoch (vgl. Anhang A6).

Im Jahre 1999 wurde am Standort 21a+b ein Bodenbearbeitungsversuch angelegt. Dieser eignet sich zur Quantifizierung der Auswirkungen unterschiedlicher Verfahren der Bestelltechniken auf die mechanische Belastbarkeit der Böden. Die Ergebnisse sind in Tab. 21 zusammengefasst.

Im Unterboden wurde eine Bodenstabilität von ca. 100 kPa (pF 1,8) bzw. 150 kPa (pF 2,5) festgestellt. In der Krumenbasis sind allgemein höhere Vorbelastungswerte gemessen worden. Jedoch zeigen sich auch hier keine signifikanten Unterschiede. Die Krume der Mulchsaat-

variante ist jedoch mit 114 kPa (pF 1,8) bzw. 156 kPa (pF 2,5) nahezu zwei- bis dreimal stabiler als die Krume der gepflügten Variante. Diese Unterschiede sind signifikant.

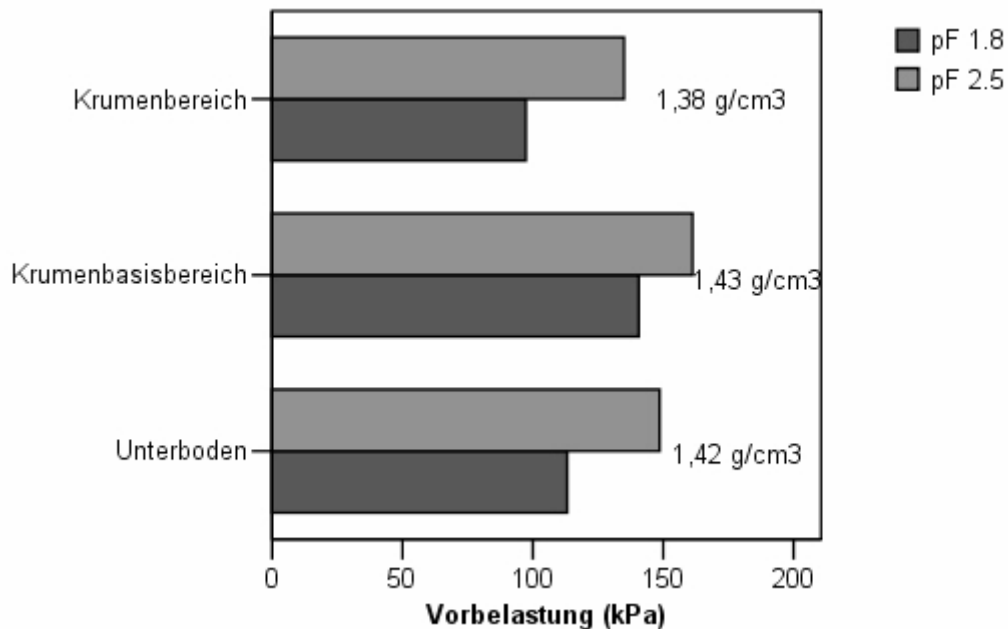


Abb. 57: Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Tonstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=62)

Tab. 21: Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 21a+b

	pF 1,8		pF 2,5	
	wendend	konservierend	wendend	konservierend
Krume	38 ^a	114 ^b	77 ^a	156 ^b
Krumbasis	133 ^a	149 ^a	148 ^a	175 ^a
Unterboden	104 ^a	105 ^a	143 ^a	149 ^a

Signifikante Unterschiede (Mittelwertvergleich durch SNK-Test, $\alpha=0,05$) innerhalb einer Zeile bei gleicher Bodenwasserspannung sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

4.3.1.5 Diskussion

Die Ergebnisdarstellung verdeutlicht die in der landwirtschaftlichen Praxis weit verbreitete Erkenntnis, dass mit zunehmender Bodenfeuchte die Tragfähigkeit der Böden verringert wird.

Durch die Anlagerung von Wasser an die Bodenteilchen sinkt die Anzahl der Kornkontaktpunkte (HORN 1988). Die zunächst kontrahierend wirkenden Wassermenisken reißen ab, so dass eine geringere Stabilität erreicht wird (HORN & LEBERT 1994). Besonders die Schluffböden, denen es aufgrund des relativ geringen Tongehaltes an ausreichenden Brücken- und Kontaktflächenbildnern zwischen organischen und mineralischen Komponenten fehlt, sind im feuchten Zustand besonders verdichtungsempfindlich. Aber gerade bei diesen Böden macht sich die Stabilitätssteigerung durch Austrocknung besonders bemerkbar. In gelockerten Oberböden aller Bodenarten kann eine Entwässerung von pF 1,8 auf pF 2,5 zu einer Verdopplung der Stabilität führen. Am untersuchten Tonstandort 21a+b wurde die Vorbelastung gar verdreifacht. Dennoch können gerade tonreiche Substrate bei hohem Wassersättigungsgrad kurzzeitig stabil sein, da bei diesen Böden die geringen Wasserleitfähigkeiten ein zügiges Drainieren verhindern und Porenwasserüberdrücke der einwirkenden mechanischen Belastung entgegenwirken (BAUMGARTL 1991).

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die bodeneigene Stabilität nicht ausschließlich über den Dichteparameter der Lagerung bestimmt wird. Nach HORN (1988) steigen infolge von Aggregierungsprozessen durch die Zunahme der Scherwiderstände an den Kontaktpunkten der Aggregate die Vorbelastungswerte. Dies führt dazu, dass auch bei polyedrisch bzw. subpolyedrisch strukturierten Unterbodenhorizonten mit geringen Lagerungsdichten hohe Vorbelastungswerte auftreten. Polyedergefüge sind vor allem kennzeichnendes Merkmal bei Tonböden und sorgen somit trotz geringer Lagerungsdichten für eine hohe Vorbelastung. Bei einer Zerstörung der Aggregatstruktur, vor allem im Bereich der Krümmenbasis (Pflugsohle) infolge mechanischer Druckbelastung und Knetungen (HORN 1976), erfolgt eine Herabsetzung der aggregierungsbedingten Stabilität. In diesem Fall kann die Tragfähigkeit nur durch eine erhöhte Dichtlagerung aufrechterhalten werden. Aus diesem Grund weisen sowohl die plattig strukturierten Pflugsohlen als auch die strukturschwachen Krümmenbereiche der Schluffe bei gleicher bzw. geringerer Vorbelastung höhere Lagerungsdichten auf. Bei den nicht strukturierten homogenen Sanden wird die Vorbelastung im Wesentlichen über die Dichtlagerung bestimmt. Bodentiefen mit höherer Lagerungsdichte weisen auch aufgrund hoher Kornkontaktzahlen hohe Bodenstabilitäten auf (LEBERT 1989). Dies kommt besonders bei den stark eingeregeltten fluviatilen Sanden zum Ausdruck (vgl. Abb. 28), bei denen Lagerungsdichten bis maximal $1,79 \text{ g/cm}^3$ auftreten. Die horizontale Einregelung der Bodenteilchen verdeutlicht, dass vertikal ausgerichtete statische Belastungen hier nur geringe

Zunahmen der Dichtlagerung bedingen. HORN et al. (2002) führen auf, dass mit Erreichen des Ausgangsgesteines in Abhängigkeit von dessen Entstehung entweder sehr geringe oder sehr hohe Zahlenwerte auftreten. Diese haben ihren Ursprung im geologischen Ablagerungsprozess. Beispielsweise wurden von HORN et al. (2001) für das Material „Grundmoräne“ Vorbelastungswerte ermittelt, die als grobe Anhaltswerte für die Druckbelastung ursprünglicher Gletscher angenommen werden können. Dem gegenüber stehen die unsortiert abgelagerten Sande, wo entsprechend niedrige Lagerungsdichten zu geringen Vorbelastungen führen. Die aufgeführten Zusammenhänge werden in der Abb. 58 verdeutlicht. Dargestellt ist die Abhängigkeit der Vorbelastung (pF 1,8) von der Lagerungsdichte für die Böden der Sandstandorte. Die Graphik zeigt alle Einzelmessungen.

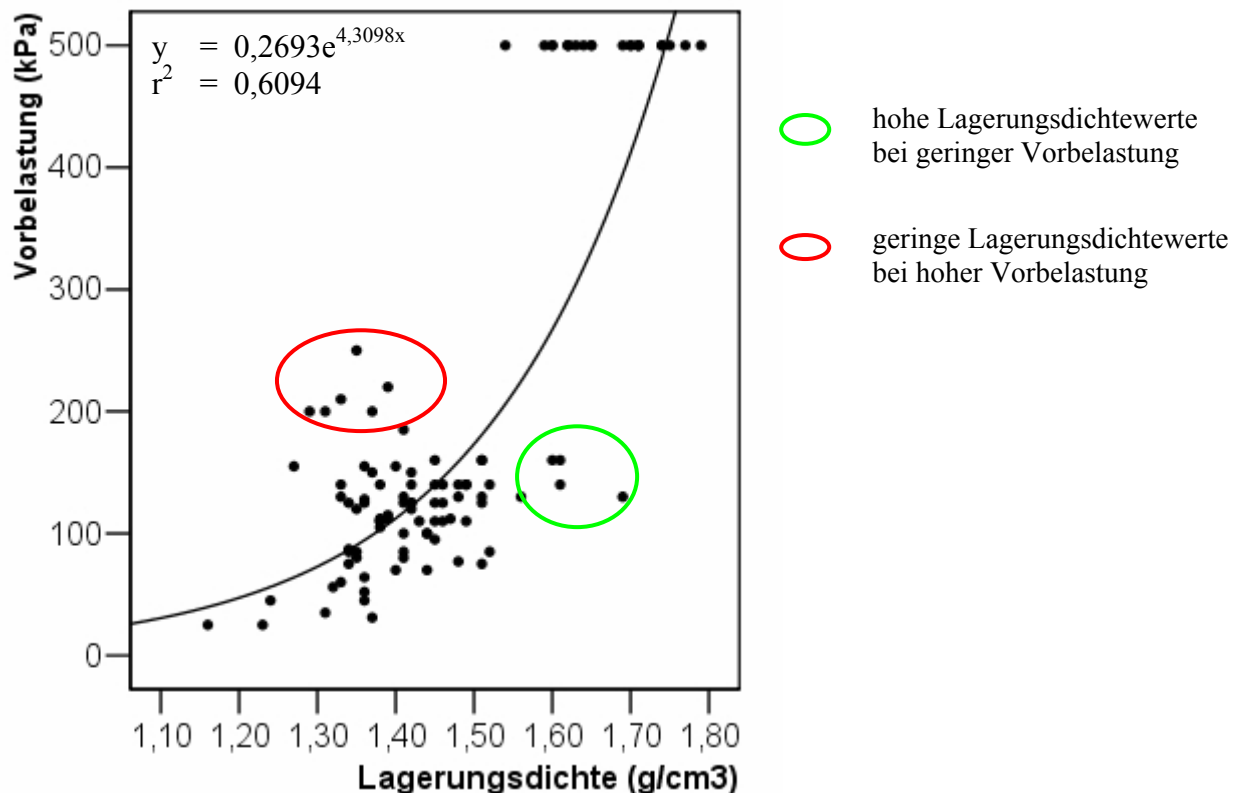


Abb. 58: Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Vorbelastung für nordrhein-westfälische Sandböden (n=107)

Mit zunehmender Lagerungsdichte steigt die Vorbelastung in Form einer exponentiellen Funktion an. Die Zusammenhänge wurden auch von QASEM et al. (2000) beschrieben. Die rot markierten Punkte verdeutlichen, dass auch geringe Lagerungsdichten mit hohen Vorbelastungen einhergehen können. Dies ist am Standort 3b und 6a der Fall, wo

bodenbildende Prozesse zur Bildung von verhärteten Bh- bzw. Bs-Horizonten geführt haben. Anthropogen bedingte hohe Lagerungsdichten finden sich im Krumenbasisbereich des Standortes 4a und 2b (grün markiert).

LEBERT (1989) kommt zu dem Schluss, dass die Tragfähigkeit von Böden im Wesentlichen von der *bodengenetischen Stabilisierung* durch Aggregierungsprozesse und von *anthropogener Stabilisierung* infolge erhöhter Dichtlagerung beeinflusst wird. Im Falle einer anthropogenen Dichtlagerung spiegelt demnach die Vorbelastung nicht nur die bodeneigene Stabilität wider, sondern sie quantifiziert auch die ganz individuellen Pfade langjährig zurückliegender mechanischer Belastungen. Dies trifft vor allem auf die Bereiche der Krume und der Krumenbasis zu, da diese Bodentiefen besonders von den Auswirkungen technogener Lasteinträge betroffen sind (vgl. Kapitel 4.1). Aufgrund der intakten Aggregierungen im Unterboden kann aber davon ausgegangen werden, dass hier die Stabilität im Wesentlichen auf natürliche Dichtlagerung zurückzuführen ist.

In Zusammenhang mit den Einflüssen der Bodenbearbeitung stehen die Ergebnisse im Einklang mit der verbreiteten wissenschaftlichen Vorstellung und den Erfahrungen aus der Praxis, dass die nicht wendende Bodenbearbeitung dazu führt, dass die Böden insbesondere im oberflächennahen Bereich tragfähiger werden und somit im Frühjahr eher befahrbar sind und flachere Fahrspuren aufweisen (LARSON et al. 1980, HORN 1986, DEXTER 1988). Erklärbar ist dies mit höheren Aggregatstabilitäten und mit einer geringeren Störung des Bodenlebens (KRÜCK et al. 2001). Durch langfristige Bodenruhe entstehen durch wiederholte Quellungs- und Schrumpfungszyklen stabile Aggregatsysteme (HORN et al. 1997) mit hoher Aggregatporosität und hohen Aggregatlagerungsdichten (VOORHEES & LINDSTROM 1984). Daneben ist aber die Bodenstabilität zusätzlich von der Porengeometrie und der damit verbundenen Spannungsverteilung im Boden abhängig (HORN 1986). Vertikal ausgerichtete Poren sind nach BOHNE & HARTGE (1982) aufgrund ihrer Ausrichtung im Kraftfeld widerstandsfähiger als horizontal oder tangential angeordnete Schwächezonen. Dies bedeutet, dass Standorte mit einem hohen Anteil an vertikal orientierten Bioporen bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen mechanisch belastbarer sind, als dies bei isotroper (richtungsunabhängiger) Porung der Fall wäre. Dem Anhang A2 ist zu entnehmen, dass die pfluglose Bodenbearbeitung zu einer Erhöhung der makroskopisch sichtbaren Poren vor allem im Krumen- und Krumenbasisbereich führt. Diese Erkenntnisse konnten auch von WIERMANN (1998) bestätigt werden. Im Unterbodenbereich sind zwischen den einzelnen Vorbelastungswerten nur geringe Unterschiede im Hinblick auf die Bodenstabilität zu

erkennen. Zusammen mit den bodenphysikalischen Ergebnissen, die ausnahmslos ein hervorragend intaktes Bodengefüge widerspiegeln, spricht dies für eine durch Aggregation bedingte natürliche Bodenstabilität. Überraschend hoch sind die gemessenen Stabilitätswerte im Unterboden des konservierend bzw. in Direktsaat bestellten Bodenbearbeitungsversuchs am Standort 14. Zwar resultiert nach HORN (2002) die langjährige Reduzierung der Bodenbearbeitung stets in einer Zunahme der Bodenfestigkeit, diese ist aber dennoch außerordentlich hoch.

Die Vorbelastungen im Krumenbasisbereich lassen sich durch die Einwirkungen technogener Lasteinträge während des Fahrens mit dem Schlepperrad in der (ehemaligen) Pflugsohle erklären. Durch statische und dynamische Effekte (Scherung, Knetung) wird der Boden stärker belastet. Die Tiefenwirkung mechanischer Drücke ist nach SOMMER (1998b) in Abb. 59 am Beispiel verschiedener Druckzwiebels dargestellt. Sie reicht am tiefsten beim Pflügen mit hoher Radlast. Dies führt bei zu feuchten Bodenbedingungen zu Krumenbasisverdichtungen, die mit höheren Vorbelastungswerten in Verbindung mit einer stärkeren Dichtlagerung einhergehen. Davon zeugen vor allem die horizontal ausgerichteten Gefügestrukturen (Plattengefüge) in dieser Bodentiefe. Weniger tief reicht die Druckzwiebel, wenn das Schlepperrad auf der Bodenoberfläche bleibt und der Boden nach nicht wendender, fruchtfolgespezifischer Lockerung tragfähiger ist. Nach SOMMER (1998b) ist die Grundbodenbearbeitung mit schonender Lockerung somit ein Teil der Strategie für bodenschonendes Befahren in der pflanzlichen Produktion.

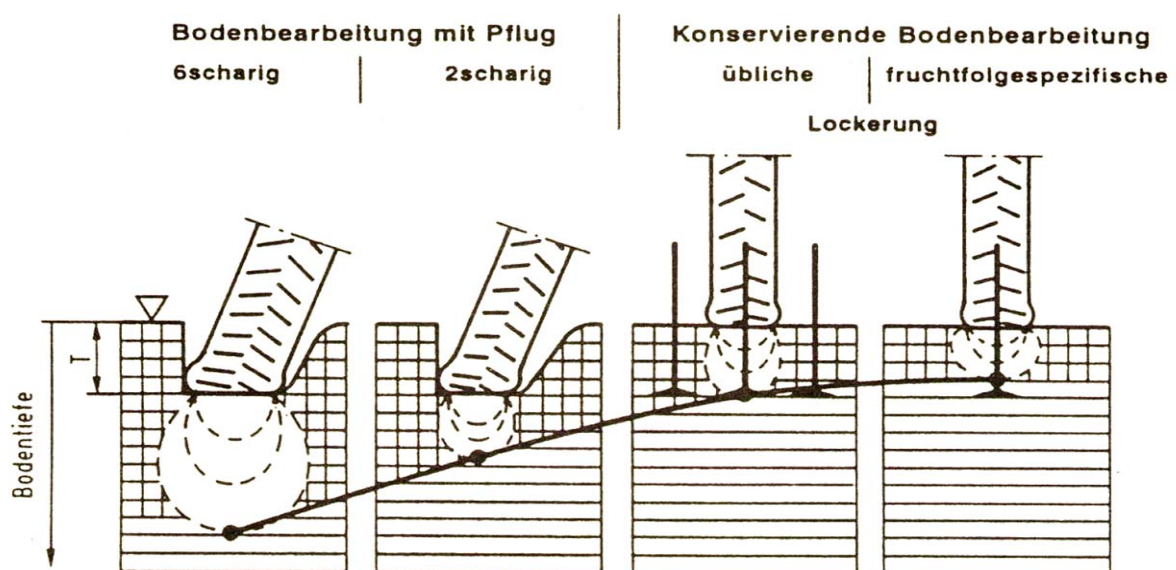


Abb. 59: Tiefenwirkung einer Druckzwiebel bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (SOMMER 1998b)

4.3.2 Mechanische Bodenbelastung

4.3.2.1 Fahrzeugparameter

Zur Bewertung landwirtschaftlicher Arbeitsverfahren hinsichtlich ihrer Lasteinträge ist die Berücksichtigung verschiedener maschinenspezifischer Parameter erforderlich. Nach SEMMEL & HORN (1995) sind dies vorwiegend die Faktoren der Radlast und des Reifens selber, der über seine Breite und den Reifeninnendruck die Kontaktfläche bestimmt. Der mittlere Kontaktflächendruck, definiert als wirkende Gewichtskraft je Aufstandsfläche, bildet das eigentliche Gefährdungspotenzial für das Bodengefüge (vgl. Abb. 3).

Um einen Überblick über die Druckbelastungen der an den 23 Standorten zum Einsatz kommenden Schlepper zu erhalten, sind in Tab. 22 jeweils die Spannweiten der ermittelten Radlasten, der Reifenkontaktflächen (KF) und den sich daraus ergebenden mittleren Kontaktflächendrücken (KFD) angegeben. Da bei Ackerschleppern das Gesamtgewicht mit ca. 60 % auf der Hinterachse lagert, enthält die Tabelle außerdem Angaben zu den durchschnittlichen Radlasten, Kontaktflächen und Kontaktflächendrücken der Hinterräder. Die standort-spezifischen Angaben zur Mechanisierung sind dem Anhang A 7 zu entnehmen.

Tab. 22: Maschinenspezifische Daten der an den 23 Standorten eingesetzten Schlepper

	Radlast (kg)	KF (cm²)	KFD (bar)
Spannweite (Vorder- und Hinterräder)	600 – 2775	518 – 6273	0,30 – 1,26
Ø (Hinterräder)	1642	3444	0,50

Die durchschnittliche Radlast der Hinterachse liegt bei 1642 kg. Aus der angegebenen Spannweite zeigt sich, dass die Radlast zwischen 600 kg (Schlepperrad vorne) und 2775 kg (Schlepperrad hinten) variiert. Je nach gewählter Bereifung schwanken die Kontaktflächen zwischen 518 cm² und 6273 cm², im Mittel weisen die Hinterräder Aufstandsflächen von 3444 cm² auf. Die daraus berechneten Kontaktflächendrücke liegen zwischen 0,30 bar und 1,26 bar, der Durchschnittswert für die Hinterräder ist mit 0,50 bar zu beziffern. Auffallend ist, dass besonders leistungsstarke Schlepper hohe Radlasten aufweisen, gleichzeitig aber durch die Wahl breiter Bereifung geringe Kontaktflächendrücke erreicht werden können. Der Standort 12 ist z.B. durch verhältnismäßig schwere Schleppergewichte (>2500 kg Radlast)

gekennzeichnet, trotzdem liegen die Kontaktflächendrücke mit unter 0,50 bar im Mittelfeld der erhobenen Daten. Die höchsten Kontaktflächendrücke finden sich demnach nicht bei den leistungsstärksten, sondern bei den Schleppern mit unterproportional kleiner Reifenkontaktfläche (z.B. Standorte 7/15/20). Trotz der bei Schleppern üblichen Achslastverteilung von 60 % (hinten) und 40 % (vorne) können die Kontaktflächendrücke der Vorderräder die der Hinterräder übersteigen (z.B. Standort 20).

Um das Zusammenspiel zwischen Aufstandsfläche und Radlast zu verdeutlichen, sind in der Abb. 60 die maximal vorkommenden Schlepperradlasten je Standort und die daraus resultierenden Kontaktflächendrücke aufgeführt. Bewusst werden die höchsten Radlasten in den Vordergrund gestellt, da in ihrem Wirken auf den Boden die Hauptursache für das Entstehen schädlicher Unterbodenverdichtungen gesehen wird (BOLLING & SÖHNE 1982).

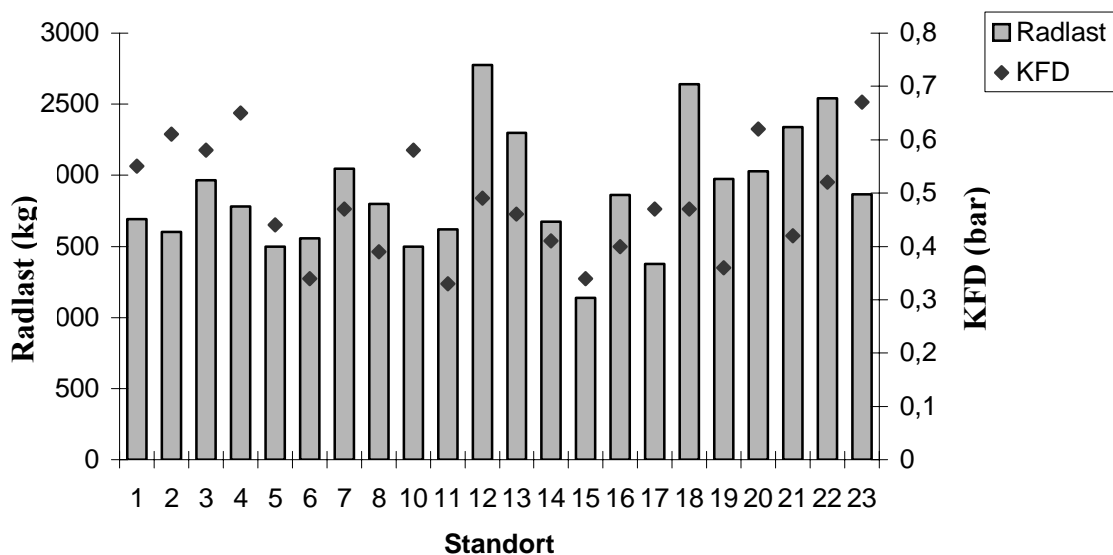


Abb. 60: Radlasten und Kontaktflächendrücke der Hinterräder des an den 23 Standorten jeweils eingesetzten schwersten Schleppers

Welche mechanischen Bodenbelastungen durch den Einsatz schwerer Ernte- und Transportmaschinen zu erwarten sind, ist in den nachfolgenden Grafiken (Abb. 61 und Abb. 62) abgebildet.

Bezogen auf die 6-reihigen Köpfrdebunker zeichnet sich der Typ KLEINE SF 10 durch geringere (9 t) der Typ ROPA EUROTIGER durch höhere Bunkerkapazitäten (27 t) aus (Abb. 61). Das Fahrwerk des EUROTIGERS wird allerdings auf 3 Achsen, das des KLEINES und des HOLMERS auf 2 Achsen abgestützt. Daneben enthält die Darstellung Parameterangaben

zweier ausgewählter Mähdrescher (Typ CLAAS LEXION 440 bzw. Typ NEW HOLLAND CX 880), die sich insbesondere in ihren maximalen Korntankkapazitäten (8100 l bzw. 10500 l) unterscheiden. Außerdem werden die Druckbelastungen des häufig zum Einsatz kommenden Maishächslers der Firma CLAAS (Typ JAGUAR 870) abgebildet. In der Abb. 62 werden zum Vergleich die mechanischen Belastungen zweier Flüssigmisttankwagen und eines Maistransportkippers dargestellt. Wesentliche Unterschiede liegen im Fassungsvermögen und in den Bereifungsvarianten (Einfach- bzw. Tandembereifung). Alle Daten werden stets für den ungünstigsten Fall, d.h. maximale Ausschöpfung der Nutzlast (Fassungsvermögen des Bunkers bzw. der Transportwagen), angegeben. Die Bereifung entspricht dem üblichen vom Hersteller gelieferten Standard. Die spezifischen Maschinenangaben sind im Anhang A7 aufgeführt.

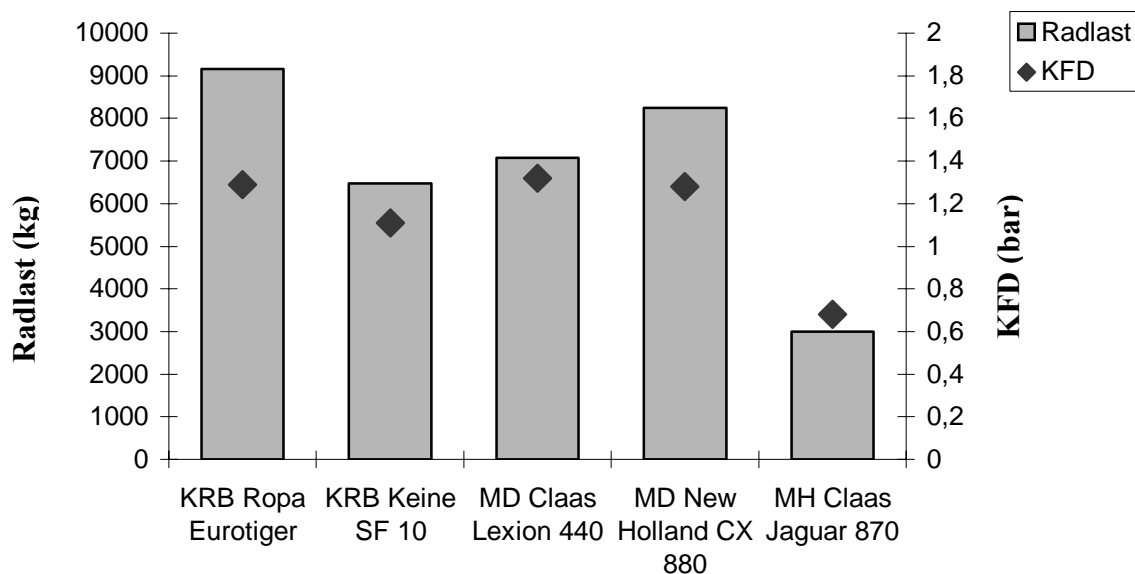


Abb. 61: Radlast und Kontaktflächendrücke typischer Erntemaschinen

Die Radlasten der Erntemaschinen liegen deutlich über den Schleppergewichten, wobei der Köpfrdebunker ROPA EUROTIGER mit über 9 t die höchsten Lasten aufweist. Aber auch Mähdrescher erreichen aufgrund ihres heutzutage großen Bunkerfassungsvermögens und ihrer Lastabstützung auf 2 Achsen hohe Radlasten. Aufgrund unterschiedlicher Reifenaufstandsflächen variieren die mittleren Kontaktflächendrücke kaum (1,11 bar-1,32 bar). Der Maishächslers spielt im Hinblick auf die Bodenbeanspruchung nur eine untergeordnete Rolle. Bei Betrachtung der Transportmaschinen treten im Vergleich zu den Erntemaschinen ähnliche Kontaktflächendrücke bei wesentlich geringeren Radlasten auf. Auffallend sind hingegen die

hohen Bodendrücke beim einfach bereiften Flüssigmisttransportwagen (FTS 10 m³). Verantwortlich hierfür sind 6000 kg hohe Radlasten, die über verhältnismäßig geringe Reifen- aufstandsflächen von jeweils 3382 cm² abgestützt werden.

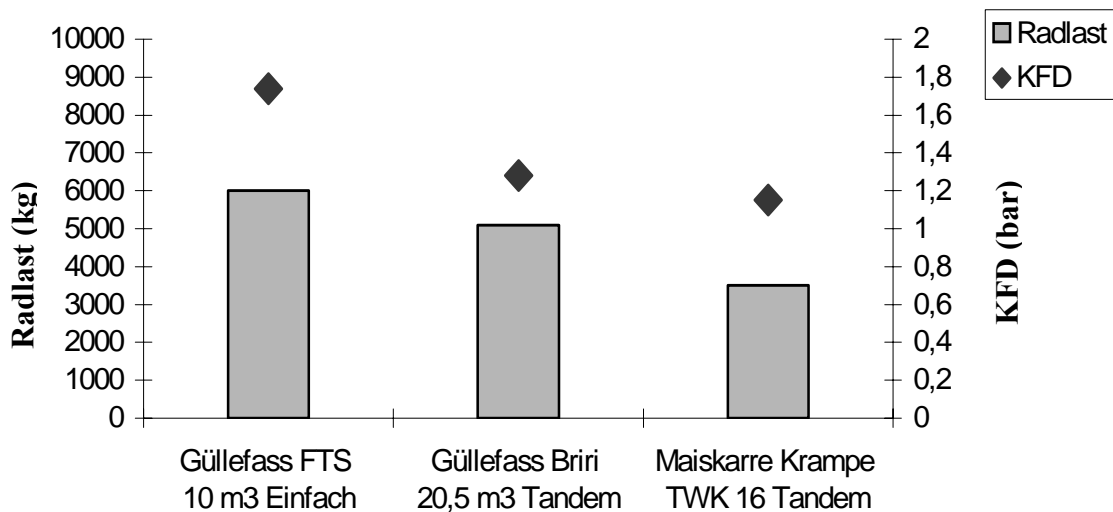


Abb. 62: Radlast und Kontaktflächendrücke typischer Transportmaschinen

4.3.2.2 Druckausbreitung

Die Kontaktflächendrücke erlauben zunächst nur eine Aussage über die an der Bodenoberfläche wirkenden Drücke. Als gemittelte Werte beschreiben sie jedoch die effektiv wirksamen Bodenbelastungen nur unvollständig (LEBERT et al. 2004). Um die Tiefenwirkung des Bodendrucks unterhalb der Kontaktfläche (Spannung) zu bewerten, wird im folgenden für verschiedene Bodentiefen die vertikale Druckfortpflanzung bei den zum Einsatz kommenden Schleppern sowie bei den in Kapitel 4.3.2.1 aufgeführten Ernte- und Transportmaschinen dargestellt. Die Abschätzung der Druckausbreitung erfolgt mit dem Programm TASC (Tyres/Tracks And Soil Compaction, entwickelt von DISERENS & SPIESS 2004, Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Schweiz).

In Tab. 23 sind die maximalen und minimalen tiefenspezifischen Bodendrücke der an den Standorten eingesetzten Schlepper für 2 Bodenfestigkeitsbereiche abgebildet. Aufgrund der unterschiedlichen Radlasten und den schwankenden mittleren Kontaktflächendrücken (vgl. Tab. 22) variieren auch die wirksamen Bodendrücke und liegen nahe der Bodenoberfläche bei

weichen Bodenverhältnissen (meist im Herbst und Frühjahr) zwischen 0,60 bar und 2,51 bar. Gerade in den oberen 30 cm nimmt allerdings die Tiefenwirkung der Bodenspannungen deutlich ab und liegt unterhalb der Krumbasis bei weniger als 0,50 bar. Bei festen Bodenzuständen, wie sie etwa in den Sommermonaten erreicht werden können, ist die Druckbeanspruchung der Böden aufgrund eingeschränkter Spannungsausbreitung wesentlich vermindert.

Die graphische Darstellung (Abb. 63) verdeutlicht exemplarisch für zwei verschiedene Schlepper die berechnete vertikale Druckfortpflanzung in Form der Linien gleichen Bodendrucks (Druckzwiebeln). Schleppertyp 1 (Standort 20) zeichnet sich durch Radlasten von 1903 kg in Verbindung mit verhältnismäßig hohen Kontaktflächendrücken (0,72 bar) aus. Der Schleppertyp 2 (Standort 12) ist mit Radlasten von 2775 kg deutlich schwerer, die Kontaktflächendrücke sind mit 0,49 bar aber wesentlich geringer. Der Vergleich der beiden Schlepper zeigt, dass Typ 1 oberflächennah höhere Bodendrücke verursacht als Typ 2 mit breiterer Bereifung und niedrigeren Kontaktflächendrücken. Während sich beim Schleppertyp 1 in 50 cm Bodentiefe keine Spannungen feststellen lassen, pflanzt sich der Druck bei Schleppertyp 2 bis in 60 cm Bodentiefe fort.

Tab. 23: Spannweiten der tiefenabhängigen Druckausbreitung aller an den 23 Standorten eingesetzten Schlepper unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse

Bodentiefe (cm)	Druck (bar) (weicher Boden)	Druck (bar) (fester Boden)
0	0,60-2,51	0,30-1,26
10	0,51-1,43	0,28-0,84
20	0,33-0,79	0,21-0,54
30	0,21-0,52	0,15-0,37
40	0,13-0,38	0,11-0,27
50	0,08-0,28	0,08-0,22
60	0,06-0,21	0,06-0,17

Welche Auswirkungen eine Erhöhung der Reifenkontaktfläche nach sich ziehen würde, ist in der Abb. 64 dargestellt. Schleppertyp 1 wurde exemplarisch mit breiteren Reifen (54 cm) ausgestattet. Zudem wurde bei beiden Typen der Reifeninnendruck von 1,5 bar auf 0,8 bar gesenkt. Insbesondere im Krumbereich nehmen beim Typ 1 die gemessenen Boden-

spannungen deutlich ab. Beim Typ 2 wird die ohnehin schon hohe Reifenaufstandsfläche der 71 cm breiten Reifen nochmals vergrößert, so dass auch hier die Krume geringer belastet wird. Die Tiefenwirkung hingegen ändert sich bei beiden Schleppern nur geringfügig.

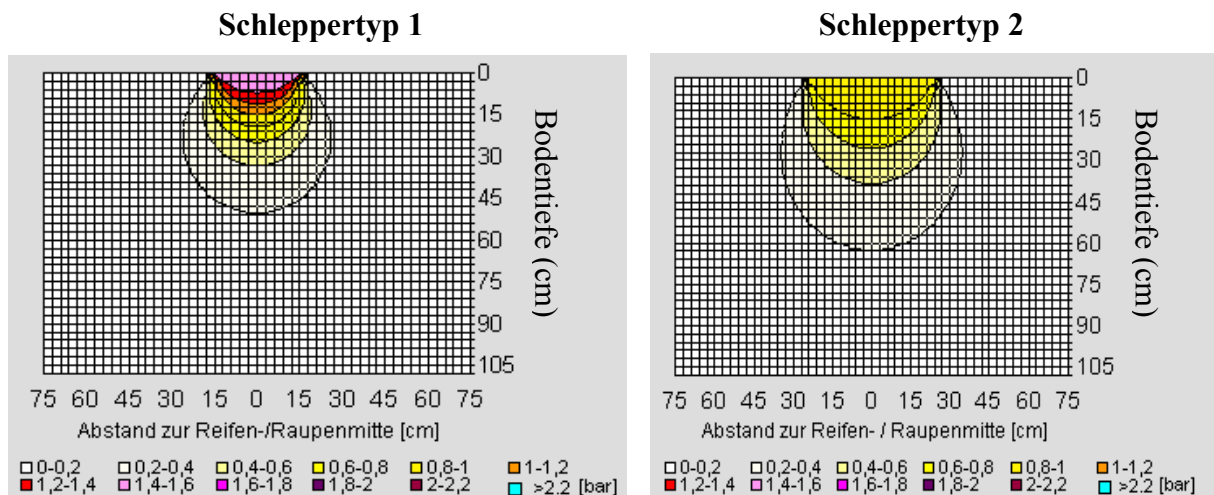


Abb. 63: Druckausbreitung für zwei verschiedene Schleppertypen mit unterschiedlicher Bereifung und Radlast (Reifeninnendruck 1,5 bar)

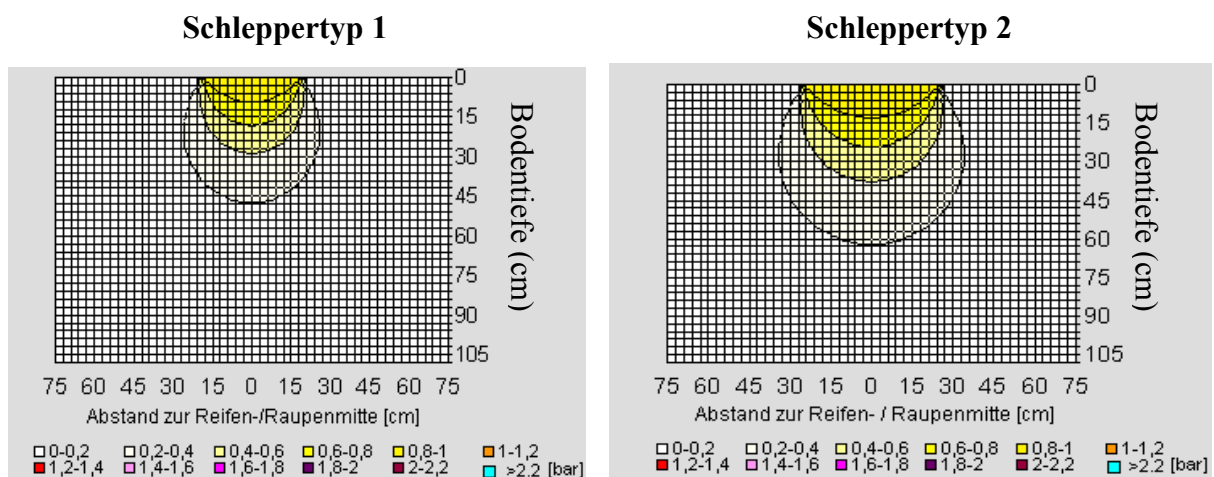


Abb. 64: Druckausbreitung für zwei verschiedene Schleppertypen mit unterschiedlicher Bereifung und Radlast (Reifeninnendruck 0,8 bar)

Tab. 24 zeigt die mechanischen Bodenbelastungen von in NRW häufig zum Einsatz kommenden Ernte- und Transportmaschinen. Für zwei Köpfrdebunker- und Mähdrescher-typen sowie für einen einfach bereiften Flüssigmisttankwagen wurde die Druckausbreitung im Boden berechnet. Die Daten werden für 2 verschiedene Bodenfestigkeiten angegeben, wobei für den Einsatz der Köpfrdebunker bzw. des Flüssigmisttankwagens weiche Boden-

verhältnisse im Herbst angenommen wurden und feste Bodenverhältnisse im Sommer eher für den Einsatz der Mähdrescher zutreffen. Gerade das Jahr 2005 hat aber gezeigt, dass auch zu Zeiten der Getreideernte teilweise relativ feuchte Bodenverhältnisse vorliegen können. In diesen Fällen sollten weiche bzw. zumindest halbfeste Bodenverhältnisse angenommen werden

Die Daten verdeutlichen, wie tief die in hohen Radlasten begründeten Bodendrucke bei nassen als auch bei trockenen Bodenverhältnissen wirken. Der Einsatz des Köpfrdebunkers ROPA EUROTIGER führt zu enorm hohen Spannungen die mit 0,62 bar in 60 cm Tiefe an der Spitze der berechneten Werte stehen. Aber auch Mähdrescher, abgestützt auf 2 Achsen und mit Korntankvolumina über 10000 l, übersteigen die Marke von 0,60 bar im Unterbodenbereich. Auffallend ist, dass der Köpfrdebunker KLEINE SF 10 ähnlich hohe Bodendrucke in 60 cm Tiefe aufweist wie der Flüssigmisttankwagen FTS. Beide Maschinen zeichnen sich durch vergleichbare Radlasten (ca. 6000 kg) aber unterschiedliche Kontaktflächendrücke aus (vgl. Abb. 61 und Abb. 62). Bei allen aufgeführten Landmaschinen liegen gerade im Krumbereich bis ca. 30 cm Tiefe die Drücke oberhalb der 1,00 bar Grenze.

Tab. 24: Tiefenabhängige Spannweiten der Druckausbreitung von Ernte- und Transportmaschinen unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse in bar

Typ	KRB Ropa Eurotiger		KRB Kleine SF 10		MD Claas Lexion 440		New Holland MD CX 880		Flüssigmist- tankwagen FTS 10m ³	
	Druck (weicher Boden)	Druck (fester Boden)	Druck (weicher Boden)	Druck (fester Boden)	Druck (weicher Boden)	Druck (fester Boden)	Druck (weicher Boden)	Druck (fester Boden)	Druck (weicher Boden)	Druck (fester Boden)
	2,58	1,29	2,23	1,12	2,65	1,33	2,56	1,28	3,48	1,74
10	2,37	1,22	2,02	1,05	2,38	1,24	2,33	1,21	2,97	1,58
20	1,96	1,10	1,61	0,92	1,86	1,08	1,89	1,07	2,10	1,29
30	1,51	0,94	1,20	0,77	1,36	0,89	1,43	0,90	1,41	0,99
40	1,14	0,78	0,88	0,62	0,99	0,71	1,07	0,74	0,97	0,74
50	0,87	0,64	0,65	0,50	0,73	0,56	0,80	0,60	0,69	0,56
60	0,67	0,52	0,50	0,40	0,55	0,45	0,61	0,49	0,51	0,44

Die Druckfortpflanzung der eingesetzten Köpfrdebunker wird anhand der Druckzwibel in der Abb. 65 dargestellt. Bis weit über 100 cm reichen die Bodendrücke beim nahezu 60 t schweren ROPA EUROTIGER (ausgeschöpfte Bunkerkapazität). Bei der kleineren Variante des SF 10 der Firma KLEINE machen sich die geringeren Radlasten verbunden mit niedrigeren Kontaktflächendrücken in der vertikalen Druckfortpflanzung bemerkbar. Aber auch hier reichen die Spannungen bis in 100 cm Bodentiefe.

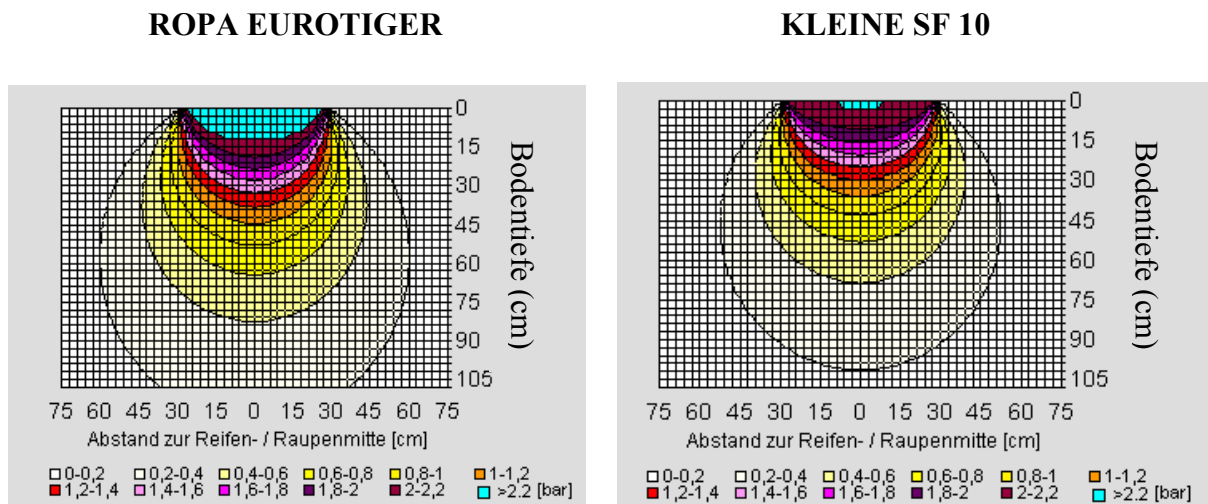


Abb. 65: Druckausbreitung für verschiedene Köpfrdebunker (weicher Boden)

4.3.2.3 Diskussion

Der Trend zu immer schwereren Landmaschinen hält auch in NRW an. Vergleicht man die Hinterradlast von 1070 kg des häufigsten Schleppertyps im Jahre 1983 (STEINKAMPF 1983) mit den an den 23 Standorten ermittelten Durchschnittswerten (1642 kg), so haben die Lasten um nahezu 70 % zugenommen. Daneben hat sich aber in den letzten 20 Jahren auch die Bereifung verändert. Während nach STEINKAMPF (1983) im Jahre 1983 für viele Schlepper 43 cm breite Hinterreifen (16.9 R 34) und somit Kontaktflächen von ca. 1920 cm² charakteristisch waren, liegt die durchschnittliche Aufstandsfläche der Hinterreifen im vorliegenden Fall bei 3444 cm². Infolgedessen ist der durchschnittliche mittlere Kontaktflächendruck (0,50 bar) im Vergleich mit dem des damals am häufigsten eingesetzten Schleppertyps (0,55 bar) sogar gesunken. Die hohen Schwankungsbreiten der Kontaktflächendrücke bei vergleichbaren Radlasten (vgl. Abb. 60) zeugen allerdings von deutlichen Unterschieden bei der Bereifung heutiger Schlepper. Dies ist auf die Bandbreite der berechneten Kontaktflächen zurückzuführen. Demnach bestehen derzeit noch Reserven zur Verminderung der mechanischen Bodenbelastung.

Auch bei den Erntemaschinen sind die Radlasten in NRW gestiegen. Während SONDERHOFF (1988) einen sechsreihigen Köpfrdebunker der Firma HOLMER mit Gesamtlasten von 32 t im Jahre 1988 noch als „besonders schweres Beispiel“ darstellt, werden heute dreiachsige Köpfrdebunker mit nahezu 60 t auf dem Acker bewegt (z.B. ROPA EUROTIGER). Aber auch zweiachsige Köpfrdebunker erreichen Gesamtgewichte von 43 t im Durchschnitt (SCHULZE LAMMERS et al. 2002). Dadurch ergeben sich äußerst hohe Radlasten, die die 10 t Marke überschreiten können. Die Radlasten der in Abb. 61 dargestellten Köpfrdebunker werden also durchaus noch übertroffen. Die Vorderachsen der Köpfrdebunker sind meist mit Reifen zwischen 71-80 cm Breite ausgestattet, während die Mittel- und Hinterachsen mit Reifen zwischen 80-105 cm bestückt werden (SCHULZE LAMMERS et al. 2002). Die berechneten mittleren Kontaktflächendrücke solch schwerer Erntemaschinen liegen dann meist über 1,2 bar (SOMMER et al. 2001, SCHRÖDER & SCHNEIDER 2004). Aber auch Mähdrescher können Radlasten aufweisen, die die der 6-reihigen Köpfrdebunker übertreffen. Dies ist insbesondere in den hohen Bunkerkapazitäten (>10500 l) und der vorrangigen Lastverteilung auf die Vorderachse begründet. Gerade in niederschlagsreichen Sommermonaten, wie es z.B. im Jahre 2005 der Fall war, sind dann Verdichtungen zu befürchten. STAHL et al. (2002) empfehlen daher gerade bei Mähdreschern die Erhöhung der Reifenaufstandsfläche stärker zu berücksichtigen.

Ein weiteres Gefährdungspotenzial für das Bodengefüge bilden Transportmaschinen, z.B. zur Ausbringung organischer Dünger. Obwohl diese Landmaschinen oftmals mit verhältnismäßig breiten Reifen (z.B. 700/50-26.5) ausgestattet sind, führt die Lastabstützung auf häufig nur einer Achse zu hohen Kontaktflächendrücken.

Das Zusammenspiel zwischen Radlast und Kontaktflächendruck spiegelt sich auch in den Druckausbreitungsberechnungen wider. Hohe Kontaktflächendrücke führen zu hohen Bodenspannungen im Bereich der Krume, wogegen hohe Radlasten wesentlich für die Druckausbreitung in die Tiefe verantwortlich sind (BOLLING & SÖHNE 1982). Schlepperradlasten >2500 kg bedingen bei weichen Bodenverhältnissen Drücke bis in 60 cm Tiefe, die jedoch mit ca. 0,2 bar als verhältnismäßig gering eingeschätzt werden können. Wesentlich kritischer muss hingegen die Druckfortpflanzung der Erntemaschinen gesehen werden. Zwar können durch die Erhöhung der Reifenaufstandsfläche relativ niedrige Kontaktflächendrücke von ca. 1,2 bar erreicht werden, die vertikale Druckfortpflanzung reicht jedoch bis in Tiefen über 100 cm. Selbst unterhalb des bei wendender Bodenbearbeitung gelockerten Krumbereiches (>40 cm), treten hier bei weichen Bodenverhältnissen Drücke von ca. 1,0

bar auf, die bei Ackerschleppern mit Radlasten >2500 kg nur in der oberen 10 cm-Bodenschicht berechnet wurden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch ISENSEE & WEISSBACH (2001), SOMMER et. al. (2001), und SCHRÖDER & SCHNEIDER (2004).

Die Kausalkette „Bodenbelastung“ – „Bodenbeanspruchung“ (vgl. Abb. 3) verdeutlicht jedoch die Problematik, die sich bei der Ursachenforschung für das Auftreten schädlicher Bodenveränderungen ergeben. Die Zusammenhänge zwischen den eingesetzten Maschinen und dem Bodengefügezustand lassen sich zwar kausal herleiten sind aber nicht zu beweisen. Dazu sind längerfristige Untersuchungen nötig.

Eine Strategie zur Verringerung der Bodenbeanspruchung liegt z.B. in der Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche (vgl. Abb. 64). Dies kann zum einen durch die Wahl besonders breiter Reifen als auch durch die Anpassung des richtigen Reifeninnendrucks geschehen (SOMMER 1998b). Nach VOLK (2004) kann durch die Reifeninnendruckabsenkung eines Ackerschlepper-Reifens von 1,6 bar auf 0,6 bar die Kontaktfläche nahezu verdoppelt werden.

Aus den Ergebnissen (vgl. Tab. 23, Tab. 24) wird zusätzlich der Einfluss wasserspannungsabhängiger Stabilitätsunterschiede deutlich. Bei Böden höherer Festigkeit, die aufgrund trockenerer Verhältnisse oder aber auch durch Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung vorliegen, ist die vertikale Druckfortpflanzung nicht so stark ausgeprägt. Durch niedrigere Konzentrationsfaktoren erfahren die Spannungen eine geringere Tiefenwirkung entlang der Lastachse bei erhöhter Horizontalausdehnung (SÖHNE 1958).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Druckausbreitungsberechnungen vielfach auf die Spannungstheorie von BOUSSINESQ (1885) aufbauen. Ein grundsätzlicher Nachteil dieser Berechnungsmethode ist, dass die Spannungsausbreitungsberechnung unter der Annahme eines elastischen homogenen und isotropen Halbraumes berechnet wird. Dies spiegelt aber die tatsächlichen Bodenverhältnisse nicht genau wider. Hinzukommend erfolgt die Abschätzung der Druckausbreitung vielfach unter einer starren, kreisrunden lastübertragenden Kontaktfläche nach NEWMARK (1942). Ein weiteres Problem ergibt sich durch die Wahl der Konzentrationsfaktoren. Diese variieren bodenart- und bodenfeuchteabhängig. Zudem werden stabilitätsrelevante Prozesse wie Strukturierung/Aggregation und die Geschwindigkeit der Lastaufbringung nicht berücksichtigt (SEMMELE 1993).

Aus diesem Grunde werden neben Berechnungen vielfach Bodendruckmessungen mit verschiedenen Sensortypen durchgeführt. Aber auch die Ergebnisse solch experimenteller Bestimmungen sind mit Unschärfe behaftet, da verschiedene Typen von Messsensoren

(hydraulisch, pneumatisch, Dehnungsmessstreifen) zum Einsatz kommen. Die von BOLLING (1986) eingesetzten Schlauchsoden weisen je nach eingestelltem Innendruck und je nach Dicke und Stabilität des Schlauches unterschiedliche Messwerte auf (HORN 2004).

Die durchgeführten Berechnungen mit der Excel-Anwendung TASC (DISERENS & SPIESS 2004) sind daher als exemplarische näherungsweise Abschätzung der Druckfortpflanzung zu verstehen. Ob sie die in-situ-Verhältnisse für nordrhein-westfälische Bodenbedingungen exakt widerspiegeln, kann nur durch Druckmessungen bestätigt werden.

4.3.3 Modellhafte Bewertung landwirtschaftlicher Arbeitsverfahren

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurden zum einen die Druckbelastbarkeit verschiedener Böden in NRW und die Druckfortpflanzung der in den 23 Betrieben zum Einsatz kommenden Landtechnik herausgestellt. Verknüpft man nun die Kennwerte der bodeneigenen Stabilität mit den berechneten Bodenspannungen, so können die Arbeitsverfahren hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung bewertet werden.

Dies erfolgt im Folgenden modellhaft für die beprobten Schluffstandorte aus Löss. Für diese geo- und pedogenetisch vergleichbaren Böden konnte die Stabilität aufgrund des hohen Stichprobenumfangs relativ genau abgeschätzt werden. Zudem spiegeln die Schluffböden im Unterboden mit einer durchschnittlichen Vorbelastung von 100 kPa im Zustand der Feldkapazität die instabilsten Verhältnisse wider und sind somit am verdichtungsempfindlichsten. SCHNEIDER (1994), SEMMEL & HORN (1995) und HORN et al. (2001) (alle zit. in SCHRÖDER & SCHNEIDER 2004) bestätigen diesen Wert in ihren Untersuchungen.

Da nicht jedes landwirtschaftliche Arbeitsverfahren einer Bewertung unterzogen werden kann, erfolgt der Vergleich an einer Auswahl typischer Landmaschinen, die sowohl ein geringes als auch ein hohes Gefährdungspotenzial hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung aufweisen.

Abb. 66 zeigt die tiefenabhängig gemessene Vorbelastung sowie die tiefenabhängig berechnete Bodendruckspannung verschiedener Schleppertypen. Es wird die Druckausbreitung des Schleppers mit der höchsten Radlast (blaue Linie) sowie mit dem höchsten Kontaktflächendruck des Hinterrades (grüne Linie) aufgeführt. Daneben werden mit der roten Linie die Druckfortpflanzungsberechnungen für die durchschnittlichen Schlepperhinter-

radlasten der 23 untersuchten Betriebe in Verbindung mit für heutige Zugmaschinen typischer Bereifung (600/65 R 38) aufgeführt.

In der Abb. 67 sind die einzelnen Indikatoren der Verdichtungsgefährdung diesmal für Erntemaschinen und exemplarisch für einen Flüssigmisttankwagen dargestellt.

Die Werte sind jeweils für weiche Bodenverhältnisse (pF 1,8) abgebildet. Die Reifennindendrucke betragen 1,5 bar bei den Schleppern, 2 bar bei den Erntemaschinen und 2,5 bar beim Flüssigmisttankwagen.

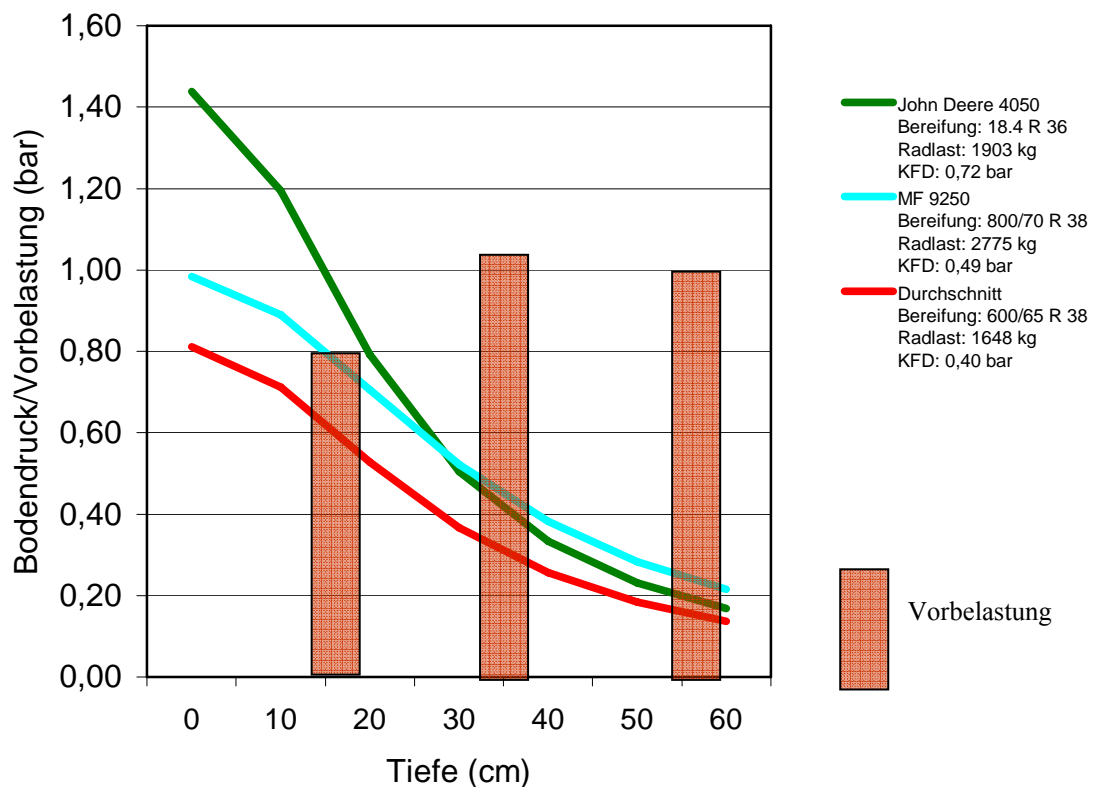


Abb. 66: Gegenüberstellung von Bodendruck und Vorbelastung für verschiedene Schlepper

Bezogen auf die Schlepper zeigt sich deutlich die stärkere Krümenbelastung aufgrund eines hohen Kontaktflächendrucks (grüne Linie). Mit zunehmender Tiefe nähern sich die Bodendrucke den durch die Radlast vorgegebenen Unterschieden an. Dass die Radlast der wichtigste Einflussfaktor auf die Tiefenwirksamkeit von Belastungen darstellt, wurde auch von SEMMEL (1993) beschrieben. Dennoch ist im Bereich der Krümenbasis und des Unterbodens eine Deformation auch unter der Annahme hoher Schlepperradlasten >2700 kg nicht zu erwarten. Im Krümenbereich hingegen kann bedingt durch hohe Kontaktflächendrücke die Bodenstabilität überschritten werden. Gerade bei flacher Boden-

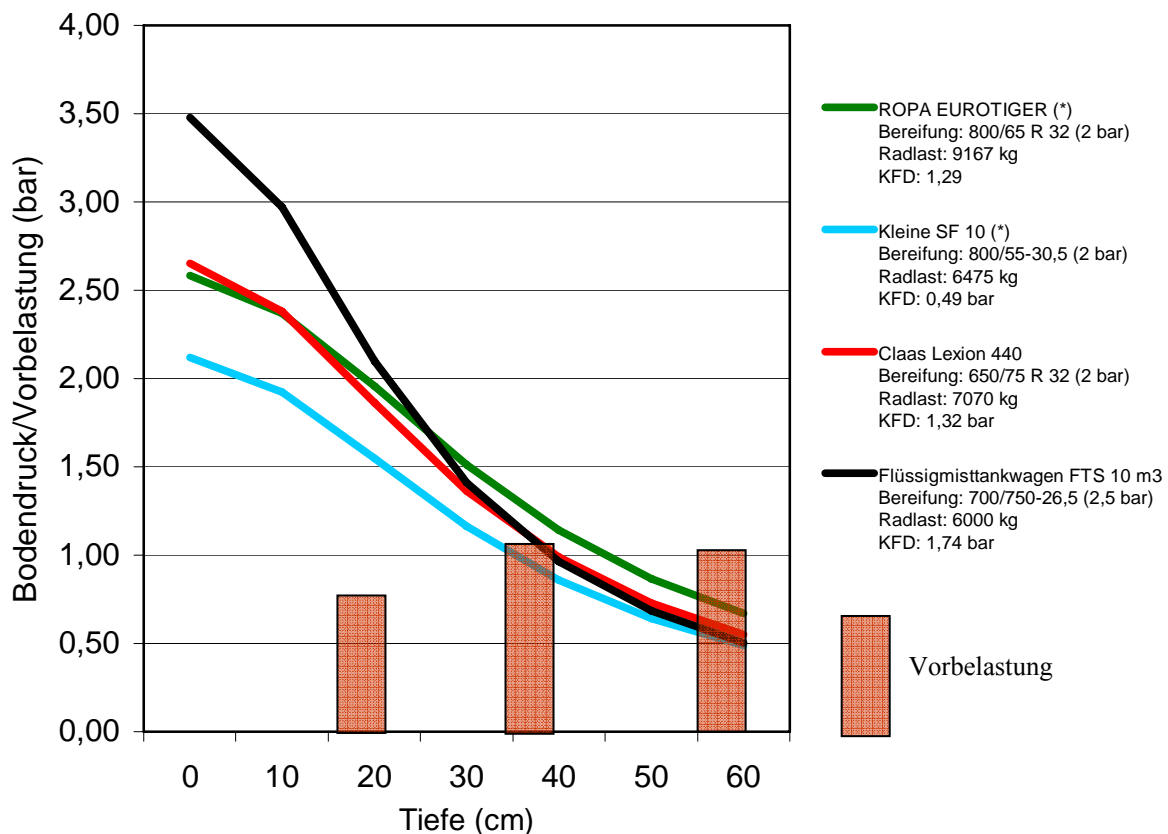


Abb. 67: Bodendruck und Vorbelastung für verschiedene Ernte- und Transportmaschinen

bearbeitung können Böden hier längerfristig zur Dichtlagerung neigen. Einen weiteren Problembereich in der Bodenbewirtschaftung stellt das Pflügen dar. Durch das in der Furche laufende Schlepperrad werden die Bodendrücke direkt auf die Krumbasis und den Unterboden übertragen, was insbesondere in der Krumbasis zu erhöhter Dichtlagerung führt. Die Ergebnisse der Stuserhebung bestätigen solche Vermutungen (vgl. Tab. 15, z.B. Standort 12a+b). Auch SEMMEL (1993) stellte fest, dass beim Pflügen die mit Abstand stärkste Belastungsintensität im Jahresverlauf auftritt. Weiterhin fügt SEMMEL (1993) hinzu, dass beim Pflügen in 60 cm Bodentiefe zum Teil höhere vertikale Drücke als in 40 cm Tiefe gemessen wurden. Zurückzuführen ist dies auf die räumliche Druckfortpflanzung durch das schräg daneben laufende Furchenrad. Hinweise auf eine anthropogen bedingte stabilere Krumbasis zeigen die tendenziell höheren Vorbelastungswerte am Standort 14a-c (vgl. Tab. 19). LEBERT (1989) geht davon aus, dass im Pflugsohlenbereich infolge der

(*) Die Angaben geben die Standardbereifung der Rübenroder (1. Achse) wieder. Zwar werden die Hinterachsen bzw. die mittlere Achse (ROPA) mit breiteren Reifen ausgestattet, es wurden aber bewusst bei der Annahme gleich verteilter Achsenlasten die Reifen mit der höchsten Bodenbeanspruchung ausgewertet.

Zeitabhängigkeit der Setzung eine weitere Erhöhung der Vorbelastung bei Verfahren der wendenden Bodenbearbeitung (Schlepperad läuft in der Furche) zu erwarten ist. Erst wenn sich ein Gleichgewicht zwischen der mechanischen Belastung und der Stabilität der Anordnung der festen Bodenpartikel eingestellt hat, ist eine Zunahme der Vorbelastung nicht zu erwarten.

Die eigentliche Gefährdung für unsere Böden stellt jedoch die Druckbelastung durch schwere Ernte- und Transportmaschinen dar. Diese kommen in der Landwirtschaft aufgrund des Strukturwandels mehr und mehr zum Einsatz. Zudem werden Feldarbeiten verstärkt an Lohnunternehmer abgegeben, die meist über schlagkräftige und gleichzeitig schwere Maschinen verfügen (IMA 1991). Solche kostenintensiven Maschinen müssen zur optimalen Auslastung vielfach wetterunabhängig, d.h. auch bei feuchten Bodenverhältnissen, eingesetzt werden.

Die Spannungen der Ernte- und Transportmaschinen übersteigen mit Werten zwischen 1 bar und 2 bar in Tiefen bis 40 cm deutlich die bodeneigene Stabilität. Wird diese wiederkehrend überschritten, sind langfristig irreversible Bodendegradierungen mit negativen Auswirkungen auf den Luft- und Wasserhaushalt unterhalb des Lockerungsbereiches zu erwarten. Instabile weiche Bodenverhältnisse treten im Herbst während der Wiederauffüllung der Poren mit Niederschlagswasser, im zeitigen Frühjahr nach der Schneeschmelze oder nach Starkniederschlagsereignissen auf (HORN 2004). Bei trockenen Bodenverhältnissen (pF 2,5) hingegen steigt die bodeneigene Stabilität (vgl. Abb. 53) deutlich an, was zu einer verminderten vertikalen Druckausbreitung führt (vgl. Tab. 23 und Tab. 24). Ist der Boden auch in tieferen Bereichen abgetrocknet, sind Verdichtungen nicht zu erwarten. Wird hingegen ein trockener augenscheinlich befahrbarer Oberboden über einem nassen instabilen Unterboden belastet, ist dennoch eine potenzielle Verdichtungsgefahr gegeben (SEMMELE 1993). Dies liegt zum einen daran, dass im stabiler werdenden Oberboden weniger Spannungen über Partikelbewegungen abgebaut werden und zum anderen, weil der Oberboden oft nicht fest oder mächtig genug ist, schwere Lasten zu tragen. In diesem Fall muss nach SEMMELE (1993) „für die aufliegende Last durch das Abstützen auf dem noch feuchten Unterboden ein Widerlager (verdichteter Horizont) geschaffen werden“.

Berücksichtigt werden muss bei den Darstellungen, dass die Vorbelastung im Krumbereich nur einen Durchschnittswert abbildet. Tatsächlich aber wird z.B. durch Verfahren der nicht wendenden Bodenbearbeitung die Stabilität gerade im Krumbereich deutlich erhöht (vgl. Tab. 19). Ein tragfähigerer Oberboden reduziert dann den Konzentrationsfaktor und

kann die Bereiche unterhalb des Lockerungshorizontes vor Verdichtungen schützen (HORN 1986, SEMMEL 1993, STAHL et al. 2002).

4.3.4 Fazit

Die Vorbelastung ist standortbedingt erheblichen Schwankungen unterworfen. Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren (u.a. Bodenart, Bodentyp, Bodenfeuchte, Bodenbearbeitung) auf die Bodenstabilität ist eine relativ genaue Schätzung nur bei hohen Wiederholungszahlen und einem Abgleich der gemessenen Werte mit Datenbeständen anderer Länder möglich.

Die landtechnischen Erhebungen zeigen, dass die Gewichte von Schleppern, Ernte- und Transportmaschinen deutlich angestiegen sind. Die Bereifung der Schlepper variiert betriebsindividuell sehr stark, was sich direkt in den berechneten Werten für das Druckfortpflanzungsverhalten niederschlägt. Das Potenzial für eine bodenschonende Bewirtschaftung ist noch nicht ausgeschöpft.

Durch die Gegenüberstellung der Druckbelastbarkeit mit der mechanischen Belastung können landwirtschaftliche Arbeitsverfahren hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung bewertet werden. Die nach TASC exemplarisch berechneten Bodendruckspannungen zeigen, dass insbesondere der Einsatz schwerer Erntemaschinen ein Gefährdungspotenzial für die Bodenbereiche unterhalb des Lockerungshorizontes darstellt. Je nach Bereifung ist bei Radlasten oberhalb von 6-10 t bei weichen Schluffböden aus Löss mit einer schleichenden Unterbodenverformung zu rechnen. Damit liegen diese Werte deutlich über den abgeleiteten Radlasten von 2,3 t nach dem HORNschen- Ansatz (DVWK 2002).

5 Zusammenfassende Diskussion

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die in Kapitel 1 aufgeführten Versuchsfragen zu beantworten. Dabei standen der heutige Gefügestand nordrhein-westfälischer Ackerstandorte, die Bewertung einer Bodenschadverdichtung anhand eines verfügbaren Referenzsystems sowie die Validierung entsprechender Prognosemodelle im Vordergrund der Untersuchungen. Aus den Erkenntnissen sollte schließlich ein Vorschlag für einen Bewertungsmaßstab im Sinne einer gefügeschonenden Landbewirtschaftung abgeleitet werden.

Versuchsfrage 1

Wie präsentiert sich der Bodengefügestand nordrhein-westfälischer Ackerstandorte außerhalb der stark frequentierten Vorgewende- und Fahrgassenbereiche (Kernproduktionsfläche)?

In welchem Maße bewirtschaftungsbedingte Gefügeschäden auftreten, hängt von verschiedenen bodenendogenen (inneren) und bodenexogenen (äußeren) Faktoren ab. Werden durch bodenexogene Druckbelastungen die bodenendogenen Widerstände (Tragfähigkeit) mobilisiert, so tritt solange eine Bodendeformation ein, bis der einwirkende Druck der Tragfähigkeit des Bodens entspricht (SEMMELE & HORN 1995). Es kommt zu einer Bodenbeanspruchung in Form einer Gefügestörung, die sich in einer verringerten Luftkapazität, eingeschränkten Wasser- und Luftleitfähigkeitseigenschaften sowie in höheren Festigkeiten des Bodens äußert.

Aufgrund der zahlreichen am Prozess einer Bodenverdichtung beteiligten Faktoren sind die Zusammenhänge, die sich aus dem Wirkungsgefüge „Boden“ und „Bodenbelastung“ ergeben, sehr komplex. Dies hat zur Folge, dass die Ergebnisse zum Bodengefügestand im Bereich landwirtschaftlicher Kernproduktionsflächen standortabhängig starken Schwankungen unterworfen sein können.

Bezogen auf den *Unterboden* (ca. 50 cm) sind diese Schwankungen mit pedo- und geogentisch bedingten Entwicklungsprozessen zu erklären. Anthropogen verursachte Schadverdichtungen wurden in dieser Bodentiefe nicht festgestellt, so dass Unterböden derzeit ihre Funktion der Wasser- und Luftführung erfüllen. Sieht man von den Tonböden ab, so grenzen allerdings die Luftkapazitätswerte mit \varnothing 8 Vol.-% bei vielen Lehm- und Schluffstandorten an den in der Literatur oftmals genannten kritischen Bereich von 8-10 Vol.-% (CZERATZKI 1972, AYRES et al. 1973, RENGER 1974, WERNER & UNGER 1977, WERNER &

PITTELKOW 1979, MOHR 1980, GUPTA & LARSON 1982, XU et al. 1992, DEXTER 1988). Demnach halten wir fest: Die Werte sind alarmierend. Ob wir uns allerdings am Beginn einer einsetzenden Bodendegradierung mit ihren negativen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen befinden, oder ob durch den Einsatz heutiger Landtechnik der aktuell vorherrschende Gefügestand des Unterbodens erhalten bleibt, kann durch eine einmalige Untersuchung nicht nachgewiesen werden. Dazu sind langfristige Messreihen notwendig, die eine schleichende Bodenverformung auch statistisch nachweisen können. Solche Ergebnisse existieren bislang nur von RUHM (1983), der die Bodendichten an 150 Ackerstandorten in Niedersachsen zu Beginn der 80er Jahre ermittelte und diese mit Messungen aus den 50er Jahren verglich. Er stellte in diesem Zeitraum eine zunehmende Dichtlagerung des Bodens um $0,07 \text{ g/cm}^3$ fest, was einer deutlichen Verringerung des Gesamtporenvolumens (ca. 3-4 Vol.-%) gleichkommt.

Im Bereich der *Krumenbasis* (ca. 30 cm) üblich bewirtschafteter Kernproduktionsflächen zeugen sowohl die visuellen Freilandbeurteilungen als auch die Laborergebnisse von ungünstigen Bodengefügeständen. Mit Ausnahme der Tonböden sind der Anteil luft- und wasserführender Grobporen eingeschränkt, die biologische Aktivität vermindert und die Bodenwiderstände erhöht. Krumenbasisverdichtungen sind primär die Folge dynamischer Belastungen bei der Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug. Beim Fahren des Schlepperrades in der Pflugfurche entstehen unterhalb der Krume Pflugsohlenverdichtungen (SOMMER 1985), die insbesondere durch die scherenden und knetenden Bewegungen des Schlepperades einen negativen Einfluss auf die Porenkontinuität haben. Die Tatsache, dass Krumenbasisverdichtungen auch auf konservierend und in Direktsaat bewirtschafteten Flächen noch vorhanden sind, zeugt von der langwierigen oder gar irreversiblen Regeneration verdichteter Horizonte. HORN et al. (1997, zit. in WIERMANN 1998) heben hervor, dass auch in biologisch hochaktiven Böden nach 20 Jahren konservierender Bodenbearbeitung noch verdichtete Pflugsohlen erkennbar sind. Die nachgewiesene Persistenz schädlicher Bodenveränderungen verdeutlicht die Problematik degradierten Böden: Einmal verdichtete Böden sind insbesondere unterhalb des lockerbaren Bereiches schwerlich zu regenerieren und schränken dauerhaft die Funktionsfähigkeit ein.

Dicht lagernde *Krumenbereiche* treten vorwiegend bei Bodenbearbeitungssystemen mit verminderter Eingriffsintensität auf. Eine verringerte Lockerungstiefe bedingt eine erhöhte Lagerungsdichte im unteren Krumenbereich (BALL et al. 1988, EHLERS & CLAUPEIN 1994); vor allem in den ersten Jahren nach Änderung des Bodenbearbeitungsverfahrens sinkt

die Porosität ab. Die Ergebnisse der konservierend oder in Direktsaat bestellten Flächen zeigen jedoch, dass sich langfristig betrachtet ein tiefreichendes kontinuierliches Grobporensystem aufbaut. Dadurch wird die Kompaktierungswirkung der Festbodenwirtschaft deutlich abgepuffert. Bei der wendenden Bodenbearbeitung wird eine lockere instabile Bodenstruktur durch nachfolgende Befahrungen besonders verdichtet. Solche Krümenverdichtungen können allerdings bei der Grundbodenbearbeitung problemlos unterfahren und beseitigt werden. Sie sind demnach saisonal bedingt, aus Sicht der landwirtschaftlichen Praxis unvermeidbar, und aufgrund ihrer Kurzzeitigkeit nur als vorübergehende Bodenverdichtungen zu bezeichnen.

Versuchsfrage 2:

Erlaubt das Indikatorenmodell die eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung im Sinne des Bodenschutzrechtes?

Neben der Feldgefügeansprache vereint das Indikatorensystem mit der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit Parameter zur Beschreibung eines funktionierenden Bodengefüges. Unter Berücksichtigung der Schadschwellenwerte von 5 Vol.-% für die Luftkapazität, 10 cm/d für die gesättigte Wasserleitfähigkeit und den Stufen 4 bzw. 5 für die Feldgefügeansprachen (Spatendiagnose, Packungsdichte, Effektive Lagerungsdichte) werden in den vorliegenden Untersuchungen die Bereiche der Krümenbasis und des Unterbodens als nicht schadverdichtet eingestuft. Dass jedoch nach dem Indikatorenmodell gerade anthropogen bedingte Krümenbasisverdichtungen kein Problem der bewirtschafteten Flächen darstellen, widerspricht den eigenen Ergebnissen der Feldgefügeansprachen. Die Schwachstellenanalyse hat gezeigt, dass die praxistaugliche Anwendbarkeit des Modells durch verschiedene Punkte eingeschränkt wird:

Sandböden kennzeichnen sich durch einen hohen Anteil grober Körner mit einem Durchmesser zwischen 2000 μm und 63 μm . Eine Erhöhung der Kornkontaktzahlen und somit eine weitere Dichtlagerung solcher Böden ist nur bis zu einem gewissen Maße möglich. Nämlich bis zu dem Punkt, an dem die einzelnen Körner bis auf ein höchstes Maß zusammengepresst und die maximale Dichtlagerung erreicht wird. Gerade Sandböden können auch bei Langzeitbelastungen -zumindest mit Drücken bis zu 650 kPa- nicht auf unter 5 Vol.-% verdichtet werden. Ein solcher Boden würde also trotz Vorliegens eines schlechten Bodengefüges nach dem Indikatorenmodell nicht den Status „schadverdichtet“ erhalten können. In diesen Fällen sollte unbedingt entweder eine alleinige Bewertung anhand der

Feldgefügeansprache oder eine Festlegung substratspezifischer Grenzwerte erfolgen. Tonreiche Böden hingegen charakterisieren sich aufgrund des natürlich bedingten hohen Feinporenanteils durch sehr geringe Wasserleitfähigkeiten und geringe Luftkapazitäten. Damit diese Böden nicht fälschlicherweise als Bodenschadverdichtung angesprochen werden, sollte die Identifikation stets anhand einer Kombination der einzelnen Kennwerte der Feldgefüge- und Laborparameter erfolgen. Dadurch können dann auch pedo- und geogenetisch bedingte Dichtlagerungen von anthropogen verursachten Schadverdichtungen unterschieden werden.

Um nachhaltig die Funktionsfähigkeit unserer Böden sicherzustellen, sollten die Schwellenwerte zur Identifikation einer Bodenschadverdichtung stets als Maßnahmewert im Sinne des Bodenschutzvollzuges und nicht als anzustrebender Orientierungswert interpretiert werden. Zusätzlich erfordern zur justiziablen Umsetzung die natürlich bedingten Schwankungsbreiten der gesättigten Wasserleitfähigkeit die Angabe einer Häufigkeitsverteilung. Des Weiteren ergeben sich offene Fragen bezüglich der Mächtigkeit und der pflanzenbaulichen Bewertung schädlicher Bodenverdichtungen. Für den praktizierenden Landwirt ist die Ertragsfähigkeit seiner Ackerflächen wichtigstes Kriterium bei der Beurteilung des Gefügezustandes. Anhand der bodenphysikalischen Kennwerte Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit kann allerdings nicht sicher bewertet werden, ob die Pflanzenwurzel durch mechanische Bodenwiderstände oder Sauerstoffmangel an ihrem Wachstum gehindert werden. Um Flächen pflanzenbaulich zu bewerten, muss daher immer die Durchwurzelung berücksichtigt werden.

Versuchsfrage 3:

Welches der in der Wissenschaft diskutierten Modelle ist für eine praxistaugliche Prognose zur Abschätzung der potenziellen Verdichtungsgefährdung geeignet?

Die Validierung der einzelnen Prognosekonzepte hat gezeigt, dass sich der Ansatz Schadverdichtungsgefährdungsklassen nicht zur Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit eignet. Der Parameter Lagerungsdichte hat als reine physikalische Dichte keinen direkten bodenfunktionalen Bezug. Je nach Belastungspfad kann ein Boden bei gleicher Dichte unterschiedliche Porenanordnungen und Porengeometrien besitzen. Zwar verdeutlichen die Ergebnisse, dass sich bei Betrachtung von Böden aus einer geologischen Einheit und gleicher Körnung die Lagerungsdichte doch zur Kennzeichnung des Porenraumes eignet, Rückschlüsse auf die Porenkontinuität können allerdings nicht gezogen werden. Aufgrund der

teilweise stark differierenden Auffassungen werden daher Ansätze, die versuchen eine Bodenschadverdichtung anhand der Überschreitung einer definierten Lagerungsdichte zu identifizieren, kritisch bewertet. Dies bestätigen die durchgeführten Untersuchungen. Es kann keine optimale Lagerungsdichte für die untersuchten Böden angegeben werden, da es diese zumindest im Bereich strukturierter Bodenhorizonte nicht gibt. Daher muss von der Verwendung eines solchen Parameters zur Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit abgeraten werden.

Was zusätzlich die Anwendung des PETELKAU-Ansatzes in Frage stellt, ist die Tatsache, dass die Drucksetzungsversuche an gestörten Bodenproben durchgeführt wurden. Dies spiegelt nicht die Stabilitätskriterien aggregierter Unterböden wider. Das Modell eignet sich allenfalls für die Bereiche bearbeiteter Krumenböden (LEBERT et al. 2004).

Einen brauchbaren Parameter zur Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit spiegelt der Parameter „Vorbelastung“ wider. Er beschreibt die bodeneigene Stabilität in der Druckeinheit kPa. Bei Orientierung der mechanischen Belastung an die Vorbelastung bleibt das intakte Unterbodengefüge erhalten, weitere Verdichtungen werden nicht zugelassen. Von einer rechnerischen Abschätzung der Bodenstabilität nach verschiedenen Regressionsmodellen muss jedoch abgeraten werden. Eine Überprüfung der Regressionsgleichungen wurde bereits von mehreren Autoren durchgeführt (QASEM et al. 2000, SCHÄFER-LANDEFELD & BRANDHUBER 2001). Sie raten von einer Verwendung der Berechnungsmodelle ab. Selbst NISSEN (1999), auf dessen Arbeiten die Regressionsgleichungen im DVWK-Ansatz 901 (2002) beruhen, bezeichnet seine eigenen Gleichungen mit mittleren Schätzfehlern von 50 kPa bis 60 kPa als sehr unsicher.

Der Kritik, dass die Vorbelastung unter Annahme konsolidierter Bedingungen gemessen wird und somit nicht auf Praxisbedingungen übertragen werden kann, ist hingegen nicht zutreffend. Jede kurzfristige Überschreitung der Eigenstabilität führt zu einer zwar geringen plastischen Verformung des Bodens, langjährig aufsummierende Einzelereignissen hingegen ziehen eine deutliche Setzung und somit eine messbare negative Veränderung bodenfunktionaler Parameter nach sich. Anders formuliert: Mehrfachwiederholte Belastungen entsprechen in ihrer Verdichtungswirkung einer Langezeitbelastung. Die Bestimmung der Vorbelastung nach abgeschlossener Konsolidierung ist also als langjähriges Schutzkonzept ausgelegt.

Ein Problem bei Verwendung des Parameters „Vorbelastung“ stellen jedoch die hohen Streubreiten der Messwerte dar. SCHMIDT et al. (2004) stellen für die Bodenartenhaupt-

gruppe der Schluffe Schwankungsbereiche zwischen 64 und 157 kPa (pF 1,8) fest. Demgegenüber sind die vorliegenden Untersuchungen für die Unterböden aus Löss mit 100 kPa (pF 1,8) bereits gut abgesichert (SCHNEIDER 1994, SEMMEL & HORN 1995, HORN et al. 2001, alle zit. in SCHRÖDER 2004).

Der Druckbelastungsquotient eignet sich für Ton- und Sandböden aufgrund der Luftkapazitätsgrenze von 5 Vol.-% nicht. Für Schluff- und Lehmböden ist eine Orientierung an die untere Grenze der Funktionsfähigkeit als fragwürdig einzustufen. Man bewegt sich mit 5 Vol.-% im absoluten Grenzbereich. Dies steht im Widerspruch zu dem generellen Ziel eines Gefahrenabwehrkonzepts, welches das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung bereits vor dessen Eintritt erkennen soll. Die Gefahr, dass die Unterböden irreversibel schadverdichtet werden, ist bei dem Konzept „Druckbelastungsquotient“ zu groß. Ziel im Sinne der Vorsorge ist es aber, nicht Minimal- sondern Optimalzustände herbeizuführen. Nach SCHRÖDER & SCHNEIDER (2004) „dürfen Unterböden nirgends weiterverdichtet werden, denn es gibt keinen Boden, dessen Funktion dadurch nicht eingeschränkt werden würde“.

Zusätzlich sind die zur Anwendung kommenden Algorithmen nicht auf nordrhein-westfälische Bodenbedingungen übertragbar.

Versuchsfrage 4:

Wie kann im Sinne eines vorsorgenden Bodenschutzes die mechanische Belastbarkeit für Böden in NRW abgeschätzt werden, um daraus die bei der Landbewirtschaftung auf den Boden einwirkenden Lasteinträge (Bodendrucke) zu bewerten?

Ein Bewertungsmaßstab kann nur durch die Verknüpfung der Bodenbelastbarkeit mit der vorhandenen Bodenbelastung erreicht werden. Grundsätzlich kann eine schädliche Bodengefügeveränderung nur dann eintreten, wenn die Bodenbelastung die vorhandene Bodenstabilität übersteigt (LEBERT et al. 2004).

Der Parameter „Vorbelastung“ stellt ein geeignetes Kriterium zur Bestimmung der Bodenbelastbarkeit dar (vgl. Versuchsfrage 3). Bezogen auf die untersuchten Bodenverhältnisse können die Aussagen LEBERT's (1989) bestätigt werden, wonach die Tragfähigkeit von Böden im Wesentlichen von der bodengenetischen Stabilisierung durch Aggregierungsprozesse und anthropogener Stabilisierung infolge erhöhter Dichtlagerung beeinflusst wird. Dies führt dazu, dass auch bei polyedrisch bzw. subpolyedrisch strukturierten Unterbodenhorizonten mit geringen Lagerungsdichten hohe Vorbelastungs-

werte auftreten. Polyedergefüge sind vor allem kennzeichnendes Merkmal bei Tonböden und sorgen somit trotz geringer Lagerungsdichten für eine hohe Vorbelastung. Auch Pedogeneseprozesse, wie z.B. die Bildung von verhärteten Bh- bzw. Bs-Horizonten, sowie Verfahren der nicht wendenden Bodenbearbeitung führen durch Aggregation zu verhältnismäßig hohen Festigkeiten. Für letzteres ist insbesondere das durch wiederholte Quellungs- und Schrumpfungszyklen entstandene stabile Aggregatsystem mit hoher Aggregatporosität und hohen Aggregatlagerungsdichten verantwortlich.

Demnach gilt: Die Grundbodenbearbeitung mit schonender, nichtwendender Lockerung ist ein Teil der Strategie für bodenschonendes Befahren in der pflanzlichen Produktion.

Bei einer Zerstörung der Aggregatstruktur, vor allem im Bereich der Krumbasis (Pflugsohle), infolge mechanischer Druckbelastung und Knetungen (HORN 1976) erfolgt eine Herabsetzung der aggregierungsbedingten Stabilität. In diesem Fall kann die Tragfähigkeit nur durch eine erhöhte Dichtlagerung aufrechterhalten werden. Aus diesem Grund weisen sowohl die plattig strukturierten Pflugsohlen als auch die strukturschwachen Krumbereiche der Schluffe bei gleicher bzw. geringerer Vorbelastung höhere Lagerungsdichten auf.

Die Berechnungen anhand der Excel-Anwendung TASC zeigen, dass hohe Kontaktflächendrücke zu hohen Bodenspannungen im Bereich der Krume führen, wogegen hohe Radlasten wesentlich für die Druckausbreitung in die Tiefe verantwortlich sind. Dies bedeutet: Einen wirksamen Schutz vor Bodenschadverdichtungen bietet nur die Begrenzung der Radlast, denn der Erweiterung der Reifenausstandsfläche sind natürliche Grenzen gesetzt. Diese liegt aber nach den eigenen Berechnungen nicht bei den von HORN geforderten Maximallasten von 2-3 t. Auf z.B. lössbürtigen Böden ist erst beim Einsatz schwerer Landtechnik mit Radlasten über 6-10 t mit einer schleichenden Unterbodendegradierung zu rechnen. Solch eine Entwicklung wird aber stets für den ungünstigsten Fall, also für wassergesättigte Böden angenommen. Trockene Böden sind wesentlich tragfähiger, die Belastung darf dann deutlich erhöht werden.

6 Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

Aus der Beantwortung der Versuchsfragen in der zusammenfassenden Diskussion lassen sich die Schlussfolgerungen sowie der weitere Forschungsbedarf ableiten:

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Bodenschadverdichtungen in NRW regionenspezifisch auftreten, und ihre Ursachen komplex sind. Der Behauptung, dass eine zunehmende Verdichtung von Ackerflächen durch den fachgerechten Maschineneinsatz nicht zu befürchten ist (z.B. SCHWARK & ISENSEE 2004), muss widersprochen werden. Allerdings sind Verdichtungen zurzeit nur auf die Bereiche der Krume und der Krumbasis beschränkt. Ob mit einer langsamen fortschreitenden Bodendegradierung des Unterbodens gerechnet werden muss, kann nur durch ein langfristig angelegtes Bodenmonitoring festgestellt werden. Solch eine Beobachtung der Bodengefügeveränderung sollte stets unter Berücksichtigung der regionalen und lokalen Heterogenitäten (Boden, Klima, Belastung,...) erfolgen. Dabei sollten unbedingt die Parameter Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit zur Beschreibung der Bodenfunktionen erhoben werden. Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft führt eine Dauerbeobachtung bereits auf insgesamt 10 Flächen durch.

Die Identifikation einer Schadverdichtung ist grundsätzlich mit dem von LEBERT et al. (2004) vorgestellten Indikatorenmodell möglich. Überarbeitungsbedarf ergibt sich allerdings aus der Definition der Schadschwellen. Diese sollten zumindest für sandreiche Böden angepasst werden. Zur Feststellung, ob die Grenze der gesättigten Wasserleitfähigkeit von 10 cm/d überschritten wird, sollte eine minimal benötigte Wiederholungsanzahl und die maximale Anzahl der Werte unterhalb der Schadschwelle festgelegt werden. Des Weiteren ergeben sich offenen Fragen bezüglich der Mächtigkeit und Tiefenlage der Verdichtungen sowie des Flächenanteils im konkreten Fall. Unter Berücksichtigung der Kritikpunkte wären dann Maßnahmewerte nach §8 BBodSchG vorhanden, bei deren Überschreitung in der Regel von einer schädlichen Bodenveränderung ausgegangen werden muss. Eine justiziable Umsetzung ist allerdings nur durch bodenkundlich geschulte Fachleute möglich.

Zur Vermeidung schädlicher Bodenverdichtungen kann das Modell „Vorbelastung“ angewendet werden. Dieser Ansatz ist bereits sehr ausgereift und lässt auf lange Sicht einen wirkungsvollen Beitrag zum vorsorgenden Bodenschutz erwarten. Entwicklungsbedarf ergibt sich jedoch bei der Abschätzung der bodenspezifischen Druckstabilität. Da die vorhandenen Regressionsmodelle nur sehr ungenaue Schätzungen erlauben, sollten weitere Vorbelastungs-

messungen durchgeführt werden, um möglichst alle vorkommenden Bodenarten und Bodentypen Nordrhein-Westfalens zu erfassen. Zwingend erforderlich ist dabei die Berücksichtigung der Gefügeaggregation. Eine weitere Hilfe bietet die Abgleichung der erhobenen Ergebnisse mit Datenbeständen anderer Bundesländer. So verfügt die Arbeitsgruppe HORN (CAU-Kiel) bereits über eine umfangreiche Datenbank bundesweiter Erhebungen. Aber auch in Sachsen und Bayern wurden Druckbelastungsversuche zur Bestimmung der Vorbelastung durchgeführt. Bei verbesserter Datengrundlage kann dann eine Gebietskulisse besonders verdichtungsgefährdeter Areale abgeleitet werden.

Ein weiterer Aspekt, der sich aus den Untersuchungen ergibt, ist die Notwendigkeit der Berücksichtigung wechselnder Bodenfeuchten. Trockene Böden sind wesentlich stabiler als feuchte Böden und erlauben höhere mechanische Belastungen. Um direkte Handlungsempfehlungen geben zu können, sollte daher der Bodenwassereinfluss bei der Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit stärker berücksichtigt werden. Bereits in Expertengesprächen wurde deutlich, dass die Einschätzung der Abnahme der Bodenfeuchte im Unterboden im Sommer und Herbst und damit verbundene Verringerungen der Verdichtungsempfindlichkeit unterschiedlich bewertet werden. Eine Lösung würden landesweit durchgeführte Tensiometermessungen bieten. Aus den so gewonnenen Messwerten könnten bodenfeuchteabhängige Befahrbarkeitsszenarien berechnet werden, deren Ergebnisse gemeinsam mit den Vorbelastungswerten für eine praxistaugliche Beratung herangezogen werden könnten.

Durch eine Gegenüberstellung der Druckbelastbarkeit mit der Druckbelastung können Mechanisierungsverfahren hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung beurteilt werden. Die modellhafte Bewertung landwirtschaftlicher Arbeitsverfahren hat gezeigt, dass bei Schluffböden, die im Unterboden eine Vorbelastung von ca. 100 kPa bei Feldkapazität aufweisen, die bodeneigene Stabilität beim Einsatz schwerer Landmaschinen mit 6-10 t Radlast überschritten wird. Dies lässt langfristig gesehen irreversible Schadverdichtungen erwarten. Zwar können durch technische Vorrichtungen an Arbeitsmaschinen wie Reifendruck-Regelanlagen und Breitreifen die Risiken der Verdichtung verringert werden, ab einer bestimmten Tiefe ist allerdings die Radlast bestimmender Haupteinflussfaktor für den Bodendruck.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass mit dem Modell „Vorbelastung“ grundsätzlich ein Instrumentarium vorhanden ist, das eine praxistaugliche Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit erlaubt. Um spezifische Befahrbarkeitsempfehlungen geben zu können, ist die

Datengrundlage allerdings noch nicht ausreichend. Aus dem individuellen Wert der Vorbelastung können schließlich Richtwerte für maximale Kontaktflächendrücke bzw. Radlasten abgeleitet werden.

7 Zusammenfassung

Zur Vermeidung schädlicher Bodenveränderungen stehen Prognosekonzepte zur Verfügung, die auf eine gefügeschonende Landbewirtschaftung im Sinne eines vorbeugenden Bodenschutzes abzielen. Dies sind die Konzepte „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“, „Vorbelastung“ und „Druckbelastungsquotient“. Daneben wurde ein „Indikatorenmodell“ vorgestellt, das die eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung im Sinne des Vollzuges nach §8 BBodSchG durch bodenkundlich geschulte Fachleute ermöglichen soll.

Die gegenwärtige Diskussion zur Bodenschadverdichtung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ist kontrovers. Aus diesem Grund wurde durch das Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen (MUNLV) ein Forschungsvorhaben in Auftrag gegeben, in dem die nachfolgenden Versuchsfragen beantwortet werden sollten:

1. Wie präsentiert sich der Bodengefügezustand nordrhein-westfälischer Ackerstandorte außerhalb der stark frequentierten Vorgewende- und Fahrgassenbereiche (Kernproduktionsfläche)?
2. Erlaubt das Indikatorenmodell die eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung im Sinne des Bodenschutzrechtes?
3. Welches der in der Wissenschaft diskutierten Modelle ist für eine praxistaugliche Prognose zur Abschätzung der potenziellen Verdichtungsgefährdung geeignet?
4. Wie kann im Sinne eines vorsorgenden Bodenschutzes die mechanische Belastbarkeit für Böden in NRW abgeschätzt werden, um daraus die bei der Landbewirtschaftung auf den Boden einwirkenden Lasteinträge (Bodendrucke) zu bewerten?

Dazu wurden bodenphysikalische, -mechanische und -chemische Untersuchungen bei 23 landwirtschaftlichen Betrieben auf insgesamt 46 Nutzflächen unter verschiedenen Standort-, Nutzungs- und Witterungsbedingungen durchgeführt. Beprobt wurde jeweils der Bereich der Krume (ca. 15 cm), der Krumbasis (ca. 35 cm) und des Unterbodens (ca. 50 cm).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterböden der untersuchten Standorte derzeit ihre Funktion der Wasser- und Luftführung erfüllen. Zwar weisen 8 der 46 untersuchten Schläge in dieser Bodentiefe Luftkapazitäten unter 5 Vol.-% auf, dies beschränkt sich aber vornehmlich auf tonhaltige Böden. Außerdem fällt die Feldgefügeansprache mit einer Ausnahme durchweg positiv aus. Im Krumbasis- und nicht gelockerten Krumbereich sind die Böden

jedoch stärker verdichtet. Hier deuten insbesondere die Feldgefügeansprachen sowie die laboranalytisch gemessenen geringen Luftkapazitätswerte auf schädliche Bodengefügeveränderungen hin. Demnach wird auf 12 Schlägen (Krume) bzw. 17 Schlägen (Krumenbasis) die Luftkapazitätsgrenze von 5 Vol.-% unterschritten. Nach der Feldgefügeansprache werden 5 Schläge (Krume) bzw. 11 Schläge (Krumenbasis) als schadverdichtet eingestuft.

Die Anwendung des Indikatorenmodells ermöglicht grundsätzlich die Identifikation einer Schadverdichtung. Problematisch scheinen die Festsetzung der Schadschwelle auf 5 Vol.-% Luftkapazität für Sandböden und die Schwankungsbreiten der gesättigten Wasserleitfähigkeit zu sein. Des Weiteren ergeben sich offene Fragen, inwieweit im konkreten Fall von einer verdichteten Fläche ausgegangen werden kann. Der Gesamtteil der verdichteten Bodenschicht an der Fläche sowie deren Tiefenlage und Mächtigkeit müssen berücksichtigt werden.

Zur Vermeidung schädlicher Bodenverdichtungen eignet sich das Konzept Schadverdichtungsgefährdungsklassen nicht, da der Parameter Lagerungsdichte nicht die Funktionsfähigkeit der Böden beschreibt. Zusammenhänge der Lagerungsdichte zur Luftkapazität wurden allenfalls für Böden gleicher Entstehung festgestellt. Außerdem wurden Drucksetzungsversuche zur Ableitung der maximalen Belastung an gestörten Proben durchgeführt. Dadurch bleibt der Faktor „Aggregierung“ unberücksichtigt.

Das Konzept Vorbelastung lässt auf lange Sicht einen wirkungsvollen Beitrag zum Schutz des Bodengefüges erwarten. Der Parameter Vorbelastung beschreibt die Druckstabilität der Böden; bei einer Überschreitung dieser muss langfristig mit einer Degradierung und Funktionseinschränkung gerechnet werden. Von einer rechnerischen Ermittlung der Vorbelastung anhand vorhandener Regressionsgleichungen muss jedoch abgeraten werden, da die modellierten Werte unzureichend mit den tatsächlich gemessenen Werten übereinstimmen.

Das Konzept Druckbelastungsquotient eignet sich für Ton- und Sandböden aufgrund der Festsetzung der Luftkapazitätsgrenze auf 5 Vol.-% nicht. Für Schluff- und Lehmböden ist eine Orientierung an der unteren Grenze der Funktionsfähigkeit der Böden als fragwürdig einzustufen. Man bewegt sich mit 5 Vol.-% im absoluten Grenzbereich, was im Widerspruch zu dem generellen Ziel eines Gefahrenabwehrkonzepts steht, das das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung bereits vor dessen Eintritt erkennen soll.

Einen Bewertungsmaßstab für eine gefügeschonende Landbewirtschaftung muss die Bodenbelastbarkeit, charakterisiert durch den Wert der Vorbelastung, mit der eigentlichen Bodenbelastung verknüpfen. Die Auswertung der Drucksetzungsversuche hat gezeigt, dass

die Vorbelastung standortbedingt erheblichen Schwankungen unterworfen ist. Die Werte reichen von 30 kPa im gelockerten Krumbereich bis hin zu äußerst stabilen Unterbodenhorizonten fluviatiler Sande (>500 kPa). Die Unterböden der umfangreich untersuchten Lössböden erreichen bei Feldkapazität Stabilitäten von ca. 100 kPa.

Die landtechnischen Erhebungen zeigen, dass die Gewichte von Schleppern, Ernte- und Transportmaschinen deutlich angestiegen sind. Die Bereifung der Schlepper variiert betriebsindividuell sehr stark, was sich direkt in den berechneten Werten für das Druckfortpflanzungsverhalten niederschlägt.

Durch die Gegenüberstellung der Druckbelastbarkeit mit der mechanischen Belastung können landwirtschaftliche Arbeitsverfahren hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung bewertet werden. Die exemplarisch berechneten Bodendruckspannungen zeigen, dass insbesondere der Einsatz schwerer Erntemaschinen in Abhängigkeit vom Bodenfeuchtegehalt ein Gefährdungspotenzial für die Bodenbereiche unterhalb des Lockerungshorizontes darstellt. Je nach Bereifung ist bei Radlasten oberhalb von 6-10 t bei weichen Schluffböden aus Löss mit einer schleichenden Unterbodenverformung zu rechnen. Gemessene Luftkapazitäten von unter 8 Vol.-% auf nahezu der Hälfte der beprobten Ackerschläge deutet auf diese Entwicklung hin. Die kritischen Radlasten liegen aber deutlich über den nach dem HORNschen Ansatz abgeleiteten Werten von 2,3 t.

Die praxistaugliche Umsetzung eines vorsorgenden Bodenschutzes erfordert noch eine genauere Abschätzung der Vorbelastung. Dabei sind insbesondere die Effekte wechselnder Bodenfeuchten zu berücksichtigen. Bei verbesserten Datenlagen ist jedoch prinzipiell die Herausgabe direkter Handlungsempfehlungen möglich. Langfristig sollte die tatsächliche Bodengefügeentwicklung mit der prognostizierten Entwicklung verglichen werden. Dies erfordert die Durchführung eines flächendeckend angelegten Bodenmonitorings.

8 Literaturverzeichnis

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung.- 5. Auflage, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- ANGERMAYR, W. (1982): Bodenverdichtungen - ein zunehmendes Problem.- DLG Mitteilungen 97 (22), 1282-1283.
- ARVIDSSON, J. & HAKANSSON, I. (1996): Do effect of soil compaction persist after ploughing? Result from 21 long-term field experiments in Sweden.- Soil Tillage Res. 39, 175-197.
- AYRES, K.W., BUTTON, R.G. & DE JONG, F. (1973): Soil morphology and physical soil properties: II Mechanical impedance and moisture-sorption and movement.- Canad. J. Soil Sci. 53, 9-17.
- BALL, B.C., O'SULLIVAN, M.F. & HUNTER, R. (1988): Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage.- J. Soil Sci. 39, 327-339.
- BARNES, K.K., CARLETON, W.M., THROCKMORTON, R.J. & VANDENBERG, G.E. (1971): Compaction of agricultural soils.- ASAE Monograph, St. Joseph, MI, USA.
- BAUMGARTL, TH. (1991): Spannungsverteilung in unterschiedlich texturierten Böden und ihre Bedeutung für die Bodenstabilität.- Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Nr. 12, Universität Kiel.
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17.03.1998.- BGB I, S. 502.
- BESTE, A. (2003): Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden.- Dissertation, Universität Gießen.
- BLACKWELL, P.S. (1979): A method of prediction changes of soil bulk density beneath agricultural wheels.- Dissertation Edinburgh.
- BLACKWELL, P.S., GRAHAM, J.P., ARMSTRONG, J.V., WARD, M.A. HOWSE, K.R., DAWSON, C.J. & BUTLER, A.R. (1986): Compaction of a silt loam soil by wheeled agricultural vehicles.- I. Effects upon soil conditions. Soil Tillage Res. 7, 97-116.
- BLUME, H.-P. (1968): Stauwasserböden.- Arbeiten der Universität Hohenheim (Landwirtschaftliche Hochschule) 42, Ulmer, Stuttgart.
- BLUME, H.-P. (2004): Handbuch des Bodenschutzes.- 3. Auflage, ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg.
- BMVEL (2002): Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Erosion.- Bonn.
- BOGUSLAWSKI, E. (1981): Ackerbau: Grundlagen der Pflanzenproduktion.- DLG-Verlag, Frankfurt.
- BÖTTCHER, B. (1986): Verdichtungsgefährdete, verdichtete und lockerbare Anteile der Ackerflächen in der DDR nach Bezirken.- FZB Müncheberg, Erhebung unveröffentlicht.

- BOHNE, H. (1991): Stabilität des Bodengefüges unter Einfluss der Bodennutzung, Voraussetzungen, Anforderungen, Möglichkeiten.- Berichte über Landwirtschaft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 204, 43-54.
- BOHNE, H. & HARTGE, K.H. (1982): Auswirkungen der Gefügegeometrie auf den Wuchs von Getreidekeimlingen.- Mitt. Deutsch. Bodenkd. Gesellsch. 34, 141-144.
- BOLLING, I. (1984): Bodenverdichtung und Bereifung bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen.- Landtechnik 39, 449-452.
- BOLLING, I. (1986): Beanspruchung des Bodens beim Schlepper und Maschineneinsatz.- In: KTBL-Schrift 308, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.
- BOLLING, I.H. & SÖHNE, W. (1982): Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge.- Landtechnik 2, 54-57.
- BOOLTINK, H.W.G. & BOUMA, J. (1991): Physical and morphological characterization of Bypass Flow in well-structured clay soil.- Soil Sci. Soc Am. J. 55, 1249-1254.
- BOUSSINESQ, J. (1885): Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques.- Gauthiers-Villars, Paris.
- BRANDHUBER, R., SCHÄFER-LANDEFELD, L., KOCH, H.-J. & STOCKFISCH, N. (2001): Sind heute übliche Fahrzeugmassen bei Rübenernte und Gülleausbringung mit den Zielen vorsorgenden Bodenschutzes vereinbar? Ergebnisse eines Forschungsprojektes.- Mitt. Deutsch. Bodenkd. Gesellsch., 96 (2), 711-712.
- BUNDESMINISTER DES INNERN (1985): Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung.- Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 229 S.
- CASAGRANDE, A. (1936): The determination of pre-consolidation load and its practical significance.- Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Cambridge, Mass 3, 60.
- CZERATZKI, W. (1972): Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand.- Landbauforschung Völkenrode 22, 29-36.
- DANNOWSKI, N. (1992): Das Penetrationsvermögen von Wurzeln unterschiedlicher Roggen- und Triticale-Genotypen in Abhängigkeit von der Bodenlagerungsdichte.- J. Agr. and Crop Sci. 168, 169-180.
- DAWIDOWSKI, J.B. & KOOLEN, A.J. (1987): Changes of soil water suction, conductivity and dry strength during deformation of wet undisturbed samples.- Soil Tillage Res. 9, 169-180.
- DELMHORST, B. (1990): Bodenschutz - eine politische Aufgabe.- In: SCHLIEPHAKE (1990): Produktionsfaktor Umwelt.- Landwirtschafts-Verlag, Münster-Hiltrup.
- DEXTER, A.R. (1986): Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled see-bed and a compacted sub-soil.- I. Effects of seed-bed-aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. Plant and soil 95, 123-133.
- DEXTER, A.R. (1988): Advances in characterization of soil structure.- Soil Tillage Res. 11, 199-238.

- DIEZ, T. & WEIGELT, H. (1997): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau.- Sonderdruck dlz agrarmagazin, München, 2. geänderte Auflage.
- DIN 18136 (1996): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben – Einaxialer Druckversuch. – 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 19682-10 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Felduntersuchungen - Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges.- Deutsches Institut für Normung. Beuth, Berlin.
- DIN ISO 11508 (1998): Bestimmung der Kornrohddichte.- Deutsches Institut für Normung. Beuth, Berlin.
- DIN V 19688 (2000): Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden.- Deutsches Institut für Normung, DIN-Entwurf 19688. Beuth, Berlin.
- DINTER, W. (1999): Naturräumliche Gliederung.- In: LÖBF NRW, Rote Liste der gefährdeten Pflanzen und Tiere in NRW, 3. Fassung, Schriftenreihe 17, 29-36, Recklinghausen.
- DISERENS, E. & SPIESS, E. (2004): Wechselwirkung zwischen Fahrwerk und Ackerboden. TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung.- FAT-Berichte 613, Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.
- DUMBECK, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden.- Dissertation, Universität Gießen.
- DUMBECK, G. & HARRACH, T. (1985): Porenverteilung bei Bodenverdichtungen.- Mitt. Deutsch. Bodenk. Gesellsch. 43 (I), 213-218.
- DÜRR, H.J., PETELKAU, H. & SOMMER, C. (1995): Literaturstudie Bodenverdichtung.- Texte Umweltbundesamt 55/95, Berlin.
- DVWK (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 1: Mechanische Belastbarkeit.- DVWK-Merkblatt 234, ATV-DVWK, Bonn.
- DVWK (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 2: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten.- ATV-DVWK Merkblatt 235, ATV-DVWK, Bonn.
- DVWK (1999): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung. Teil II: Ableitungen zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden.- DVWK-Regeln 136, ATV-DVWK, Bonn.
- DVWK (2002): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung.- ATV-DVWK-Merkblatt 901, ATV-DVWK, Bonn.
- DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie.- 3. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin.

- ECKERT, H., BREITSCHUH, G. & SAUERBECK, D. (1999): Kriterien umweltverträglicher Landwirtschaft - ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben.- *Agrobiol. Res.* 52, 57-76.
- EDWARDS, W.M., SHIPTALO, M.J. & OWENS, L.B. (1993): Gas, water and solute transport in soils containing macropores: a review of methodology.- *Geoderma* 57, 31-49.
- EGGELSMANN, R. (1981): Dränanleitung.- 2. Auflage. Parey, Berlin-Hamburg.
- EHLERS, W. (1983): Bodenphysikalische Forschung in der Bundesrepublik Deutschland.- *Mitt. Deutsch. Bodenk. Gesellsch.* 38, 5-28.
- EHLERS, W. (1992): Bodenverdichtung senkt Rübenertrag.- *Zuckerrübe*, 41 (5), 268-274.
- EHLERS, W., KÖPKE, U., HESS, F. & BÖHM, W. (1983): Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil.- *Soil Tillage Res.* 3, 261-275
- EHLERS, W. & CLAUPEIN, W. (1994): Approaches toward conservation tillage in Germany.- In: *Conservation tillage in temperate agroecosystems.*- Lewis Publishers, Boca Raton, Ann Arbor, London Tokyo.
- EHLERS, W., WERNER, D. & MÄHNER, T. (2000): Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen.- *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 321-333.
- EIJKELKAMP (1983): The Air Permeameter, for determining the air permeability of undisturbed soil samples.- *Eijkelkamp Agrisearch Equipment*, Giesbeek, The Netherlands.
- ESTLER, M. (1995): Den Boden schonend bearbeiten.- *Rheinische Monatsschrift* 83 (9), 555-556.
- FLÜHLER, H. (1972): Sauerstofftransport im Boden.- *Dissertation ETH Zürich*.
- FLÜHLER, H. (1973): Sauerstoffdiffusion im Boden.- *Mitteilgn. schweiz. Anst. forstl. Versuchswesen* 49, 125-250.
- FREDE, H.-G. (1986): Der Gasaustausch des Bodens.- *Habilitationsschrift Universität Göttingen*.
- FREDE, H.-G. (1991): Gefügebildende Wirkungen natürlicher Kräfte auf schluffreichen Böden.- In: *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Band 2: Bodengefüge*.
- FRIEDRICH, G. & FRANKEN, H. (2003): Landwirtschaft und Hochwasserschutz - Vorsorgender Hochwasserschutz durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen.- *Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL 108*, 104 Seiten.
- FRIELINGHAUS, M., PETELKAU, H. & SCHMIDT, R. (1992): Wassererosion im norddeutschen Jungmöränengebiet.- *Z. f. Kulturentw. u. Landentw.* 33, 22-33.
- FRÖHLICH, O.K. (1934): *Druckverteilung im Baugrund.*- Springer Verlag, Wien.
- FUCHS, E. (1974): *Baugrund und Bodenmechanik.*- VEB Verlag Berlin.
- GÄTKE, C.R. (1989): Zum Einfluss des Bodenwassergehaltes auf die pneumatische Leitfähigkeit eines Sandbodens.- *Arch. Acker- Pflanzenbau u. Bodenkunde* 33, 437-443.

- GEOLOGISCHER DIENST (2004): Anteil der Bodenarten in NRW.- Auswertung von 52 von insgesamt 72 Blättern der BK 1:50000, mündliche Mitteilung, Krefeld.
- GÖBRING, J. (1947): Die Grundlagen der Gare im praktischen Ackerbau.- Landbuch-Verlag, Hannover.
- GRÖGER, E. (1921): Der Dampfflug und seine wirtschaftliche und soziale Bedeutung unter besonderer Berücksichtigung des Lohnflugbetriebes in Schlesien.- Dissertation, Universität Greifswald.
- GUERIF, J. (1994): Effects of compaction on Soil Strength Parameters.- In: SOANE, B.D. & C. VAN OUWERKERK (1994): Soil compaction in crop production.- Elsevier, Amsterdam.
- GUPTA, S.C. & LARSON, W.E. (1982): Modelling soil mechanical behaviour during tillage. Symposium on predicting tillage effects on soil physical properties and process.- Amer. Soc. of Agron. Spec. Publ. 44, Madison, 151-178.
- GUPTA, S.C., SHARMA, P.S. & FRANCHI, S.A. (1989): Compaction effects on soil structure.- Advances in Agronomy 42, 311-338.
- HAKANSSOM, I., VOORHEES, W.B., ELONEN, P., RAGHAVAN, G.S.V., LOWERY, B., VAN WIJK, A.L.M., RASMUSSEN, K. & RILEY, H. (1987): Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing.- Soil Tillage Res. 10, 259-268.
- HARRACH, T. (1981): Das System Boden.- In: BOGUSLAWSKI, E. (1981): Ackerbau: Grundlagen der Pflanzenproduktion.- DLG-Verlag, Frankfurt.
- HARRACH, T. (1984): Lockerungsbedürftige Böden einfach und sicher erkennen.- In: Bodenfruchtbarkeit in Gefahr?- Arbeiten der DLG 179, DLG-Verlag, Frankfurt.
- HARTGE, K.H. (1966): Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben.- Z. Kulturtechnik u. Flurber. 7, 155-163.
- HARTGE, K.H. (1968): Luftpermeabilität verschiedenerer Porenbereiche.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 117 (2), 97-107.
- HARTGE, K.H. (1994): Soil structure, its development and its implications for properties and processes in soils - a synopsis based on recent research in germany.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 157, 159-164.
- HARTGE, K.H. & BOHNE, H. (1985): Ziele und Mittel der bodenphysikalischen Untersuchung von Kulturflächen.- VDLUFA-Schriftenreihe 16, Kongressband.
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik.- Enke Verlag, Stuttgart.
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden.- Enke Verlag, Stuttgart.
- HELAL, H.M., MÜLLER, A. & SAUERBECK, D. (1994): Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf die Wurzelfunktionen und den Nährstoffhaushalt.- In: Bodenverdichtung und Pflanzenertrag - ein Konzept für bodenschonendes Befahren.- Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 147, Braunschweig.

- HENNINGS, V. (2001): Vergleichende Bewertung bestehender Pedotransferfunktionen zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden.- Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.): Arbeitshefte Boden 3, 5-22.
- HORN, R. (1976): Festigkeitsänderungen infolge von Aggregierungsprozessen eines mesozoischen Tones.- Dissertation Universität Hannover.
- HORN, R. (1980): Die Ermittlung der vertikalen Druckfortpflanzung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen.- Z. Kulturtechnik u. Flurber. 21, 343-349.
- HORN, R. (1981): Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrößen.- Schriftenreihe FB 14, TU Berlin, 10, 200 S.
- HORN, R. (1984): Die Vorhersage des Eindringwiderstandes von Böden anhand von multiplen Regressionsanalysen.- Z. Kulturtechnik u. Flurber. 25, 377-380.
- HORN, R. (1986): Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die Belastbarkeit von Ackerböden.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 149, 9-18.
- HORN, R. (1988): Compressibility of Arable Land.- In: DRESCHER, J., HORN, R., DE BOODT, M. (1988): Impact of water and external forces on soil structure.- Catena Supplement 11, 27-47.
- HORN, R. (1991): Unterbodenverdichtung - gibt es gesicherte Hinweise auf nachhaltige Ertragseinbußen?- Wasser & Boden 51 (12), 15-18.
- HORN, R. (2002): Die Verformung von Böden - Ursachen und Folgen für eine nachhaltige Landnutzung.- Tagungsband der 14. Wissenschaftlichen Fachtagung: Schadverdichtung in Ackerböden, 5. Dezember 2001, Bonn.
- HORN, R. (2004): Bearbeitung und Verdichtung von Böden.- In: BLUME (2004): Handbuch des Bodenschutzes.- 3. Auflage, ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg.
- HORN, R., LEBERT, M. & BURGER, N. (1991): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ Messungen.- Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien 73: Mechanische Belastbarkeit von Böden Bayerns.
- HORN, R. & LEBERT, M. (1994): Soil Compactibility and Compressibility.- In: SOANE, B.D. & C. VAN OUWERKERK (1994): Soil compaction in crop production.- 45-69, Elsevier, Amsterdam.
- HORN, R., TAUBNER, H., WUTTKE, M. & BAUMGARTL, TH. (1994): Soil physical properties related to soil structure.- Soil Tillage Res. 30, 187-216.
- HORN, R., KÜHNER, S. & WIERMANN, C. (1997): Was leisten Bodenbewirtschaftungsverfahren in Lehm Böden für die Bodenstabilität?- Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 178, 43-52.
- HORN, R., VAN DEN AKKER, J.J.H. & ARVIDSSON, J. (2000): Subsoil Compaction - Distribution, Processes and Consequences.- Advances in Geology 32, Catena-Verlag, Reiskirchen.
- HORN, R., SIMOTA, C., FLEIGE, H., DEXTER, A. & RAJKAI, K. (2001): Möglichkeit zur Prognose der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden.- Wasser und Boden 53 (9), 9-12.

- 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.
- IMA (1991): Information, Medien, Agrar e.V., Bonn.
- ISENSEE, E. & SONDERHOFF, W. (1985): Terra-Reifen und Bodendruck.- Landtechnik 40 (9), 384-387.
- ISENSEE, E. & WEISSBACH, M. (2001): Bodenschonung mit moderner Technik - Grundlagen und Empfehlungen.- DLG-Arbeitsunterlage B/2001.
- JAGGARD, K. (1984): Pre drilling land work and yieldloss.- Brit. Sug. Beet. Rev. 52 (2), 9-10.
- KAISER, E.-A. (1992): Auswirkungen von Bodenverdichtungen durch landwirtschaftliche Bodennutzung auf die mikrobielle Biomasse.- Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 134 Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig.
- KÉZDI, A. (1969): Handbuch der Bodenmechanik.- Verlag für Bauwesen, Berlin.
- KIRBY, J.M. (1991): Critical state soil mechanics parameters and their variation for vertisols in eastern Austria.- J. Soil Sci. 42, 487-499.
- KMOCH, H.G. (1962): Die Luftdurchlässigkeit des Bodens.- Habilitation Universität Bonn.
- KMOCH, H.G. & HANUS, H. (1965): Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft.- Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenkd. 111, 1-10.
- KNITTEL, H. & STANZEL, H. (1976): Untersuchungen des Bodengefüges mit Penetrometer und Rammsonde.- Z. für Acker -Pflanzenbau 142, 181-193.
- KÖGLER, F. (1933): Baugrundprüfung im Bohrloch.- Der Bauingenieur 8. 266-270.
- KÖHN, M. (1928): Landwirtschaftliches Jahrbuch.- 67, 485, Berlin.
- KRAHMER, U. (1997): Penetrometermessungen auf rekultivierten Böden.- Scriptum Arbeitsergebnisse, Heft 2, Geologisches Landesamt NRW, 41-50.
- KRÜCK, St., NITZSCHE, O., SCHMIDT, W. & UHLIG, U. (2001): Einfluss der Bodenbearbeitung auf Bodenleben und Bodenstruktur.- Mitt. Deutsch. Bodenkd. Gesellsch. 96, 747-748.
- KRUPP, G. (1988): Rationeller Einsatz von Traktoren für schwere Feldarbeiten.- VEB, Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin.
- KTBL (1986): Bodenverdichtungen.- Schrift 308, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.
- KTBL (1995): Bodenverdichtungen.- Schrift 362, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.
- KÜHNER, S. (1998): Bodenverdichtung - Grundlage für einen nachhaltige Landbewirtschaftung aus bodenkundlicher Sicht.- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Heft 4/1998, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- LARSON, W.E., BLAKE, G.R., ALLMARAS, R.R., VORHEES, W.B. & GUPTA, S.C. (1989): Mechanics and related processes in structured agricultural soils.- NATO ASI-Series, E: Applied Sciences (172).

- LARSON, W.E., GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. (1980): Compression of agricultural soils from eight soil orders.- *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 450-457.
- LEBERT, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden.- *Bayreuther Bodenkundl. Berichte* 12, Universität Bayreuth.
- LEBERT, M., BRUNOTTE, J. & SOMMER, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr.- *UBA Texte* 46/04. Berlin.
- LINDNER, H., KUNZE, A. & SCHWARZ, K. (1974): Stand und Entwicklung der bodenkundlichen Forschung auf den Gebieten Bodenphysik, Bodenbearbeitung, und Bodenmelioration sowie die Nutzung ihrer Ergebnisse in der DDR.- *Arch. Acker- Pflanzenbau u. Bodenkunde* 18, 669-679.
- LOGSDON, S.D., ALLMARAS, R.R., NELSON, W.W. & VORHEES, W.B. (1992): Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads.- *Soil Tillage Res.* 23, 95-110.
- LÜTKE ENTRUP, N. & OEHMICHEN, J. (2000): Lehrbuch des Pflanzenbaus.- Band 1: Grundlagen. Th. Mann Verlag, Gelsenkirchen.
- LÜTKE ENTRUP, N. & BECK, J. (2005): Einschätzung der Verdichtungsgefährdung für einen nordrhein-westfälischen Marktfruchtbetrieb nach dem Modell DBQ (PAUL, R.) nach KUL (ECKERT, H., BREITSCHUH, G. & SAUERBECK, D.). Projekt: Entwicklung eines einzelbetrieblichen Managementsystems für Nordrhein-Westfalen.- Fachhochschule Südwestfalen, Agrarwirtschaft, Soest.
- LÜTKE ENTRUP, N., KIVELITZ, H. & ISING, W. (2005): Projekt: Bodenbewirtschaftung in Leitbetrieben.- Fachhochschule Südwestfalen, Agrarwirtschaft, Soest.
- MAAS, G. (1993): Zum Anbau von Luzerne, Steinklee und Kulturmalve auf jungen rekultivierten Böden im Rheinischen Braunkohlerevier.- *Dissertation*, Universität Bonn.
- MAIDL, F.X. & FISCHBECK, G. (1985): Wenn dem Boden die Luft ausgeht.- *DLG-Mitteilungen* 23, 1354-1356.
- MATHY, W. (1940): Einfluss von Untergrundverdichtungen auf die Wasser- und Luftbewegung im Boden. *Dissertation* Universität, Halle-Wittenberg.
- McBRIDE, R.Q. & JOSSE, P.J. (1996): Overconsolidation in agricultural soils: I. Pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress.- *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 73-380.
- MEYNEN, E., SCHMITTHÜSEN, J., GELLERT, J., NEEF, E., MÜLLER-MINY, H. & SCHULTZE, J.H. (1962): *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*.- Bundesanstalt für Landesordnung und Raumordnung, Selbstverlag, Bad Godesberg.
- MOHR, H.D. (1980): Einfluss von Bodeneigenschaften auf das Wurzelwachstum.- *Kali-Briefe* 15 305-316.
- MUNLV (1989): *Klimaatlas von Nordrhein-Westfalen*.- Düsseldorf.
- NEWMARK, N.M. (1942): Influence charts for computation of stress in elastic foundations.- *Eng. Exp. Stat. Bull. Series No. 338*, University of Illinois Bull. 40 (2), Urbana.

- NISSEN, B. (1999): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland - bodenphysikalischer Ansatz.- Schriftenreihe Inst. Pflanzen-ernähr. u. Bodenk., Universität Kiel 50, 159 S.
- OADES, J.M. (1984): Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management.- *Plant & Soil* 76, 319-337.
- OLDEMAN, L.R., HAKKELING, T.A. & SOMBROEK, W.G. (1991): World map of the status of human-induced soil degradation and explanatory note.- Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD), ISRIC, Wageningen, The Netherlands.
- OLFE, G. (1995): Zur Bodenbelastung durch den Schlepper- und Maschineneinsatz in der pflanzlichen Produktion.- *KTBL-Schrift* 362, KTBL, Darmstadt, 12-28.
- PAUL, R. (1990): Korrelative Beziehungen zwischen Makrogasdiffusion und anderen Bodenparametern.- *Acker- Pflanzenbau u. Bodenkunde* 34, 5-12.
- PAUL, R. (2004): Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbaulich genutzten Böden.- Zwischenbericht 46.02., Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt.
- PAUL, R. & Werner, D. (1986): Abhängigkeit der Makrogasdiffusion von der Bodenstruktur.- *Arch. Acker- Pflanzenbau u. Bodenkunde* 30, 681-687.
- PETELKAU, H. (1984): Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sowie Maßnahmen zu ihrer Minderung.- *Tagungsbericht* 227, 25-34, Akademie Landwirtschaftswiss. DDR, Berlin.
- PETELKAU, H. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtungen.- *Bodenbearbeitung und Bodenschutz*, KTBL- Arbeitspapier 266, 56-79.
- PETELKAU, H. & KUNZE, A. (1980): Die Lagerungsdichte des Bodens als wesentliche Steuerungsgröße für die Bodenbearbeitung.- *Wiss. Beiträge*, Universität Halle-Wittenberg 14, 35-65.
- PETELKAU, H. & SEIDEL, K. (1981): Über das Verdichtungsverhalten sandiger Böden auf D-Standorten.- *Feldwirtschaft* 1, 5-8.
- PETELKAU, H., SEIDEL, K., GÄTKE, Cl.-R. & DANNOWSKI, M. (1988): Prinziplösung für die Steuerung der Grundbodenbearbeitung.- *FZB-Report* Müncheberg, 86-93.
- PETELKAU, H. & ROGASIK, H. (1994): Schadverdichtungen der Moränenböden - eine akute Gefahr?- *Zuckerrübe* 43 (2), 144-147.
- PETELKAU, H., SEIDEL, K. & FRIELINGHAUS, M. (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.- *ZALF* Müncheberg, 145 S.
- PFEFFER, W. (1893): Druck- und Arbeitsleistung durch wachsende Pflanzen. *Abhandlung d. Kgl. Sächs. Gesell. d. Wiss.*, 20/3, Hirzel, Leipzig, 242 S.
- PROFI (2003): Landmaschinen- und Schlepperkatalog 2003.- CD-ROM, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster.

- QUASEM, H., ATTINGER, W., BERLI, M. & SCHULIN, R. (2000): Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf der Trasse der Transitgasleitung Däniken – Grimsel (TRG 2) und Rodersdorf – Losttorf (TRG 3).- Institut für Terrestrische Ökologie, ETH Zürich.
- RENGER, M. (1974): Bodenkundliche Kriterien für die Auswahl von Verfahren der Tiefenbearbeitung auf melorationsbedürftigen Standorten.- Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 24, 1-14.
- ROWELL, D. L. (1997): Bodenkunde.- Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York
- RÜHLING, W. (1992): Bodenverdichtungen durch den Schleppereinsatz.- Gemüse 28 (2), 61-64.
- RUHM, E. (1983): Schlechte Vorraussetzung für eine gute Ernte.- Hannover. Land- und forstw. Zeitung 136, 3-4.
- RUSSEL, M.B. & RICHARDS, L.A. (1938): The determination of soil moisture energy relations by centrifugation.- Soil Sci. Soc. Am. J. 3, 65-68.
- SALIRE, E.V., HAMMEL, J.E. & HARDCASTLE, J.H. (1994): Compression of intact subsoil under short-duration loading.- Soil Tillage Res. 31, 235-248.
- SARMAH, A.K., PILLAI-MCGARRY, U. & MCGARRY, D. (1996): Repair of the structure of a compacted Vertisol via wet/dry cycles.- Soil Tillage Res. 38, 17-33.
- SCHÄFER-LANDEFELD, L. & BRANDHUBER, R. (2001): Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Vorbelastung von Böden - ein tragfähiges Konzept?- Bodenschutz 6 (2), 48-52.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde.- 14. Auflage, F. Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P. & STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum.- 2. Auflage, Blackwell Verlag, Wien.
- SCHMIDT, W., NITZSCHE, O., STAHL H. & MARSHALL, K. (2004): Umsetzung des Bodenschutzes - Erfahrungen aus Sachsen.- In: Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung - Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung, UBA Texte 35/04. Berlin.
- SCHNEIDER, R. (1994): Gefügeentwicklung in Neulandböden aus Löß und Hafenschlick und deren Auswirkungen auf bodenphysikalische und -mechanische Parameter.- Berichte aus der Geowissenschaft, Shaker Aachen, 210 S.
- SCHÖN, H.-G. (2004): Persönliche Mitteilung.- Fachhochschule Osnabrück.
- SCHÖN, H. & OLFE, G. (1986): Bodenbelastung durch Schlepper- und Maschineneinsatz in der Landwirtschaft.- KTBL-Schrift 308, 35-48.
- SCHREY, H.P. (1991): Die Interpretation des Eindringwiderstandes zur flächenhaften Darstellung physikalischer Unterschiede in Böden.- Z. Pflanzenernäh. Bodenk. 154, 33-39.
- SCHRÖDER, D. & SCHNEIDER, R. (2004): Beurteilung und Vermeidung von anthropogenen Boden(schad)verdichtungen.- Berichte über Landwirtschaft 82 (2), 173-187.

- SCHULZE LAMMERS, P., TSCHEPE, M. & STRÄTZ, J. (2002): Bodenbelastung durch Rad- und Achslasten von Landmaschinen in der Zuckerrübenerte. - Tagungsband der 14. Wissenschaftlichen Fachtagung: Schadverdichtung in Ackerböden, 5. Dezember 2001, Bonn.
- SCHWAB, P. & WEISSKOPF, P. (1988): Bodenverdichtungen - Ursachen und Gegenmaßnahmen.- Schweizer-Landtechnik 50 (6), 26-34.
- SCHWARK, A. (2005): Bewirtschaftung und Status von Ackerböden in Schleswig-Holstein.- Dissertation, Universität Kiel.
- SCHWARK, A. & ISENSEE, E. (2004): Die Radlasten begrenzen?- DLG-Mitteilungen 7, 64-65.
- SEMMELE, H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden.- Schriftenreihe Inst. Pflanzenernähr. u. Bodenk., Universität Kiel 26, 183 S.
- SEMMELE, H. & HORN, R. (1995): Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentypischen und maschinenspezifischen Grenzwerten.- Bodenverdichtung, KTBL-Schrift 362, 61-92.
- SOANE, B.D. (1983): Compaction by agricultural vehicles: a review.- Scottish Institute of Agricultural Engineering, Tech. Rep. 5, 92 S.
- SOANE, B.D. & VAN OUWERKERK, C. (1994): Soil compaction in crop production.- Elsevier, Amsterdam.
- SÖHNE, W. (1951): Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung.- Grndl. d. Landtechnik 9, 87-94.
- SÖHNE, W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen.- Grndl. d. Landtechnik 5, 49-63.
- SÖHNE, W. (1958): Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres.- Agric. Eng. 39, 272-281, 290.
- SOMMER, C. (1985): Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung.- Landtechnik 40 (9), 378-384.
- SOMMER, C. (1998a): Konservierende Bodenbearbeitung - ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme.- Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 191, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig.
- SOMMER, C. (1998b): Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion.- Bodenschutz 1, 12-16.
- SOMMER, C., STOINEV, K. & ALTEMÜLLER, H.-J. (1972): Das Verhalten vier verschiedener Modellböden unter vertikaler Belastung.- Landbauforschung Völkenrode, 22 Jg., 1, 45-56.
- SOMMER, C. & ZACH, M. (1986): Bodenverdichtungen und deren Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung und den Ertrag.- KTBL-Schrift 308, 35-48.
- SOMMER, C., DÜRR, H.J. & ZACH, M. (1995): Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf den Pflanzenertrag und Schlussfolgerungen aus der Sicht des Bodenschutzes.- KTBL-Schrift 362, 176-188.

- SOMMER, C., BRUNOTTE, J. & ORTMEIER, B. (2001): Bodenverdichtung - Felduntersuchungen zu Lösungsansätzen.- Zuckerrübe 50 (6), 364-371.
- SOMMER, C., BRUNOTTE, J. & KLOEPFER, F. (2002): Gute fachliche Praxis zur Vermeidung von Schädigungen des Bodens.- In: Gute fachliche Praxis – welchen Beitrag leistet die Verfahrenstechnik. KTBL-Schrift 400, Darmstadt, 69-81.
- SONDERHOFF, W. (1988): Messung zum Status der Bodenverdichtung und Bedeutung von Mechanisierungsverfahren.- Dissertation, Universität Kiel.
- SPSS (2004): Statistical Package for the Social Sciences.- Version 12.0.
- STAHL, H., SCHMIDT, W. & GIERKE, U. (2002): Beratung zur guten fachlichen Praxis zum Schutz des Bodengefüges - Ansätze, Strategien, offene Fragen.- Tagungsband der 14. Wissenschaftlichen Fachtagung: Schadverdichtung in Ackerböden, 5. Dezember 2001, Bonn.
- STEINKAMPF, H. (1983): Übersicht über die Entwicklung der Ackerschlepperreifen.- In: VDI: 25 Jahre VDI-Fachgruppe Landtechnik, 33-42, Düsseldorf.
- STEMANN, G. (2005): mündliche Mitteilung.- Versuchgut Merklingsen, Fachhochschule Südwestfalen, Agrarwirtschaft, Soest.
- TAYLOR, H.M. (1942): Research on consolidation of clays.- Mass. Inst. of Techn. Dep. of Civ. and Sanit. Engg., Serial No. 82.
- TAYLOR, H.M. (1974): Root behaviour as affected by soil structure and strength.- CARSON, E.W. (1974): The plant root and its environment. Proceedings institute on the plant root and its environment, Virginia.
- TENHOLTERN, R. (2000): Bodengefüge, Durchwurzelung und Ertrag als Indikatoren für Lockerungsbedürftigkeit und Lockerungserfolg auf rekultivierten Standorten im rheinischen Braunkohlenrevier.- Boden und Landschaft 28, Universität Gießen.
- THIERE, J., ALTERMANN, M., LIEBERROTH, I. & RAU, D. (1991): Zur Beurteilung landwirtschaftlicher Nutzflächen nach technologisch wirksamen Standortbedingungen.- Arch. Ackerpflanzbau u. Bodenkunde, Berlin 35, 171-183.
- TITJE, O. & TAPKENHINRICHS, M. (1993): Evaluation of pedotransfer functions.- Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 1088-1095.
- TOBIAS, S. (2001): Transferfunktionen.- Unterlagen zur Vorlesung Landnutzung, Landentwicklung II (86-426) Geomatikingenieurwissenschaften, ETH Zürich.
- UGT (1999): Kennzeichnung des Porensystems im Strömungsversuch.- Schriftliche Mitteilung Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg.
- VAN DEN AKKER, J.J.H., ARVIDSON, J. & HORN, R. (1999): Experience with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community.- Proceedings of the first workshop of the concerted Action "Experience with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction", 28-30 Mai 1998, Report 168, Wageningen Niederlande.
- VAN DER PLOEG, R.R., GIESKA, M. & SCHWEIGERT, P. (2001): Landschaftshydrologische und hochwasserrelevante Aspekte der ackerbaulichen Bodenbewirtschaftung in der deutschen Nachkriegszeit.- Berichte über Landwirtschaft 79 (3), 447-465.

- VOLK, L. (2004): Der richtige Luftdruck spart Diesel.- Landwirtschaft ohne Pflug 6, 15-21.
- VOORHEES, W.B. (1978): Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern corn belt.- Soil Sci. Soc. Am. J. 42, 344-349.
- VOORHEES, W.B. & LINDSTROM, M.J. (1984): Long-Term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction.- Soil Sci. Soc. Am. J. 48, 152-156.
- VORDERBRÜGGE, TH. (2004): Vorschlag zur Ableitung von Bodenwerten für die Beurteilung von Bodenschadverdichtungen gemäß den Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes.- Bodenschutz 2, 44-53.
- WELS, H.-J. (2005): Mündliche Mitteilung. Fachhochschule Südwestfalen, Agrarwirtschaft, Soest.
- WERNER, D. & UNGER, H. (1977): Zur Meliorationsbedürftigkeit verdichteter Löß- und Lehmböden.- Arch. Acker- Pflanzenbau u. Bodenkunde 33, 729-739.
- WERNER, D. & PITTELKOW, U. (1979): Zur Entwicklung von Unterböden nach Gefügemelioration.- Arch. Acker- Pflanzenbau u. Bodenkunde 23, 721-732.
- WERNER, D. & PAUL, R. (1999): Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden.- Wasser und Boden 51(12), 10-14.
- WEYER, TH. (2003): Persönliche Mitteilung.- Fachhochschule Südwestfalen, Agrarwirtschaft, Soest.
- WEYER, TH. (2004): Bodenschadverdichtungen vermeiden.- Bodenschutz 2, 33.
- WEYER, TH. & BUCHNER, W. (1998): Den Wurzeln Bahn schaffen.- LZ 5, 23-24.
- WEYER, TH. & BUCHNER, W. (2001): Bodenschadverdichtungen- Ausmaß, Ursachen, Wirkungen und Lösungsansätze.- Tagungsband der Fachtagung „Bodenbewirtschaftung im Umbruch“, Fachhochschule Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft Soest, 9-31.
- WIERMANN, C. (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Stabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte.- Schriftenreihe Inst. Pflanzenernähr. u. Bodenkd., Universität Kiel 45, 191 S.
- WITTELL, L.E. & HOBBS, J.A. (1965): Soil compaction effects on field plant growth.- Agron. J. 57, 534-537.
- XU, X., NIEBER, J.L. & GUPTA, S.C. (1992): Compaction effects on the gas diffusion coefficient in soils.- Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1743-1750.
- ZAKOSEK, H. (1960): Abhandlungen Hess. Landesamt f. Bodenforschung, 32, Wiesbaden.

A1: Standortbeschreibung und bodenkundliche Profilaufnahme**Betrieb 1**

Lage: östliches Münsterland TK 50: L 3912 (Lengerich)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 55 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 740 mm; 9° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3423.234 H 5767.233
 Grube 2: R 3423.113 H 5767.232

Bodentyp: Plaggenesch
 Ausgangssubstrat: humoser Sand über Sand der Niederterrasse
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 200 cm unter GOF; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Leguminosen)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krumenlockerung ca. 25 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verleibt (jährlich), Zwischenfrucht (ca. alle 5 Jahre), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-35	Su3	h4	5,0	c1
E ₁	35-43	Su2	h3	4,6	c1
E ₂	43-85	Su2	h2	5,1	c1
IIcV	85+	Ss	h1	5,4	c1

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3423.177 H 5767.242
 Grube 2: R 3423.196 H 5767.240

Bodentyp: Plaggenesch
 Ausgangssubstrat: humoser Sand über Sand der Niederterrasse
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 200 cm unter GOF; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Leguminosen)
 Bodenbearbeitung: konservierend, Krumenlockerung ca. 25 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (jährlich), Zwischenfrucht (ca. alle 5 Jahre), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-37	Su2	h4	5,0	c1
E	37-80	Sl2	h2	5,1	c1
IIcV	80+	Ss	h1	6,5	c1

Betrieb 2

Lage: westliches Münsterland TK 50: L 4108 (Coesfeld)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 70 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 840 mm; 9° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2583.114 H 5749.634
 Grube 2: R 2583.120 H 5749.615

Bodentyp: Podsol
 Ausgangssubstrat: Flugsand
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Mais/Kartoffel)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 30 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (alle 4 Jahre), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-34	Sl2	h3	5,2	c1
Bhs	34-50	St2	h2	4,9	c1
Bs	50-75	Ss	h1	4,8	c1
IIcV	75+	Ss	h1	4,2	c1

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2582.066 H 5749.206
 Grube 2: R 2582.087 H 5749.182

Bodentyp: Nassgley
 Ausgangssubstrat: Sand der Niederterrasse/Schmelzwassersand
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 36 cm unter GOF; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Mais/Raps)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 30 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (alle 4 Jahre), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Go-Ap	0-36	Su2	h4	5,8	c1
IIGr	36+	Ss	h1	5,7	c2

Betrieb 3

Lage: westliches Münsterland TK 50: L 4108 (Coesfeld)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 73 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 840 mm; 9° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2575.828 H 5753.782
 Grube 2: R 2575.843 H 5753.773

Bodentyp: Plaggenesch über Gley-Podsol
 Ausgangssubstrat: humoser Sand über Flugsand/Sand der Niederterrasse darunter Sand der Oberkreide
 Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; schwache Staunässe
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Mais)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 30 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (ca. alle 8 Jahre), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Su2	h4	5,3	c1
E	30-65	Sl2	h4	4,4	c1
B(h)s	65-92	Sl2	h2	5,0	c1
IIGor	92+	Sl4	h1	3,9	c1

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2575.954 H 5753.167
 Grube 2: R 2575.960 H 5753.137

Bodentyp: Gley-Podsol
 Ausgangssubstrat: Flugsand z.T. Sand der Niederterrasse/Schmelzwassersand
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 70 cm unter GOF; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Mais)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 34 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (ca. alle 8 Jahre), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-38	Sl2	h3	5,3	c1
Ae-Bsh	38-68	Sl2	h3	5,2	c1
IIGro	68-165	Ss	h1	5,4	c1
IIGr	165+	Ss	h1	5,3	c1

Betrieb 4

Lage: westliches Münsterland TK 50: L 4106 (Borken)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 35 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 850 mm; 9° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2550.083 H 5744.206
 Grube 2: R 2550.017 H 5744.238

Bodentyp: Gley-Podsol
 Ausgangssubstrat: Flugsand, teilweise Schmelzwassersand
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 70 cm unter GOF; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Mais/Zuckerrüben)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krumenlockerung ca. 20 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (jährlich), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Su2	h3	6,0	c1
Bhs	30-55	Su2	h2	6,3	c1
IIGo	55-70	Ss	h1	5,8	c1
IIGor	70+	Ss	h1	5,3	c1

Betrieb 5

Lage: südliches Ostmünsterland TK 50: L 4116 (Gütersloh)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 77 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 750 mm; 9° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3459.755 H 5744.981
 Grube 2: R 3459.750 H 5745.051

Bodentyp: Nassgley
 Ausgangssubstrat: Sand der Niederterrasse
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 35 cm unter GOF; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Mais)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 32 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (alle 3 Jahre), Rindergülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Go-Ap	0-33	Su2	h3	5,8	c1
IIGro	33-50	Ss	h1	6,4	c1
IIGr	50+	Ss	h1	6,1	c1

Betrieb 6

Lage: östliches Münsterland TK 50: L 4114 (Rheda-Wiedenbrück)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 66 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 750 mm; 9° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3450.505 H 5756.101
 Grube 2: R 3450.490 H 5756.151

Bodentyp: Gley-Podsol
 Ausgangssubstrat: Flugsand über Sand der Niederterrasse
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 60 cm unter GOF; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Mais)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 29 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (alle 4 Jahre), Rindergülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-38	Ss	h2	5,9	c1
Ae-Bsh	38-58	Sl2	h3	5,9	c1
Gro	58-88	Su2	h1	5,4	c1
IIGor	88-160	Ss	h1	5,3	c1
IIGr	160+	Ss	h1	4,9	c1

Betrieb 7

Lage: Randlage Ruhrgebiet TK 50: L 4310 (Lünen)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 68 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 750 mm; 9° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3399.335 H 5724.731

Bodentyp: Gley-Pseudogley
 Ausgangssubstrat: Geschiebesand über Kalkmergelstein
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 90 cm unter GOF; mittlere Staunässe
 Nutzung: Ackerbau (Getreide, Leguminosen, Feldgemüse)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 25 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (ca. alle 6 Jahre), Pferdemist (ca. alle 3 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Su3	h3	6,2	c1
Sw ₁	30-55	Sl4	h3	6,5	c1
Sw ₂	55-75	Sl3	h1	6,9	c1
Go-Sd	75-90	Sl4	h1	6,8	c1
II Sd-Go	90-190	-	h1	7,7	c4
IIGr	190+	-	h1	7,7	c4

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3399.695 H 5725.001

Bodentyp: Pseudogley
 Ausgangssubstrat: Kalkmergelstein
 Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; mittlere bis starke Staunässe
 Nutzung: Ackerbau (Getreide, Leguminosen, Feldgemüse)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 25 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (ca. alle 6 Jahre), Pferdemist (ca. alle 3 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Sl3	h3	6,2	c1
Sw	30-55	Sl4	h1	6,4	c1
Sw	55-100	Sl4	h1	6,9	c1
IISd-Cv	100-200	-	h1	7,5	c4

Betrieb 8

Lage: Kölner Bucht TK 50: L 4906 (Neuss)
 Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
 Höhe ü. NN: 41 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 750 mm; 10° C

Schlag a

Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2564.505 H 5657.190
 Grube 2: R 2564.565 H 5657.192

Bodentyp: Auenboden
 Ausgangssubstrat: lehmiger Auensand über Auensand
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Zuckerrüben)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 35 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (alle 3 Jahre), Sekundärrohstoffdünger (alle 5 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-37	SI3	h2	6,7	c1
aM ₁	37-56	SI4	h2	6,5	c1
aM ₂	56-190	SI4	h1	7,0	c1
IIaC	190+	Ss	h1	6,8	c1

Schlag b

Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2562.151 H 5657.129
 Grube 2: R 2562.130 H 5657.163

Bodentyp: Auengley- Auenboden
 Ausgangssubstrat: Auenlehm über Auensand
 Wasserverhältnisse: Grundwasser bis 90 cm unter GOF; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Zuckerrüben/Getreide)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 32 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (alle 3 Jahre), Sekundärrohstoffdünger (alle 5 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-37	Lu	h3	6,7	c1
aM	37-90	Lu	h2	7,0	c1
IIGor	90+	SI2	h1	7,6	c4

Betrieb 9

Lage: Kölner Bucht TK 50: L 5108 (Köln-Mühlheim)
 Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
 Höhe ü. NN: 52 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 760 mm; 9,8° C

Schlag a

Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2576.300 H 5635.010
 Grube 2: R 2576.310 H 5635.020

Bodentyp: Parabraunerde
 Ausgangssubstrat: Hochflutlehm/Hochflutsand über kiesigem Sand der Niederterasse
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Zuckerrüben)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 34 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (alle 1-2 Jahre), Zwischenfrucht (alle 3 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-38	Ls2	h2	6,8	c1
Bt	38-75	Lt2	h1	7,0	c1
Bv	75-120	SI4	h1	7,1	c1
IIcV	120+	-	h1	7,6	c3

Schlag b

Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2576.350 H 5635.004
 Grube 2: R 2576.340 H 5635.008

Bodentyp: Parabraunerde
 Ausgangssubstrat: Hochflutlehm/Hochflutsand über kiesigem Sand der Niederterasse
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Zuckerrüben)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krümenlockerung ca. 20 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (alle 1-2 Jahre), Zwischenfrucht (alle 3 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-38	Ls2	h2	6,8	c1
Bt	38-75	Lt2	h1	7,0	c1
Bv	75-120	SI4	h1	7,1	c1
IIcV	120+	-	h1	7,6	c3

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2589.452 H 5621.134

Bodentyp: Parabraunerde
 Ausgangssubstrat: Löss
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Grünland
 Bodenbearbeitung: ----
 organische Dünung: Rindergülle (alle 1-2 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ah	0-28	Ut3	h3	5,5	c1
Bt	30-70	Ut4	h2	5,9	c1
Bv	70+	Lu	h1	6,5	c1

Schlag c Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2590.572 H 5620.904
 Grube 2: R 2590.589 H 5620.980

Bodentyp: Braunerde-Pseudogley
 Ausgangssubstrat: Tonstein
 Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; mittlere Staunässe
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Mais)
 Bodenbearbeitung: Direktsaat
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (alle 2 Jahre), Zwischenfrucht (alle 3 Jahre), Rindergülle (alle 2 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Ut3	h2	6,2	c1
Bv-Swd	30-78	Tu4	h1	5,7	c1
IIISd	78+	-	h1	5,2	c1

Betrieb 12

Lage: rechtsrheinisches Höhengebiet TK 50: L 4706 (Düsseldorf)
 Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
 Höhe ü. NN: 150 m
 Relief: schwach bis mittel geneigt
 Niederschlag/Temperatur: 1100 mm; 9,5° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2565.895 H 5678.368
 Grube 2: R 2565.890 H 5678.358

Bodentyp: Parabraunerde
 Ausgangssubstrat: Löss
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Raps)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krümenlockerung ca. 18 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (alle 4 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-35	Ut3	h2	6,5	c1
Sw-Al	35-80	Ut3	h1	6,4	c1
Sd-Bt	80-95	Ut4	h1	6,6	c1
Bv	95+	Lu	h1	6,4	c1

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2566.790 H 5678.323
 Grube 2: R 2566.779 H 5678.306

Bodentyp: Pseudogley-Parabraunerde
 Ausgangssubstrat: Löss
 Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; schwache Staunässe
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Zuckerrüben)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krümenlockerung ca. 20 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (alle 4 Jahre), Zwischenfrucht (alle 4 Jahre), Sekundärrohstoffdünger (alle 4 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-41	Ut2	h2	6,6	c1
Sw-Al	41-75	Ut3	h1	6,4	c1
Sd-Bt	75-120	Ut4	h1	6,5	c1
Bv	120+	Lu	h1	6,4	c1

Betrieb 13

Lage: Jülicher Börde TK 50: L 4904 (Mönchengladbach)
 Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
 Höhe ü. NN: 105 m
 Relief: eben bis schwach geneigt
 Niederschlag/Temperatur: 750 mm; 9,5° C

Betrieb 16

Lage: Jülicher Börde TK 50: L 5102 (Geilenkirchen)
 Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
 Höhe ü. NN: 110 m
 Relief: eben bis schwach geneigt
 Niederschlag/Temperatur: 750 mm; 9,5° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2515.062 H 5644.353

Bodentyp: Parabraunerde
 Ausgangssubstrat: Löss
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Zuckerrüben)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 30 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (2 von 3 Jahren), Zwischenfrucht (alle 3 Jahre),
 Sekundärrohstoffdünger (ca. alle 2-3 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-31	Ut3	h2	6,7	c1
Bt	31-85	Ut4	h1	7,0	c1
Bv ₁	85-135	Ut4	h1	7,0	c1
Bv ₂	135+	Ut3	h1	7,0	c1

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2515.169 H 5644.353

Bodentyp: Parabraunerde-Kolluvisol
 Ausgangssubstrat: Löss
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Zuckerrüben)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krumenlockerung ca. 18 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (2 von 3 Jahren), Zwischenfrucht (alle 3 Jahre),
 Sekundärrohstoffdünger (ca. alle 2-3 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Ut2	h2	6,5	c1
M	30-47	Ut3	h2	6,5	c1
Al	47-93	Ut3	h1	6,8	c1
Sw-Bt	93-138	Ut4	h1	7,0	c1
Sd-Bt	138-170	Ut4	h1	7,0	c1
Bv	170+	Ut4	h1	7,0	c1

Betrieb 17

Lage: Soester Börde TK 50: L 4514 (Soest)
 Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
 Höhe ü. NN: 114 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 750 mm; 9,0° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3436.670 H 5713.391

Bodentyp: Pseudogley-Parabraunerde
 Ausgangssubstrat: Löss
 Wasserverhältnisse: grundwasserfrei, schwache Stauunässe
 Nutzung: Ackerbau (Zuckerrüben, Winterraps, Getreide)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krumenlockerung ca. 10 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (alle 1-2 Jahre), Zwischenfrucht (alle 4 Jahre),

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-32	Uu	h1	6,5	c1
Al	32-40	Ut2	h1	6,4	c1
Sw-Bt	40-55	Ut4	h1	6,5	c1
Sd-Bt	55-80	Ut3	h1	7,0	c1
Bv	80+	Ut3	h1	7,1	c1

Betrieb 18

Lage: rechtsrheinisches Höhengebiet TK 50: L 4708 (Wuppertal)
 Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
 Höhe ü. NN: 150 m
 Relief: schwach bis mittel geneigt
 Niederschlag/Temperatur: 1100 mm; 9,5° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2571.683 H 5676.355

Bodentyp: Kolluvium

Ausgangssubstrat: Löss
 Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Zuckerrüben/Raps)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krümenlockerung ca. 25 cm
 organische Dünung: Zwischenfrucht (alle 4 Jahre), Sekundärrohstoffdünger (alle 3 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-40	Ut2	h2	6,6	c1
M ₁	40-80	Ut4	h2	7,1	c1
M ₂	80-140	Ut4	h1	6,9	c1
Bv	140+	Lu	h1	6,8	c1

Betrieb 19

Lage: Niederrhein TK 50: L 4102 (Emmerich)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 15 m
 Relief: eben
 Niederschlag/Temperatur: 700 mm; 9,0° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2517.155 H 5742.424
 Grube 2: R 2517.132 H 5742.393

Bodentyp: Auenboden
 Ausgangssubstrat: Auenlehm über Auensand
 Wasserverhältnisse: Grundwasser mit Rheinwasserstand stark schwankend; stauwasserfrei
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Zuckerrüben/Mais/Raps)
 Bodenbearbeitung: konservierend; Krümenlockerung ca. 10 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (alle 2 Jahre), Zwischenfrucht (alle 2 Jahre), Rindergülle (alle 2 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-34	Ut4	h4	7,5	c3
aM ₁	34-130	Ut4	h3	7,5	c4
IIaC	130+	Su2	h1	7,8	c4

Betrieb 20

Lage: Haarstrang TK 50: L 4516 (Büren)
 Betriebstyp: Gemischtbetrieb
 Höhe ü. NN: 290 m
 Relief: schwach bis mittel geneigt
 Niederschlag/Temperatur: 800 mm; 8,5° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3460.655 H 5712.775
 Grube 2: R 3460.639 H 5712.769

Bodentyp: Braunerde-Pseudogley
 Ausgangssubstrat: Kalkmergelstein
 Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; schwach bis mittlere Staunässe
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Raps)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 25 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (ca. alle 3 Jahre), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-29	Ut4	h3	6,8	c1
Bv-Sw	29-67	Tu3	h1	6,9	c1
IIbV-Sd	67-72	Tu3	h1	7,3	c4
IIcV-Sd	72+	-	-	-	-

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3460.700 H 5712.703
 Grube 2: R 3460.686 H 5712.692

Bodentyp: Braunerde-Pseudogley
 Ausgangssubstrat: Kalkmergelstein
 Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; schwach bis mittlere Staunässe
 Nutzung: Ackerbau (Getreide/Raps)
 Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 25 cm
 organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (ca. alle 3 Jahre), Schweinegülle (jährlich)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-27	Tu3	h3	6,4	c1
Bv-Sw	27-67	Tu2	h1	6,3	c1
IIbV-Sd	67-80	Tu3	h1	7,3	c4
IIcV-Sd	80+	-	-	-	-

Betrieb 21

Lage: Haarstrang TK 50: L 4514 (Soest)
 Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
 Höhe ü. NN: 285 m

Relief: mittel bis stark geneigt
Niederschlag/Temperatur: 800 mm; 8,5° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3450.150 H 5709.771
Grube 2: R 3450.170 H 5709.711

Bodentyp: Braunerde
Ausgangssubstrat: Kalkmergelstein
Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; schwache Hangnässe
Nutzung: Getreide/Raps
Bodenbearbeitung: wendend; Pflugtiefe ca. 29 cm
organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (ca. alle 2 Jahre), Biogasgülle

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Ut3	h2	6,6	c1
Bv	30-70	Tu3	h1	6,5	c1
IIcV	70+	-	-	-	-

Schlag b Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3450.179 H 5709.671
Grube 2: R 3450.190 H 5709.701

Bodentyp: Braunerde
Ausgangssubstrat: Kalkmergelstein
Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; schwache Hangnässe
Nutzung: Getreide/Raps
Bodenbearbeitung: konservierend; Krumenlockerung ca. 13 cm
organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (ca. alle 2 Jahre), Biogasgülle

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Ut3	h2	6,6	c1
Bv	30-70	Tu3	h1	5,2	c1
IIcV	70+	-	-	-	-

Betrieb 22

Lage: westliches Münsterland TK 50: L 3908 (Ahaus)
Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
Höhe ü. NN: 118 m
Relief: eben bis schwach geneigt
Niederschlag/Temperatur: 850 mm; 9,0° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 2583.657 H 5766.500

Bodentyp: Pseudogley
Ausgangssubstrat: Tonmergel
Wasserverhältnisse: grundwasserfrei; mittlere Staunässe
Nutzung: Ackerbau (Getreide/Raps/Leguminosen)
Bodenbearbeitung: konservierend
organische Dünung: Getreidestroh verbleibt (ca. alle 2 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-30	Lt3	h2	7,0	c3
Sw	30-40	Lt2	h1	7,3	c5
IIISd-Cv	40+	-	-	-	-

Betrieb 23

Lage: Haarstrang TK 50: L 4516 (Büren)
Betriebstyp: Ackerbaubetrieb
Höhe ü. NN: 365 m
Relief: schwach bis mittel geneigt
Niederschlag/Temperatur: 800 mm; 8,5° C

Schlag a Koordinaten (Gauß-Krüger) → Grube 1: R 3463.155 H 5708.666
Grube 2: R 3463.175 H 5708.636

Bodentyp: Braunerde
Ausgangssubstrat: Kalkmergelstein
Wasserverhältnisse: grund- und stauwasserfrei
Nutzung: Ackerbaubetrieb (Getreide/Raps/Leguminosen)
Bodenbearbeitung: konservierend; Krumenlockerung ca. 16 cm
organische Dünung: Schweinemist (alle 5 Jahre)

Horizont	Tiefe (cm)	Körnung	Humusgehalt	pH-Wert	Carbonat
Ap	0-38	Ut2	h2	6,3	c1
Bv	38-75	Tu2	h1	6,4	c2
IIcV	75+	-	-	-	-

A2: Probeentnahmetiefen, Körnung, pH-Wert, Humus und CaCO₃-Gehalt der Standorte (S), Schläge (s) und Untersuchungstiefen (T) ■ = nicht beprobte Untersuchungstiefen

S	s	T	Probe- entnahme (cm)	Horizont	pH	Humus	CaCO ₃	Ton (%)	Schluff (%)				Sand (%)				Bodenart
									fU	mU	gU	Σ	fS	mS	gS	Σ	
1	a	K	10-15	EAp	5,0	5,6	0,3	7,2	3,7	5,0	18,3	27,0	47,3	17,9	0,6	65,8	Su3
1	a	KB	29-34	EAp	5,1	5,0	0,2	4,8	2,3	5,2	15,8	23,3	54,7	16,8	0,4	71,9	Su2
1	a	UB	52-57	Bs	5,1	1,3	0,2	3,3	2,4	3,1	16,1	21,6	56,1	18,6	0,4	75,1	Su2
1	b	K	10-15	EAp	5,0	4,2	0,3	3,5	2,0	5,2	16,8	24,0	55,5	16,6	0,4	72,5	Su2
1	b	KB	30-35	EAp	5,1	3,7	0,2	5,9	1,8	3,3	12,3	17,4	57,5	18,8	0,4	76,7	Si2
1	b	UB	50-55	Bs	5,1	1,1	0,2	5,7	2,1	1,8	10,6	14,5	58,4	20,8	0,6	79,8	Si2
2	a	K															
2	a	KB	29-34	Ap	4,9	3,6	0,2	6,6	2,6	3,5	5,4	11,5	64,9	16,0	1,0	81,9	Si2
2	a	UB	59-64	Bs	4,8	0,6	0,2	3,9	2,2	3,5	2,4	8,1	46,3	40,0	1,7	88,0	Ss
2	b	K															
2	b	KB	31-36	Ap	5,8	4,7	0,2	4,7	2,1	4,1	5,5	11,7	28,7	53,5	1,4	83,6	Su2
2	b	UB	47-52	Gr	5,7	0,1	1,9	2,1	1,4	1,2	1,5	4,1	44,5	46,4	2,9	93,8	Ss
3	a	K	10-15	EAp	5,3	4,9	0,2	4,3	3,6	7,5	9,0	20,1	66,5	8,3	0,8	75,6	Su2
3	a	KB	33-38	E	5,3	4,7	0,3	7,9	3,9	2,5	5,6	12,0	44,5	34,4	1,2	80,1	Si2
3	a	UB	50-55	E	4,4	4,3	0,2	8,0	4,0	6,8	6,9	17,7	41,8	31,1	1,4	74,3	Si2
3	b	K															
3	b	KB	33-38	Ap	5,5	3,5	0,2	7,0	3,9	7,5	8,4	19,8	45,3	26,5	1,4	73,2	Si2
3	b	UB	49-54	Ae	5,2	2,7	0,2	5,6	4,7	6,8	11,2	22,7	42,7	27,4	1,6	71,7	Si2
3	b	tUB	68-73	Gro	5,0	0,3	0,2	2,6	0,1	0,9	3,9	4,9	43,6	46,7	2,2	92,5	Ss
4	a	K	19-24	Ap	6,0	3,3	0,2	2,1	2,1	4,4	6,6	13,1	41,3	42,5	1,0	84,8	Su2
4	a	KB	34-39	Bsh	6,3	1,0	0,2	1,7	1,1	1,9	5,6	8,6	43,4	45,3	1,0	89,7	Ss
4	a	UB	50-55	Bsh	6,2	0,2	0,2	0,2	1,1	0,2	2,0	3,3	42,6	52,3	1,6	96,5	Ss
5	a	K															
5	a	KB	34-39	Gro	6,4	0,6	0,2	0,7	1,6	0,6	6,4	8,6	75,2	15,3	0,2	90,7	Ss
5	a	UB	50-55	Gr	6,1	0,4	0,2	1,9	0,1	0,0	2,7	2,8	87,8	7,3	0,2	95,3	Ss
6	a	K															
6	a	KB	29-34	Ap	6,0	1,9	0,2	0,7	0,9	1,3	6,4	8,6	53,3	36,2	1,2	90,7	Ss
6	a	UB	40-45	Bsh	5,8	3,7	0,2	5,0	0,5	1,3	14,1	15,9	67,9	11,0	0,2	79,1	Si2
6	a	tUB	60-65	Go	4,9	0,9	0,2	0,8	0,6	1,0	8,6	10,2	81,1	7,9	0,0	89,0	Su2
7	a	K	10-15	Ap	6,2	3,1	0,2	6,2	8,6	6,8	14,7	30,1	36,8	24,9	2,0	63,7	Su3
7	a	KB	20-25	Sw	6,3	2,5	0,2	6,7	7,1	7,4	12,1	26,6	36,4	27,9	2,4	66,7	Su3
7	a	UB	50-55	Sw	6,5	2,6	0,2	16,9	3,4	6,3	17,5	27,2	32,4	22,7	0,8	55,9	Si4
7	b	K	13-18	Ap	6,2	2,8	0,2	9,3	2,7	4,5	6,8	14,0	45,7	27,8	3,2	76,7	Si3
7	b	KB	25-30	Ap	6,2	0,2	0,2	14,7	5,6	6,5	16,5	28,6	31,4	24,9	0,4	56,7	Si4
7	b	UB	50-55	Sw	6,4	0,3	0,2	16,0	2,7	2,7	15,2	20,6	36,8	25,0	1,6	63,4	Si4
8	a	K															
8	a	KB	37-42	aM ₁	6,4	1,2	0,2	8,1	5,3	6,2	18,4	29,9	41,7	19,7	0,6	62,0	Si3
8	a	UB	50-55	aM ₂	6,5	0,6	0,2	12,7	4,5	7,2	19,7	31,4	37,1	18,6	0,2	55,9	Si4
8	b	K															
8	b	KB	32-37	Ap	7,2	1,7	0,2	24,6	11,2	18,8	29,2	59,2	12,4	3,4	0,4	16,2	uL
8	b	UB	49-54	aM ₁	7,0	1,6	0,2	25,1	12,1	15,0	30,4	57,5	14,6	2,6	0,2	17,4	uL
9	a	K															
9	a	KB	40-44	Bt	6,8	0,5	0,2	28,8	8,6	15,4	20,5	44,5	10,3	16,1	0,3	26,7	Lt2
9	a	UB	50-55	Bt	6,9	0,3	0,3	27,7	6,9	13,3	19,5	39,7	12,8	19,3	0,5	32,6	Lt2
9	b	K	23-27	Ap	6,8	1,5	0,2	18,3	8,4	17,2	23,0	48,4	11,4	21,5	0,4	33,3	Ls2
9	b	KB	36-41	Bt	6,9	0,6	0,2	23,3	9,2	16,6	21,4	47,0	8,9	20,0	0,8	29,7	Ls2
9	b	UB	51-56	Bt	6,9	0,3	0,3	26,7	8,3	14,5	17,7	40,5	8,4	23,8	0,6	32,8	Lt2
9	c	K	10-15	Ap	6,4	0,9	0,2	17,3	9,5	17,8	25,8	53,1	9,4	18,7	1,5	29,6	Lu
9	c	KB	35-40	Bt	6,9	0,5	0,2	22,9	11,5	19,3	24,9	55,7	8,4	12,2	0,8	21,4	Lu
9	c	UB	60-65	Bt	7,0	0,3	0,2	28,1	11,2	19,8	26,8	57,8	7,3	5,7	1,1	14,1	Lu
10	a	K	20-25	Ap	5,2	1,8	0,2	15,2	8,2	19,5	35,5	63,2	10,0	9,6	2,0	21,6	Uls
10	a	KB	33-38	Bv ₁	5,7	1,4	0,3	15,2	7,7	20,0	36,0	63,7	10,4	8,7	2,0	21,1	Uls
10	a	UB	50-55	Bv ₂	6,5	0,8	0,2	17,8	8,4	18,9	36,5	63,8	8,1	8,3	2,0	18,4	Lu

Fortsetzung A2

S	s	T	Probe- entnahme (cm)	Horizont	pH	Humus	CaCO ₃	Ton (%)				Schluff (%)				Sand (%)				Bodenart
												flU	mU	gU	Σ	fs	mS	gS	Σ	
10	b	K	10-15	Ap	6,6	1,7	0,2	12,7	7,9	21,4	42,4	71,7	7,1	6,9	1,6	15,6	Ut3			
10	b	KB	32-38	Al	6,3	1,3	0,2	15,6	7,1	21,0	41,1	69,2	7,0	6,4	1,8	15,2	Ut3			
10	b	UB	48-53	Bt	6,4	0,8	0,2	22,5	7,9	20,1	38,9	66,9	5,1	4,1	1,4	10,6	Ut4			
11	a	K	18-23	Ap	5,6	2,2	0,2	17,3	7,4	21,9	49,4	78,7	2,8	0,7	0,5	4,0	Ut3			
11	a	KB	35-40	Bt	6,0	0,7	0,2	19,9	5,3	20,9	51,2	77,4	2,3	0,3	0,1	2,7	Ut4			
11	a	UB	55-60	Bt	6,3	0,4	0,2	18,8	5,2	19,6	53,2	78,0	2,8	0,2	0,2	3,2	Ut4			
11	b	K	8-13	Ah	5,5	3,3	0,2	13,7	7,8	24,0	50,9	82,7	2,4	0,8	0,4	3,6	Ut3			
11	b	KB	27-32	Bt	5,8	1,5	0,3	17,9	7,7	21,1	50,5	79,3	2,2	0,2	0,4	2,8	Ut4			
11	b	UB	50-55	Bt	5,9	0,6	0,2	24,0	5,8	21,1	46,3	73,2	2,6	0,2	0,0	2,8	Ut4			
11	c	K	20-25	Ap	6,2	2	0,2	16,7	12,4	22,1	39,5	74,0	4,7	2,1	2,5	9,3	Ut3			
11	c	KB																		
11	c	UB	45-50	BvSw	5,7	0,4	0,2	25,2	7,9	18,7	42,9	69,5	3,1	1,2	1,0	5,3	Tu4			
12	a	K	20-25	Ap	6,5	1,7	0,2	12,1	4,1	20,6	60,3	85,0	2,0	0,5	0,4	2,9	Ut3			
12	a	KB	37-42	Al	6,4	1,3	0,2	12,9	4,2	21,1	59,2	84,5	1,8	0,4	0,4	2,6	Ut3			
12	a	UB	50-55	Al	6,4	0,6	0,3	14,9	4,0	19,8	59,5	83,3	1,4	0,3	0,1	1,8	Ut3			
12	b	K	20-25	Ap	6,5	1,8	0,2	9,2	7,8	24,9	55,5	88,2	1,8	0,4	0,4	2,6	Ut2			
12	b	KB	35-40	Ap	6,4	1,1	0,2	12,9	7,2	22,6	54,9	84,7	1,6	0,4	0,4	2,4	Ut3			
12	b	UB	50-55	SwAl	6,4	0,6	0,2	14,9	6,9	23,1	52,9	82,9	1,6	0,2	0,4	2,2	Ut3			
13	a	K	22-27	Ap	7,2	1,7	0,2	8,3	6,1	23,7	59,1	88,9	1,6	0,6	0,6	2,8	Ut2			
13	a	KB	42-47	Al	7,3	0,7	0,2	10,8	5,0	22,6	59,8	87,4	1,4	0,4	0,0	1,8	Ut2			
13	a	UB	60-65	Bt	7,3	0,5	0,3	15,2	5,6	21,4	55,6	82,6	1,4	0,6	0,2	2,2	Ut3			
13	b	K	20-25	Ap	7,2	1,6	0,3	10,0	6,2	22,2	59,2	87,6	1,6	0,6	0,2	2,4	Ut2			
13	b	KB	42-47	AlBt	7,2	0,6	0,2	21,3	5,2	19,2	53,3	77,7	1,0	0,0	0,0	1,0	Ut4			
13	b	UB	60-65	Bt	7,3	0,5	0,2	21,0	4,6	18,2	55,2	78,0	1,0	0,0	0,0	1,0	Ut4			
14	a	K	7-12	Ap	6,8	2	0,4	14,3	1,1	17,5	65,1	83,7	1,2	0,5	0,3	2,0	Ut3			
14	a	KB	32-37	SwAl	6,9	0,8	0,3	11,2	6,7	22,5	56,8	86,0	1,6	0,7	0,5	2,8	Ut2			
14	a	UB	62-67	SwBt ₁	7,1	0,6	0,2	17,3	5,4	21,7	53,4	80,5	1,2	0,5	0,5	2,2	Ut4			
14	b	K	10-15	Ap	6,8	2	0,2	14,3	1,1	17,5	65,1	83,7	1,2	0,5	0,3	2,0	Ut3			
14	b	KB	32-37	SwAl	6,9	0,9	0,3	10,4	6,3	21,8	59,0	87,1	1,6	0,5	0,4	2,5	Ut2			
14	b	UB	60-65	SwBt ₁	7,2	0,7	0,2	15,2	5,0	21,0	56,9	82,9	1,5	0,2	0,2	1,9	Ut3			
14	c	K	10-15	Ap	6,6	1,9	0,2	9,4	5,2	14,7	68,1	88,0	1,5	0,6	0,5	2,6	Ut2			
14	c	KB	35-40	SwAl	6,8	1	0,2	11,5	6,2	21,6	58,3	86,1	1,7	0,4	0,3	2,4	Ut2			
14	c	UB	60-65	SwBt ₁	6,9	0,4	0,2	17,7	4,6	20,2	55,7	80,5	1,2	0,2	0,4	1,8	Ut4			
14	d	K	12-17	Ap	6,7	2,1	0,2	9,4	5,2	14,7	68,1	88,0	1,5	0,6	0,5	2,6	Ut2			
14	d	KB	30-35	Ap	6,8	1,9	0,3	12,0	5,2	21,2	58,9	85,3	1,5	0,8	0,4	2,7	Ut3			
14	d	UB	50-55	SwBt ₁	6,8	0,7	0,2	17,8	5,2	21,8	53,1	80,1	1,2	0,5	0,4	2,1	Ut4			
14	e	K	11-16	Ap	6,7	1,9	0,2	14,3	1,1	17,5	65,1	83,7	1,2	0,5	0,3	2,0	Ut3			
14	e	KB	30-35	Ap	6,8	1,4	0,2	9,9	6,4	21,4	59,3	87,1	1,4	0,7	0,9	3,0	Ut2			
14	e	UB	50-55	SwBt ₁	6,8	0,7	0,2	15,5	5,1	22,2	55,3	82,6	1,2	0,4	0,3	1,9	Ut3			
14	f	K	8-13	Ap	6,7	1,8	0,3	14,3	1,1	17,5	65,1	83,7	1,2	0,5	0,3	2,0	Ut3			
14	f	KB	30-35	Ap	7,0	1,4	0,2	9,4	5,7	22,2	59,9	87,8	1,5	0,7	0,6	2,8	Ut2			
14	f	UB	50-55	SwBt ₁	6,8	0,8	0,2	16,1	5,0	20,6	56,1	81,7	1,2	0,4	0,6	2,2	Ut3			
14	g	K	15-20	Ap	7,1	1,2	0,6	9,4	8,1	21,1	57,7	86,9	2,2	0,7	0,8	3,7	Ut2			
14	g	KB																		
14	g	UB	51-56	SwAl	6,9	0,3	0,2	17,0	5,1	21,0	55,1	81,2	1,0	0,4	0,4	1,8	Ut4			
14	h	K	20-25	Ap	7,0	1,8	0,2	4,8	7,1	25,2	60,0	92,3	1,9	0,8	0,2	2,9	Uu			
14	h	KB																		
14	h	UB	50-55	Al	6,9	0,9	0,2	14,9	7,4	19,2	56,7	83,3	1,3	0,4	0,1	1,8	Ut3			
15	a	K	10-15	Ap	6,3	1,7	0,3	11,6	5,4	17,7	59,0	82,1	3,9	2,1	0,3	6,3	Ut2			
15	a	KB	35-40	SwAl	6,5	1,2	0,2	15,4	4,4	18,1	58,3	80,8	2,3	0,9	0,6	3,8	Ut3			
15	a	UB	50-55	BtSw	6,7	0,4	0,2	18,0	3,9	18,6	55,3	77,8	2,6	1,0	0,6	4,2	Ut4			
15	b	K	12-17	Ap	7,1	1,7	0,3	9,6	6,8	19,4	58,8	85,0	3,4	1,3	0,7	5,4	Ut2			
15	b	KB	33-38	SwAl	7,2	1,3	0,8	15,4	4,9	17,4	57,9	80,2	2,8	1,1	0,5	4,4	Ut3			
15	b	UB	50-55	BtSw	7,2	0,5	0,3	18,8	3,7	15,9	56,0	75,6	3,7	1,6	0,3	5,6	Ut4			

Fortsetzung A2

S	s	T	Probe- entnahme (cm)	Horizont	pH	Humus	CaCO ₃	Ton (%)	Schluff (%)				Sand (%)				Bodenart	
									fu	mU	gU	Σ	fs	ms	gs	Σ		
16	a	K																
16	a	KB	33-38	Al	6,7	0,5	0,2	20,0	4,4	21,7	50,8	76,9	2,5	0,6	0,0	3,1	Ut4	
16	a	UB	48-53	Al	7,0	0,3	0,2	19,5	5,0	21,3	52,2	78,5	2,0	0,0	0,0	2,0	Ut4	
16	b	K	13-18	Ap	6,5	1,9	0,2	11,5	5,5	20,7	58,7	84,9	2,2	1,0	0,4	3,6	Ut2	
16	b	KB	35-40	Al	6,8	0,8	0,2	14,0	4,8	20,2	57,8	82,8	1,8	1,0	0,4	3,2	Ut3	
16	b	UB	52-57	Al	6,8	0,6	0,2	13,3	5,2	21,1	57,4	83,7	1,6	1,0	0,4	3,0	Ut3	
17	a	K	10-15	Ap	6,5	1,1	0,3	7,1	6,1	24,5	59,1	89,7	2,3	0,7	0,2	3,2	Uu	
17	a	KB	32-37	Al	6,4	0,6	0,3	10,2	8,1	25,3	52,6	86,0	2,4	1,0	0,4	3,8	Ut2	
17	a	UB	50-55	Bt	6,5	0,4	0,3	23,3	8,8	18,5	48,6	75,9	0,7	0,1	0,0	0,8	Ut4	
18	a	K	25-30	Ap	6,6	2,2	0,2	9,9	8,7	23,9	54,3	86,9	2,0	0,6	0,6	3,2	Ut2	
18	a	KB	40-45	M ₁	6,6	1,0	0,2	14,6	6,7	21,4	54,0	82,1	2,4	0,7	0,2	3,3	Ut3	
18	a	UB	55-60	M ₂	6,5	0,8	0,2	17,8	6,1	22,7	51,3	80,1	1,8	0,3	0,0	2,1	Ut4	
19	a	K	19-24	Ap	7,5	5,1	4,9	22,8	23,8	28,8	21,6	74,2	2,0	0,8	0,2	3,0	Ut4	
19	a	KB	26-41	aM ₁	7,6	4	7,9	26,5	18,3	29,9	22,9	71,1	1,8	0,4	0,2	2,4	Tu4	
19	a	UB	50-55	aM ₂	7,7	3,9	12,9	22,8	16,3	30,3	28,6	75,2	1,6	0,2	0,2	2,0	Ut4	
20	a	K	13-18	Ap	6,8	2,1	0,2	18,6	19,9	21,3	36,5	77,7	1,7	1,2	0,8	3,7	Ut4	
20	a	KB	30-35	BvSw	6,9	0,7	0,2	41,2	16,3	17,2	21,6	55,1	3,5	0,2	0,0	3,7	Tu3	
20	a	UB	45-50	BvSw	6,9	0,5	0,2	38,7	17,0	16,0	23,0	56,0	4,9	0,4	0,0	5,3	Tu3	
20	b	K	10-15	Ap	6,4	2,1	0,2	16,3	19,7	23,5	33,0	76,2	6,3	0,8	0,4	7,5	Ut3	
20	b	KB	27-32	BvSw	6,5	0,6	0,2	33,3	17,7	16,5	28,0	62,2	3,7	0,4	0,4	4,5	Tu3	
20	b	UB	50-55	BvSw	6,3	0,5	0,3	45,2	17,0	14,9	20,3	52,2	2,4	0,0	0,2	2,6	Tu2	
21	a	K	15-20	Ap	6,6	1,9	0,2	13,2	22,5	27,0	31,2	80,7	2,8	1,7	1,6	6,1	Ut3	
21	a	KB	33-38	Bv	6,6	0,7	0,2	33,3	20,5	21,7	20,2	62,4	2,1	1,2	1,0	4,3	Tu3	
21	a	UB	50-55	Bv	6,6	0,5	0,2	38,4	21,9	21,3	14,8	58,0	1,8	0,8	1,0	3,6	Tu3	
21	b	K	15-20	Ap	6,6	1,7	0,2	15,8	21,8	28,0	28,8	78,6	3,4	1,2	1,0	5,6	Ut3	
21	b	KB	33-38	Bv	6,2	0,4	0,2	47,4	18,5	18,6	12,7	49,8	1,2	1,2	0,4	2,8	Tu2	
21	b	UB	50-55	Bv	5,2	0,4	0,2	41,1	19,6	20,8	16,4	56,8	1,3	0,6	0,2	2,1	Tu3	
22	a	K	10-15	Ap	7,0	1,5	3,5	41,4	10,1	10,6	20,6	41,3	12,2	3,5	1,6	17,3	Lt3	
22	a	KB																
22	a	UB																
23	a	K	17-23	Ap	6,3	1,6	0,2	11,9	16,3	25,1	42,2	83,6	2,9	1,0	0,6	4,5	Ut2	
23	a	KB	30-35	Bv	6,4	0,9	0,2	22,8	16,0	23,2	35,3	74,5	1,6	0,7	0,4	2,7	Ut4	
23	a	UB	48-53	Bv	6,8	0,6	0,7	49,0	13,2	14,0	21,7	48,9	1,2	0,5	0,4	2,1	Tu2	

A3: Spatendiagnose (SD), eff. Lagerungsdichte (LD), Packungsdichte (PD), Makroporenanteile (M) und Eindringwiderstand (EW) der Standorte (S), Schläge (s), Profilgruben (P) und Untersuchungstiefen (T) ■ = nicht beprobte Untersuchungstiefen

S	s	P	T	SD	LD	PD	M	EW	S	s	P	T	SD	LD	PD	M	EW	S	s	P	T	SD	LD	PD	M	EW
1	a	1	K	1	1	1	0	0,34	6	a	2	KB	3,5	3	3	1	1,85	11	b	1	KB	2	2,5	2	3	1,40
1	a	1	KB	3,5	2,5	3	1	1,91	6	a	2	UB	3	2	2	2	2,87	11	b	1	UB	2	2,5	2	4	1,26
1	a	1	UB	3	2,5	2	2	2,39	6	a	2	tUB	3	2,5	2,5	1	6,57	11	c	1	K	3	2,5	3	2	1,11
1	a	2	K	1	1	1	0	0,48	7	a	1	K	3	3	3	0	0,85	11	c	1	KB	■	■	■	■	■
1	a	2	KB	3,5	2,5	3	1	2,23	7	a	1	KB	3,5	3,5	3,5	1	1,23	11	c	1	UB	2	3	2	3	2,13
1	a	2	UB	3	2,5	2	2	2,20	7	a	1	UB	2	3	2	3	2,07	11	c	2	K	3	2,5	3	2	1,27
1	b	1	K	1	1	1	0	0,31	7	b	1	K	4	3,5	4	0	1,06	11	c	2	KB	■	■	■	■	■
1	b	1	KB	3,5	2,5	3	1	2,38	7	b	1	KB	4	3,5	4	0	0,98	11	c	2	UB	2	3	2	3	1,35
1	b	1	UB	3	2,5	2	2	2,01	7	b	1	UB	2,5	3	2,5	1	3,52	12	a	1	K	3	3	3	2	1,50
1	b	2	K	1	1	1	0	0,47	8	a	1	K	■	■	■	■	■	12	a	1	KB	4	4	4	1	3,03
1	b	2	KB	3,5	2,5	3	1	2,48	8	a	1	KB	4	3,5	4	1	2,87	12	a	1	UB	2	2,5	2	4	1,72
1	b	2	UB	3	2,5	2	2	2,43	8	a	1	UB	2	3	2	3	1,62	12	a	2	K	3	3	3	2	1,55
2	a	1	K	■	■	■	■	■	8	a	2	K	■	■	■	■	■	12	a	2	KB	4	4	4	1	2,58
2	a	1	KB	3	2,5	2,5	2	2,55	8	a	2	KB	4	3,5	4	1	3,32	12	a	2	UB	2	2,5	2	4	1,72
2	a	1	UB	3	2,5	2	4	2,62	8	a	2	UB	2	3	2	3	1,91	12	b	1	K	3,5	3,5	3,5	2	2,25
2	a	2	K	■	■	■	■	■	8	b	1	K	■	■	■	■	■	12	b	1	KB	4	4	4	1	2,40
2	a	2	KB	3	2,5	2,5	2	2,04	8	b	1	KB	4	4	4	1	1,73	12	b	1	UB	2	2,5	2	4	1,42
2	a	2	UB	3	2,5	2	4	3,48	8	b	1	UB	2	3	2	3	1,68	12	b	2	K	3,5	3,5	3,5	2	2,00
2	b	1	K	■	■	■	■	■	8	b	2	K	■	■	■	■	■	12	b	2	KB	4	4	4	1	2,46
2	b	1	KB	4	3,5	4	1	3,71	8	b	2	KB	4	4	4	1	1,47	12	b	2	UB	2	2,5	2	4	1,22
2	b	1	UB	3	3,5	3	2	3,91	8	b	2	UB	2	3	2	3	1,61	13	a	1	K	1	1	1	0	0,82
2	b	2	K	■	■	■	■	■	9	a	1	K	■	■	■	■	■	13	a	1	KB	3	3	3	1	1,85
2	b	2	KB	4	3,5	4	1	2,84	9	a	1	KB	4	4	4	1	1,29	13	a	1	UB	2	2,5	2,5	3	2,84
2	b	2	UB	3	3,5	3	2	5,43	9	a	1	UB	2	3	2	4	1,57	13	a	2	K	1	1	1	0	0,96
3	a	1	K	1	1	1	0	0,59	9	a	2	K	■	■	■	■	■	13	a	2	KB	3	3	3	1	2,28
3	a	1	KB	2,5	2,5	3	2	1,72	9	a	2	KB	4	4	4	1	1,19	13	a	2	UB	2	2,5	2,5	3	3,18
3	a	1	UB	2	2	2	3	1,75	9	a	2	UB	2	3	2	4	1,75	13	b	1	K	3	3	3	1	2,89
3	a	2	K	1	1	1	0	0,67	9	b	1	K	4	3,5	4	2	1,84	13	b	1	KB	3	3	3	1	1,37
3	a	2	KB	2,5	2,5	3	2	1,65	9	b	1	KB	3	3,5	3	2	1,41	13	b	1	UB	2	2,5	2,5	3	2,15
3	a	2	UB	2	2	2	3	2,29	9	b	1	UB	2	3	2	4	1,85	13	b	2	K	3	3	3	1	2,99
3	b	1	K	■	■	■	■	■	9	b	2	K	4	3,5	4	2	1,99	13	b	2	KB	3	3	3	1	1,71
3	b	1	KB	3,5	3	3,5	1	1,70	9	b	2	KB	3	3,5	3	2	1,55	13	b	2	UB	2	2,5	2,5	3	2,04
3	b	1	UB	3	3	2	2	2,39	9	b	2	UB	2	3	2	4	1,73	14	a	1	K	3	2	3	1	1,00
3	b	1	tUB	3	3	2	3	5,43	9	c	1	K	2	3	2	3	2,62	14	a	1	KB	3	3	3	3	1,8
3	b	2	K	■	■	■	■	■	9	c	1	KB	2	3	2	2	2,23	14	a	1	UB	2	2	2	4	1,54
3	b	2	KB	3,5	3	3,5	1	1,95	9	c	1	UB	2	3	2	4	2,15	14	a	2	K	3	2	3	1	0,97
3	b	2	UB	3	3	2	2	2,64	10	a	1	K	3,5	3	3	1	2,07	14	a	2	KB	3	3	3	3	2,13
3	b	2	tUB	3	3	2	3	3,50	10	a	1	KB	3	3	3	1	1,55	14	a	2	UB	2	2	2	4	1,66
4	a	1	K	3,5	3	3	1	2,78	10	a	1	UB	2,5	2,5	2,5	3	1,34	14	b	1	K	2,5	2,5	2,5	2	1,87
4	a	1	KB	3	3	3	2	3,49	10	a	2	K	3,5	3	3	1	2,07	14	b	1	KB	2,5	2,5	2,5	4	2,26
4	a	1	UB	3	2,5	2	3	4,09	10	a	2	KB	3	3	3	1	1,52	14	b	1	UB	2	2	2	4	1,03
4	a	2	K	3,5	3	3	1	3,09	10	a	2	UB	2,5	2,5	2,5	3	1,28	14	b	2	K	2,5	2,5	2,5	2	1,75
4	a	2	KB	3	3	3	2	3,82	10	b	1	K	1	1,5	1	0	1,07	14	b	2	KB	2,5	2,5	2,5	4	2,12
4	a	2	UB	3	2,5	2	3	5,87	10	b	1	KB	3	3	3	1	2,00	14	b	2	UB	2	2	2	4	1,08
5	a	1	K	■	■	■	■	■	10	b	1	UB	2	2,5	2	4	1,74	14	c	1	K	2,5	2,5	2,5	2	1,07
5	a	1	KB	4	3,5	4	1	4,09	10	b	2	K	1	1,5	1	0	1,13	14	c	1	KB	2,5	2,5	2,5	4	2,14
5	a	1	UB	3	2,5	2,5	2	7,03	10	b	2	KB	3	3	3	1	1,8	14	c	1	UB	2	2	2	4	2,00
5	a	2	K	■	■	■	■	■	10	b	2	UB	2	2,5	2	4	1,62	14	c	2	K	2,5	2,5	2,5	2	1,38
5	a	2	KB	4	3,5	4	1	2,96	11	a	1	K	2	2,5	2,5	3	1,05	14	c	2	KB	2,5	2,5	2,5	4	1,49
5	a	2	UB	3	2,5	2,5	2	5,15	11	a	1	KB	2	2,5	2	4	1,3	14	c	2	UB	2	2	2	4	1,44
6	a	1	K	■	■	■	■	■	11	a	1	UB	2	2,5	2	4	1,57	14	d	1	K	3	2	3	1	1,47
6	a	1	KB	3,5	3	3	1	2,08	11	a	2	K	2	2,5	2,5	3	1,18	14	d	1	KB	3	3	3	3	3,97
6	a	1	UB	3	2	2	2	2,77	11	a	2	KB	2	2,5	2	4	1,32	14	d	1	UB	2	2	2	4	2,15
6	a	1	UB	3	2,5	2,5	1	5,49	11	a	2	UB	2	2,5	2	4	1,44	14	d	2	K	3	2	3	1	1,39
6	a	2	K	■	■	■	■	■	11	b	1	K	2	2,5	2	3	1,19	14	d	2	KB	3	3	3	3	3,45

Fortsetzung A4

S	s	P	T	Ld		GPV		wG		eG		MP		FP		nFK		FK		PZ		df
				MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	
6	a	2	KB	1,53	0,04	40,5	1,53	19,2	2,45	10,7	0,85	8,6	2,31	2,0	0,05	19,3	1,94	21,3	1,94	0,70	0,05	2,57
6	a	2	UB	1,31	0,04	49,5	1,59	17,7	1,39	9,7	0,95	17,2	2,62	4,9	0,16	26,9	1,98	31,8	1,87	0,98	0,08	2,59
6	a	2	tUB	1,59	0,03	39,6	1,26	14,2	1,64	16,8	1,42	7,0	0,92	1,6	0,03	23,8	1,60	25,4	1,59	0,66	0,03	2,63
7	a	1	K	1,57	0,06	39,0	2,18	7,0	2,87	3,6	0,48	17,6	1,23	10,8	0,40	21,2	1,18	32,0	1,26	0,64	0,06	2,57
7	a	1	KB	1,63	0,03	37,4	1,15	3,3	1,28	2,4	0,49	17,4	0,84	14,3	0,26	19,8	0,88	34,1	0,80	0,60	0,03	2,60
7	a	1	UB	1,53	0,06	41,7	2,11	9,5	3,17	5,8	2,57	18,5	4,64	7,9	0,28	24,3	3,63	32,2	3,49	0,72	0,06	2,62
7	b	1	K	1,61	0,06	37,3	2,22	5,5	3,51	3,5	0,65	3,4	0,92	24,9	0,88	6,9	0,62	31,8	1,35	0,60	0,06	2,57
7	b	1	KB	1,60	0,05	38,0	1,84	5,1	2,65	3,4	0,59	14,3	1,10	15,2	0,46	17,7	0,78	32,9	1,03	0,62	0,05	2,58
7	b	1	UB	1,67	0,03	36,0	1,02	6,3	1,40	4,6	1,06	13,6	1,51	11,5	0,19	18,2	0,91	29,7	0,89	0,56	0,03	2,61
8	a	1	K																			
8	a	1	KB	1,72	0,05	34,4	1,81	7,8	1,89	6,7	0,62	12,0	0,66	7,9	0,22	18,7	0,27	26,6	0,23	0,53	0,04	2,62
8	a	1	UB	1,61	0,02	39,2	0,73	11,9	1,06	6,5	0,44	11,0	0,72	9,8	0,12	17,5	0,58	27,3	0,60	0,64	0,02	2,65
8	a	2	K																			
8	a	2	KB	1,67	0,03	36,6	1,18	10,5	1,46	6,3	0,29	11,6	0,74	8,2	0,15	17,9	0,56	26,1	0,58	0,58	0,03	2,63
8	a	2	UB	1,62	0,02	38,9	0,74	12,5	0,93	6,7	0,67	10,6	0,45	9,1	0,11	17,3	0,47	26,4	0,47	0,64	0,02	2,65
8	b	1	K																			
8	b	1	KB	1,66	0,04	36,2	1,58	1,3	1,52	2,0	0,40	14,8	1,06	18,1	0,45	16,8	1,36	34,9	1,12	0,57	0,04	2,60
8	b	1	UB	1,51	0,04	42,1	1,35	5,8	1,50	2,1	0,28	14,3	0,55	19,9	0,46	16,4	0,68	36,3	0,54	0,73	0,04	2,61
8	b	2	K																			
8	b	2	KB	1,62	0,05	37,7	1,81	1,8	1,48	1,8	0,28	16,7	1,94	17,4	0,50	18,5	2,06	35,9	1,70	0,61	0,05	2,60
8	b	2	UB	1,51	0,03	42,1	1,23	6,3	1,25	2,3	0,15	13,7	1,60	19,8	0,42	16,0	1,49	35,8	1,24	0,73	0,04	2,61
9	a	1	K																			
9	a	1	KB	1,71	0,05	34,8	1,73	3,1	1,45	1,3	0,25	9,2	1,48	21,2	0,55	10,5	1,53	31,7	1,16	0,53	0,04	2,62
9	a	1	UB	1,67	0,03	36,5	1,28	5,7	1,63	2,0	0,21	12,1	0,64	16,7	0,32	14,1	0,63	30,8	0,66	0,57	0,03	2,63
9	a	2	K																			
9	a	2	KB	1,64	0,03	37,4	0,96	5,2	1,34	1,6	0,17	10,3	0,82	20,3	0,31	11,9	0,83	32,2	0,81	0,60	0,03	2,62
9	a	2	UB	1,68	0,03	36,2	1,16	5,3	1,81	1,0	0,14	10,6	0,79	19,3	0,34	11,6	0,71	30,9	0,84	0,57	0,03	2,63
9	b	1	K	1,73	0,05	34,3	1,74	6,2	1,94	1,8	0,23	13,4	0,95	12,9	0,34	15,2	1,08	28,1	0,99	0,52	0,04	2,63
9	b	1	KB	1,69	0,04	35,9	1,43	6,2	0,89	1,9	0,26	14,3	1,73	13,5	0,32	16,2	1,63	29,7	1,37	0,56	0,03	2,64
9	b	1	UB	1,69	0,04	35,8	1,36	7,4	3,35	2,0	0,58	9,8	3,34	16,6	0,35	11,8	2,89	28,4	2,91	0,56	0,03	2,63
9	b	2	K	1,72	0,05	34,6	2,04	5,2	2,50	1,9	0,23	14,2	3,34	13,3	0,44	16,1	3,40	29,4	3,12	0,53	0,05	2,63
9	b	2	KB	1,63	0,04	37,8	1,39	6,9	1,64	2,1	0,54	12,0	2,62	16,8	0,37	14,1	2,46	30,9	2,20	0,61	0,03	2,62
9	b	2	UB	1,65	0,06	37,3	2,20	6,5	3,68	1,5	0,51	7,6	2,62	21,7	0,76	9,1	2,38	30,8	2,44	0,60	0,06	2,63
9	c	1	K	1,65	0,04	36,3	1,67	3,6	0,89	3,1	0,33	17,3	1,20	12,3	0,32	20,4	1,46	32,7	1,17	0,57	0,04	2,59
9	c	1	KB	1,60	0,05	38,5	1,94	6,8	2,15	2,7	0,19	14,1	0,80	14,9	0,47	16,8	0,85	31,7	0,75	0,63	0,05	2,60
9	c	1	UB	1,59	0,03	39,2	1,25	5,9	1,59	1,9	0,19	11,8	0,55	19,6	0,40	13,7	0,55	33,3	0,59	0,65	0,03	2,62
10	a	1	K	1,61	0,06	38,3	2,17	4,5	2,27	2,6	0,61	19,3	0,79	11,9	0,43	21,9	0,69	33,8	0,58	0,62	0,06	2,61
10	a	1	KB	1,63	0,03	38,0	1,34	5,9	1,28	3,4	0,62	21,0	0,66	7,7	0,18	24,4	0,81	32,1	0,73	0,61	0,04	2,63
10	a	1	UB	1,58	0,02	40,0	0,90	7,6	1,55	2,7	0,43	16,9	1,43	12,8	0,20	19,6	1,14	32,4	1,15	0,67	0,03	2,63
10	a	2	K	1,65	0,05	36,9	1,83	4,1	2,24	2,4	0,25	18,1	0,75	12,3	0,36	20,5	0,71	32,8	0,76	0,59	0,05	2,62
10	a	2	KB	1,59	0,05	39,6	1,91	6,9	1,63	3,8	0,74	17,2	0,89	11,7	0,36	21,0	0,83	32,7	0,57	0,66	0,05	2,63
10	a	2	UB	1,58	0,04	39,9	1,57	6,7	1,83	2,3	0,28	17,4	0,60	13,5	0,35	19,7	0,54	33,2	0,56	0,67	0,04	2,63
10	b	1	K	1,46	0,09	43,7	3,28	11,5	4,87	4,3	0,42	15,5	0,92	12,4	0,73	19,8	0,95	32,2	1,63	0,78	0,11	2,59
10	b	1	KB	1,60	0,07	38,9	2,56	6,4	2,96	4,3	0,35	17,0	0,36	11,2	0,48	21,3	0,56	32,5	0,66	0,64	0,07	2,62
10	b	1	UB	1,53	0,03	41,6	1,28	8,3	1,00	3,4	0,37	15,8	0,59	14,1	0,31	19,2	0,68	33,3	0,42	0,71	0,04	2,62
10	b	2	K	1,44	0,07	44,6	2,77	12,9	3,27	4,5	0,78	16,4	0,99	10,8	0,55	20,9	0,54	31,7	0,70	0,81	0,09	2,60
10	b	2	KB	1,66	0,03	36,6	0,98	4,0	1,24	3,8	0,24	17,6	0,68	11,2	0,16	21,4	0,70	32,6	0,69	0,58	0,02	2,62
10	b	2	UB	1,51	0,02	42,3	0,88	9,5	1,10	3,5	0,22	15,6	0,52	13,7	0,21	19,1	0,45	32,8	0,45	0,73	0,03	2,62
11	a	1	K	1,42	0,04	46,7	1,48	6,3	1,39	3,3	0,27	22,7	1,56	14,4	0,42	26,0	1,63	40,4	1,37	0,88	0,05	2,66
11	a	1	KB	1,50	0,02	44,3	0,82	7,2	1,17	3,7	1,92	15,9	2,15	17,5	0,28	19,6	0,52	37,1	0,56	0,80	0,03	2,69
11	a	1	UB	1,51	0,01	44,2	0,38	6,5	1,12	2,5	0,30	17,9	0,96	17,3	0,11	20,4	0,78	37,7	0,84	0,79	0,01	2,71
11	a	2	K	1,44	0,03	45,9	1,16	7,2	1,57	2,8	0,26	22,2	0,92	13,7	0,30	25,0	1,11	38,7	1,06	0,85	0,04	2,66
11	a	2	KB	1,54	0,03	42,7	1,17	6,3	1,01	2,8	0,33	18,2	0,74	15,4	0,32	21,0	0,97	36,4	0,76	0,75	0,03	2,69
11	a	2	UB	1,48	0,03	45,3	0,99	8,9	1,19	3,4	0,30	19,2	0,38	13,8	0,25	22,6	0,52	36,4	0,51	0,83	0,03	2,71
11	b	1	K	1,47	0,04	44,9	1,45	7,5	1,29	2,9	0,56	20,7	1,55	13,8	0,37	23,6	1,84	37,4	1,58	0,81	0,05	2,67
11	b	1	KB	1,55	0,02	42,4	0,95	7,3	1,11	3,6	0,59	17,8	0,59	13,7	0,23	21,4	0,61	35,1	0,56	0,73	0,03	2,69
11	b	1	UB	1,50	0,04	44,4	1,30	7,4	1,49	2,8	0,48	17,3	0,48	16,9	0,40	20,1	0,48	37,0	0,44	0,80	0,04	2,70
11	c	1	K	1,49	0,04	43,3	1,46	4,8	1,17	3,1	0,55	18,5	1,10	16,9	0,45	21,6	1,48	38,5	1,16	0,77	0,05	2,63

Fortsetzung A4

S	s	P	T	Ld		GPV		wG		eG		MP		FP		nFK		FK		PZ		df
				MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	
11	c	1	KB																			
11	c	1	UB	1,61	0,04	39,2	1,47	2,0	1,51	1,8	0,29	16,4	1,22	19,0	0,47	18,2	1,28	37,2	1,05	0,64	0,04	2,65
11	c	2	K	1,53	0,03	41,6	1,23	4,1	1,46	2,6	0,26	18,6	0,82	16,3	0,35	21,2	0,75	37,5	0,69	0,71	0,04	2,62
11	c	2	KB																			
11	c	2	UB	1,60	0,04	39,6	1,66	2,8	1,35	1,8	0,26	15,1	0,97	19,9	0,55	16,9	1,12	36,8	0,69	0,66	0,05	2,65
12	a	1	K	1,51	0,03	41,9	1,35	5,8	1,59	3,5	0,39	21,7	0,61	10,9	0,24	25,2	0,39	36,1	0,43	0,72	0,04	2,60
12	a	1	KB	1,55	0,02	40,4	0,85	5,9	0,96	2,7	0,29	20,2	0,59	11,6	0,16	22,9	0,71	34,5	0,64	0,68	0,02	2,60
12	a	1	UB	1,41	0,06	46,1	2,37	11,6	3,01	3,8	0,73	21,0	1,33	9,7	0,43	24,8	1,05	34,5	1,14	0,86	0,09	2,62
12	a	2	K	1,47	0,03	43,7	1,17	7,7	1,69	3,9	0,53	21,6	0,30	10,5	0,22	25,5	0,64	36,0	0,72	0,78	0,04	2,61
12	a	2	KB	1,57	0,03	39,7	1,17	4,2	0,90	2,5	0,20	21,0	0,76	12,0	0,24	23,5	0,77	35,5	0,59	0,66	0,03	2,60
12	a	2	UB	1,48	0,04	43,6	1,47	6,4	2,02	2,9	0,49	19,3	1,07	15,0	0,40	22,2	0,81	37,2	0,89	0,77	0,05	2,62
12	b	1	K	1,55	0,05	40,4	1,90	4,2	2,11	2,3	0,56	22,8	0,99	11,1	0,37	25,1	0,98	36,2	0,91	0,68	0,05	2,60
12	b	1	KB	1,60	0,03	38,8	0,97	4,2	1,40	1,9	0,40	21,5	1,55	11,2	0,19	23,4	1,54	34,6	1,47	0,63	0,03	2,61
12	b	1	UB	1,46	0,03	44,2	0,94	9,2	1,02	3,4	0,20	22,0	0,19	9,6	0,16	25,4	0,25	35,0	0,24	0,79	0,03	2,62
12	b	2	K	1,50	0,04	42,6	1,51	5,8	1,62	3,5	0,88	23,0	0,64	10,3	0,26	26,5	0,73	36,8	0,66	0,74	0,05	2,61
12	b	2	KB	1,58	0,02	39,8	0,92	5,6	0,97	2,5	0,35	20,0	0,35	11,7	0,18	22,5	0,47	34,2	0,42	0,66	0,03	2,62
12	b	2	UB	1,46	0,03	44,5	1,30	9,1	1,52	3,4	0,47	18,9	0,95	13,1	0,32	22,3	0,95	35,4	0,86	0,80	0,04	2,63
13	a	1	K	1,40	0,06	46,1	2,45	10,2	2,51	6,0	1,50	22,5	1,37	7,4	0,33	28,5	0,74	35,9	0,65	0,86	0,08	2,60
13	a	1	KB	1,49	0,05	42,9	2,01	8,0	3,35	7,7	1,49	19,6	3,50	7,6	0,28	27,3	3,69	34,9	3,57	0,75	0,06	2,61
13	a	1	UB	1,50	0,03	43,0	1,03	8,8	1,27	4,5	0,61	19,6	0,72	10,1	0,20	24,1	0,41	34,2	0,46	0,76	0,03	2,63
13	a	2	K	1,38	0,10	47,1	3,67	10,8	3,88	7,4	1,39	21,8	1,19	7,1	0,51	29,2	0,60	36,3	0,54	0,90	0,14	2,61
13	a	2	KB	1,60	0,06	39,3	2,43	3,2	2,60	5,2	1,24	22,5	1,26	8,4	0,32	27,7	0,65	36,1	0,62	0,65	0,07	2,64
13	a	2	UB	1,50	0,02	43,0	0,99	9,0	1,27	3,9	0,53	18,7	0,66	11,4	0,18	22,6	0,33	34,0	0,41	0,76	0,03	2,63
13	b	1	K	1,54	0,04	41,4	1,56	5,2	1,22	4,7	1,40	21,5	1,01	10,0	0,26	26,2	1,12	36,2	0,94	0,71	0,04	2,63
13	b	1	KB	1,46	0,04	44,3	1,71	8,0	1,65	4,4	0,89	17,8	0,38	14,1	0,41	22,2	0,83	36,3	0,61	0,80	0,05	2,62
13	b	1	UB	1,50	0,02	42,7	0,75	6,8	1,11	3,2	0,49	16,7	0,69	16,0	0,21	19,9	0,45	35,9	0,53	0,75	0,02	2,62
13	b	2	K	1,50	0,04	42,8	1,58	6,4	2,10	5,5	1,40	21,6	1,17	9,3	0,26	27,1	0,69	36,4	0,79	0,75	0,05	2,62
13	b	2	KB	1,49	0,03	43,0	1,33	6,4	1,79	4,8	0,66	17,9	0,78	13,9	0,32	22,7	0,53	36,6	0,65	0,76	0,04	2,61
13	b	2	UB	1,51	0,03	42,4	1,09	6,4	1,16	3,2	0,41	18,5	0,50	14,3	0,27	21,7	0,70	36,0	0,60	0,73	0,03	2,62
14	a	1	K	1,46	0,04	44,7	1,32	6,7	1,47	4,0	0,85	25,3	1,35	8,7	0,22	29,3	1,24	38,0	1,17	0,81	0,04	2,64
14	a	1	KB	1,49	0,06	43,7	2,31	8,0	2,38	5,2	0,89	21,8	0,66	8,7	0,37	27,0	0,71	35,7	0,58	0,78	0,07	2,65
14	a	1	UB	1,48	0,06	44,7	1,99	9,3	2,92	4,1	1,30	22,8	0,76	8,5	0,33	26,9	1,45	35,4	1,54	0,81	0,07	2,68
14	a	2	K	1,44	0,04	45,6	1,45	7,3	2,44	4,1	0,39	24,9	1,49	9,3	0,23	29,0	1,17	38,3	1,28	0,84	0,05	2,65
14	a	2	KB	1,59	0,03	40,0	1,14	5,2	1,27	3,7	0,61	20,4	0,80	10,7	0,22	24,1	0,56	34,8	0,52	0,67	0,03	2,65
14	a	2	UB	1,49	0,04	44,1	1,59	8,4	2,10	2,8	0,57	19,7	0,85	13,2	0,39	22,5	0,67	35,7	0,76	0,79	0,05	2,67
14	b	1	K	1,51	0,04	42,9	1,63	5,5	1,53	4,8	0,30	23,3	0,64	9,3	0,27	28,1	0,69	37,4	0,55	0,75	0,05	2,65
14	b	1	KB	1,52	0,03	42,5	1,09	6,9	1,74	5,1	0,59	21,1	0,96	9,4	0,18	26,2	0,53	35,6	0,68	0,74	0,04	2,64
14	b	1	UB	1,44	0,03	46,1	1,17	10,3	1,44	5,0	0,62	20,6	0,48	10,2	0,23	25,6	0,71	35,8	0,70	0,85	0,04	2,67
14	b	2	K	1,51	0,05	42,9	1,87	6,4	2,36	4,1	1,03	23,2	1,54	9,2	0,31	27,3	1,13	36,5	1,14	0,75	0,06	2,65
14	b	2	KB	1,47	0,04	44,5	1,57	8,3	2,02	5,5	0,57	22,7	0,51	8,0	0,23	28,2	0,56	36,2	0,66	0,80	0,05	2,65
14	b	2	UB	1,44	0,06	46,2	2,28	10,3	2,44	3,8	0,83	21,1	0,64	11,0	0,45	24,9	0,48	35,9	0,37	0,86	0,08	2,68
14	c	1	K	1,45	0,04	45,4	1,39	8,1	1,30	6,2	0,73	21,5	0,81	9,6	0,26	27,7	0,67	37,3	0,53	0,83	0,05	2,66
14	c	1	KB	1,48	0,04	44,0	1,71	8,4	2,14	5,1	1,04	21,9	1,01	8,6	0,26	27,0	0,40	35,6	0,55	0,79	0,06	2,64
14	c	1	UB	1,50	0,02	44,0	0,62	7,3	1,08	4,3	0,52	22,4	0,66	10,0	0,11	26,7	0,47	36,7	0,54	0,79	0,02	2,68
14	c	2	K	1,49	0,05	44,0	1,88	7,0	2,24	4,6	1,25	20,5	1,13	11,9	0,40	25,1	0,64	37,0	0,69	0,79	0,06	2,66
14	c	2	KB	1,55	0,05	41,7	1,98	6,5	2,46	3,7	0,76	21,0	0,88	10,5	0,36	24,7	0,23	35,2	0,51	0,71	0,06	2,66
14	c	2	UB	1,46	0,03	45,4	1,06	9,2	1,26	2,8	0,30	19,6	0,38	13,8	0,26	22,4	0,41	36,2	0,41	0,83	0,03	2,67
14	d	1	K	1,46	0,02	44,9	0,77	7,9	1,63	4,0	0,70	24,4	1,16	8,6	0,13	28,4	0,90	37,0	0,98	0,81	0,02	2,65
14	d	1	KB	1,53	0,03	42,4	0,99	6,1	1,03	4,2	1,25	23,2	2,11	8,9	0,16	27,4	1,36	36,3	1,25	0,74	0,03	2,66
14	d	1	UB	1,42	0,02	47,0	0,81	11,0	1,50	4,9	0,45	20,6	0,70	10,5	0,16	25,5	0,88	36,0	0,95	0,89	0,03	2,68
14	d	2	K	1,38	0,05	48,2	2,02	9,3	2,97	5,9	1,13	24,1	1,66	8,9	0,35	30,0	1,61	38,9	1,68	0,93	0,08	2,66
14	d	2	KB	1,44	0,07	45,6	2,48	7,7	2,38	8,5	1,13	20,2	1,05	9,2	0,42	28,7	0,83	37,9	0,59	0,84	0,09	2,65
14	d	2	UB	1,45	0,03	45,9	1,16															

Fortsetzung A4

S	s	P	T	Ld		GPV		wG		eG		MP		FP		nFK		FK		PZ		df
				MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	
14	e	2	UB	1,42	0,02	46,5	0,68	10,1	1,17	6,3	0,66	21,0	0,45	9,1	0,12	27,3	0,52	36,4	0,60	0,87	0,03	2,65
14	f	1	K	1,45	0,03	45,2	1,11	7,9	1,29	6,0	1,58	21,9	1,62	9,4	0,19	27,9	0,58	37,3	0,55	0,83	0,04	2,65
14	f	1	KB	1,49	0,03	43,9	1,16	8,4	1,66	5,3	0,63	21,2	0,84	9,0	0,18	26,5	0,58	35,5	0,68	0,79	0,04	2,66
14	f	1	UB	1,43	0,03	46,5	0,95	11,9	1,30	3,8	1,16	20,8	1,35	10,0	0,18	24,6	0,68	34,6	0,70	0,87	0,03	2,67
14	f	2	K	1,49	0,03	43,9	0,96	7,7	1,05	4,5	0,62	22,2	0,74	9,5	0,16	26,7	0,43	36,2	0,39	0,78	0,03	2,66
14	f	2	KB	1,49	0,06	44,0	2,26	8,6	2,50	4,6	1,12	21,7	1,11	9,1	0,37	26,3	0,34	35,4	0,38	0,79	0,07	2,66
14	f	2	UB	1,43	0,03	46,4	1,20	10,4	1,57	4,6	1,68	21,6	0,97	9,8	0,24	26,2	1,01	36,0	0,99	0,87	0,04	2,67
14	g	1	K	1,63	0,02	36,8	0,84	1,6	0,78	2,5	0,58	21,7	0,49	11,0	0,15	24,2	0,37	35,2	0,29	0,58	0,02	2,58
14	g	1	KB																			
14	g	1	UB	1,62	0,04	37,7	1,35	1,8	1,13	2,6	0,57	20,7	0,76	12,6	0,27	23,3	0,92	35,9	0,75	0,60	0,04	2,60
14	h	1	K	1,40	0,04	45,3	1,48	7,2	2,62	4,1	0,81	24,1	1,88	9,9	0,28	28,2	1,63	38,1	1,71	0,83	0,05	2,56
14	h	1	KB																			
14	h	1	UB	1,45	0,03	44,0	1,21	9,2	1,99	3,3	0,58	21,4	0,74	10,1	0,23	24,7	0,76	34,8	0,91	0,79	0,04	2,59
15	a	1	K	1,43	0,07	46,0	2,49	8,9	4,93	3,2	0,44	25,1	3,54	8,8	0,41	28,3	3,29	37,1	3,41	0,85	0,09	2,65
15	a	1	KB	1,55	0,03	41,7	1,13	5,7	1,00	3,8	1,03	23,4	1,17	8,8	0,17	27,2	0,66	36,0	0,57	0,72	0,03	2,66
15	a	1	UB	1,50	0,02	43,8	0,59	7,0	0,88	4,2	0,60	19,0	0,78	13,6	0,15	23,2	0,63	36,8	0,62	0,78	0,02	2,67
15	a	2	K	1,43	0,07	45,8	2,50	9,4	2,93	3,2	0,44	24,0	1,43	9,2	0,43	27,2	1,49	36,4	1,42	0,85	0,08	2,64
15	a	2	KB	1,57	0,05	41,2	1,73	6,1	1,61	3,8	0,90	21,0	0,65	10,3	0,30	24,8	0,86	35,1	0,69	0,70	0,05	2,67
15	a	2	UB	1,49	0,05	43,7	1,80	7,5	2,11	4,3	1,02	19,8	1,10	12,1	0,41	24,1	0,55	36,2	0,58	0,78	0,06	2,65
15	b	1	K	1,53	0,04	42,3	1,43	6,4	1,26	5,0	0,62	21,2	0,54	9,7	0,24	26,2	0,84	35,9	0,71	0,73	0,04	2,65
15	b	1	KB	1,57	0,04	40,9	1,49	5,0	1,03	4,9	1,08	21,3	0,46	9,7	0,25	26,2	0,79	35,9	0,55	0,70	0,04	2,66
15	b	1	UB	1,45	0,03	46,5	1,08	10,1	1,81	4,3	0,68	18,4	0,96	13,7	0,27	22,7	0,73	36,4	0,89	0,87	0,04	2,71
15	b	2	K	1,55	0,03	41,4	1,12	5,8	1,50	3,9	0,44	21,4	0,72	10,3	0,20	25,3	0,50	35,6	0,56	0,71	0,03	2,64
15	b	2	KB	1,54	0,04	42,1	1,32	6,9	1,65	3,3	1,17	22,9	1,10	9,0	0,20	26,2	0,50	35,2	0,56	0,73	0,04	2,66
15	b	2	UB	1,48	0,03	45,6	0,97	9,5	1,76	2,8	0,41	20,2	1,05	13,1	0,25	23,0	1,31	36,1	1,32	0,84	0,03	2,72
16	a	1	K																			
16	a	1	KB	1,58	0,02	39,8	0,97	2,6	0,84	3,2	0,43	18,1	0,49	15,9	0,24	21,3	0,46	37,2	0,29	0,66	0,03	2,62
16	a	1	UB	1,55	0,02	41,0	0,92	4,2	1,60	3,0	1,09	18,6	0,70	15,2	0,24	21,6	1,32	36,8	1,31	0,70	0,03	2,63
16	b	1	K	1,44	0,06	44,8	2,37	8,8	2,67	6,0	0,62	20,8	0,98	9,2	0,40	26,8	0,78	36,0	0,78	0,81	0,08	2,61
16	b	1	KB	1,59	0,08	39,6	2,92	4,2	3,53	5,1	1,26	20,7	1,31	9,6	0,47	25,8	0,58	35,4	0,81	0,66	0,08	2,63
16	b	1	UB	1,49	0,03	43,4	1,03	8,4	1,10	5,8	0,53	20,4	0,29	8,8	0,17	26,2	0,52	35,0	0,47	0,77	0,03	2,63
17	a	1	K	1,53	0,04	41,1	1,60	4,4	1,49	7,7	1,38	21,1	1,15	7,9	0,22	28,8	0,80	36,7	0,71	0,70	0,05	2,60
17	a	1	KB	1,45	0,04	44,3	1,52	8,0	1,81	7,3	0,96	20,8	0,78	8,2	0,22	28,1	0,45	36,3	0,51	0,80	0,05	2,60
17	a	1	UB	1,44	0,03	44,3	1,10	9,3	1,52	3,9	0,45	16,9	0,67	14,2	0,28	20,8	0,48	35,0	0,60	0,80	0,04	2,59
18	a	1	K	1,55	0,05	41,1	2,07	5,7	1,98	3,7	0,69	11,0	0,39	20,7	0,79	14,7	2,46	35,4	0,98	0,70	0,06	2,63
18	a	1	KB	1,53	0,05	42,6	1,81	7,2	1,39	4,1	0,76	10,5	0,33	20,8	0,91	14,6	2,15	35,4	1,15	0,74	0,06	2,67
18	a	1	UB	1,43	0,02	45,9	0,81	11,6	1,26	3,9	0,40	11,2	0,17	19,2	0,89	15,1	0,98	34,3	0,89	0,85	0,03	2,64
19	a	1	K	1,40	0,03	46,3	1,01	1,4	1,21	2,2	0,32	18,3	0,57	24,4	0,46	20,5	0,60	44,9	0,48	0,86	0,04	2,61
19	a	1	KB	1,39	0,03	47,0	1,03	4,7	1,69	2,2	0,24	17,7	1,09	22,4	0,43	19,9	0,98	42,3	1,03	0,89	0,04	2,62
19	a	1	UB	1,40	0,02	46,9	0,94	8,2	1,47	2,9	0,29	17,9	0,52	17,9	0,32	20,8	0,50	38,7	0,66	0,88	0,03	2,64
19	a	2	K	1,37	0,03	47,1	1,12	2,7	1,62	2,0	0,14	17,9	0,56	24,5	0,52	19,9	0,59	44,4	0,70	0,89	0,04	2,59
19	a	2	KB	1,39	0,03	46,9	1,01	4,7	1,47	1,8	0,13	17,0	0,48	23,4	0,44	18,8	0,51	42,2	0,62	0,88	0,04	2,62
19	a	2	UB	1,39	0,03	47,3	1,00	8,7	1,33	2,4	0,19	16,7	0,37	19,5	0,37	19,1	0,38	38,6	0,47	0,90	0,04	2,64
20	a	1	K	1,42	0,05	45,1	2,05	2,8	1,63	3,0	0,43	23,1	1,39	16,2	0,59	26,1	1,78	42,3	1,35	0,81	0,07	2,59
20	a	1	KB	1,48	0,06	42,9	2,09	0,3	0,85	0,6	0,85	12,0	2,26	30,0	1,10	12,6	2,86	42,6	1,82	0,73	0,07	2,59
20	a	1	UB																			
20	a	2	K	1,39	0,06	46,4	2,22	3,6	1,88	3,2	0,32	22,6	1,37	17,0	0,71	25,8	1,68	42,8	1,19	0,86	0,08	2,59
20	a	2	KB	1,55	0,03	40,6	1,17	1,1	1,62	1,3	0,78	8,2	2,38	30,0	0,58	9,5	2,26	39,5	1,90	0,66	0,03	2,61
20	a	2	UB	1,54	0,04	41	1,68	0,4	0,85	0,6	0,63	11	3,18	29	0,82	11	2,92	40	2,14	0,7	0,05	2,59
20	b	1	K	1,46	0,04	43,7	1,64	3,8	1,64	2,6	0,22	22,8	0,55	14,5	0,42	25,4	0,69	39,9	0,49	0,77	0,05	2,59
20	b	1	KB	1,53	0,02	41,2	0,72	3,6	0,95	1,9	0,17	15,9	1,38	19,8	0,26	17,8	1,48	37,6	1,29	0,69	0,02	2,60
20	b	1	UB	1,54	0,02	40,6	0,61	0,0	0,13	0,3	0,63	8,5	0,76	31,8	0,33	8,8	0,97	40,6	0,67	0,67	0,02	2,59
20	b	2	K	1,45	0,07	43,9	2,69	3,2	2,05	3,1	0,64	21,6	1,48	16,0	0,76	24,7	2,10	40,7	1,52	0,77	0,09	2,58
20	b	2	KB	1,50	0,02	42,6	0,87	0,5	0,98	0,9	0,90	16,6	2,32	24,6	0,37	17,5	1,82	42,1	1,51	0,73	0,03	2,61
20	b	2	UB	1,39	0,07	46,4	2,76	0,0	0,00	0,8	1,40	17,9	3,08	27,7	1,42	18,7	4,18	46,4	2,76	0,85	0,10	2,59
21	a	1	K	1,21	0,04	52,9	1,51	11,3	3,03	3,8	0,53	24,3	1,53	13,5	0,44	28,1	1,90	41,6	2,05	1,12	0,07	2,57
21	a	1	KB	1,41	0,04	45,3	1,53	6,7	1,50	2,9	0,40	22,0	1,66	13,7	0,39	24,9	1,91	38,6	1,66	0,83	0,05	2,58
21	a	1	UB	1,35	0,03	47,7	1,28	4,0	1,33	2,2	0,20	23,1	2,24	18,4	0,46	25,3	2,15	43,7	1,80	0,91	0,05	2,58

Fortsetzung A4

S	s	P	T	Ld		GPV		wG		eG		MP		FP		nFK		FK		PZ		df
				MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	
21	a	2	K	1,21	0,04	52,7	1,55	10,5	2,78	4,2	0,42	24,5	1,49	13,5	0,46	28,7	1,78	42,2	1,86	1,12	0,07	2,56
21	a	2	KB	1,40	0,03	46,0	1,12	2,3	1,00	2,2	0,26	16,2	1,90	25,3	0,54	18,4	2,00	43,7	1,55	0,85	0,04	2,59
21	a	2	UB	1,30	0,03	49,7	1,16	1,2	0,70	1,7	0,56	21,2	1,31	25,6	0,59	22,9	1,44	48,5	0,93	0,99	0,05	2,58
21	b	1	K	1,35	0,05	47,6	2,01	5,4	2,47	2,6	0,29	24,2	0,94	15,4	0,58	26,8	1,01	42,2	1,00	0,91	0,07	2,58
21	b	1	KB	1,34	0,05	48,7	1,81	3,2	0,84	1,8	0,23	19,1	2,44	24,6	0,86	20,9	2,62	45,5	1,81	0,95	0,07	2,61
21	b	1	UB	1,38	0,03	47,0	1,01	1,2	0,70	1,5	0,25	15,8	1,12	28,5	0,56	17,3	1,28	45,8	0,82	0,89	0,04	2,60
21	b	2	K	1,37	0,05	46,7	1,84	5,2	2,35	2,1	0,30	24,9	0,84	14,5	0,52	27,0	0,76	41,5	0,84	0,88	0,06	2,57
21	b	2	KB	1,48	0,02	43,2	0,96	4,5	1,81	1,6	0,24	11,9	2,87	25,2	0,44	13,5	2,76	38,7	2,42	0,76	0,03	2,61
21	b	2	UB	1,42	0,07	45,3	2,72	4,6	2,63	1,7	0,39	21,2	3,76	17,8	0,90	22,9	3,55	40,7	2,96	0,83	0,09	2,60
22	a	1	K	1,23	0,05	49,1	1,98	0,7	1,47	0,8	0,67	20,1	1,72	27,5	1,06	20,9	2,07	48,4	1,20	0,97	0,08	2,42
22	a	1	KB																			
22	a	1	UB																			
22	a	2	K	1,21	0,02	49,8	0,86	1,2	1,26	1,1	0,48	20,4	0,68	27,1	0,42	21,5	0,59	48,6	0,62	0,99	0,03	2,41
22	a	2	KB																			
22	a	2	UB																			
23	a	1	K	1,50	0,05	41,6	1,94	4,1	2,02	2,9	0,35	20,7	0,65	13,9	0,48	23,6	0,85	37,5	0,70	0,71	0,06	2,57
23	a	1	KB	1,53	0,02	40,4	0,81	5,9	1,30	2,3	0,24	14,2	0,90	18,0	0,25	16,5	0,75	34,5	0,79	0,68	0,02	2,57
23	a	1	UB	1,44	0,06	43,8	2,56	1,0	1,87	1,0	0,85	11,4	5,72	30,4	1,38	12,4	5,02	42,8	3,75	0,78	0,08	2,56
23	a	2	K	1,53	0,04	40,2	1,39	1,9	1,30	2,5	0,32	19,3	0,91	16,5	0,39	21,8	1,03	38,3	0,81	0,67	0,04	2,56
23	a	2	KB	1,54	0,03	40,2	1,12	3,1	0,67	2,1	0,22	13,6	0,95	21,4	0,40	15,7	1,03	37,1	0,68	0,67	0,03	2,58
23	a	2	UB	1,34	0,02	47,9	0,94	0,0	0,00	0,0	0,00	16,2	1,87	31,7	0,79	16,2	1,87	47,9	1,09	0,92	0,04	2,57

A5: Geometrische Mittelwerte (gM) und Häufigkeitsverteilung (%) der Permeabilitätswerte für Wasser (kf) und Luft (k₀₀ bzw. PL) der einzelnen Standorte (S), Schläge (s), Profilgruben (P) und Untersuchungstiefen (T) ■ = nicht beprobte Untersuchungstiefen

S	s	P	T	kf (%)						k ₀₀ (%)						PL (%)			
				gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	<1	1-2	>2
1	a	1	K	513	0	0	0	33	67	41	11	0	22	56	11	17	0	0	100
1	a	1	KB	195	0	10	10	60	20	12	40	30	30	0	0	1	100	0	0
1	a	1	UB	437	0	0	0	40	60	28	0	30	60	10	0	2	0	67	33
1	a	2	K	302	0	30	10	20	40	13	40	10	10	30	10	12	0	0	100
1	a	2	KB	295	0	0	10	70	20	9	60	30	0	10	0	0	100	0	0
1	a	2	UB	427	0	0	0	40	60	30	0	10	80	10	0	1	0	67	33
1	b	1	K	363	0	0	10	30	60	36	0	10	70	20	0	5	0	33	67
1	b	1	KB	174	0	0	10	90	0	7	70	30	0	0	0	0	100	0	0
1	b	1	UB	282	0	0	0	70	30	28	0	20	80	0	0	2	0	33	67
1	b	2	K	1288	0	0	0	0	100	68	0	11	0	56	33	7	0	0	100
1	b	2	KB	269	0	0	0	70	30	11	50	40	10	0	0	0	100	0	0
1	b	2	UB	200	0	0	10	80	10	22	0	40	60	0	0	1	0	100	0
2	a	1	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	a	1	KB	191	0	0	20	60	20	9	80	20	0	0	0	0	100	0	0
2	a	1	UB	562	0	0	0	5	95	14	15	80	5	0	0	1	50	50	0
2	a	2	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	a	2	KB	204	0	0	0	100	0	6	100	0	0	0	0	1	100	0	0
2	a	2	UB	457	0	0	0	15	85	14	15	85	0	0	0	1	50	50	0
2	b	1	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	b	1	KB	37	20	30	20	30	0	9	60	20	20	0	0	0	100	0	0
2	b	1	UB	224	0	0	56	22	22	17	0	78	22	0	0	0	100	0	0
2	b	2	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	b	2	KB	186	0	10	10	50	30	19	10	50	20	20	0	0	100	0	0
2	b	2	UB	427	0	0	10	30	60	17	20	50	30	0	0	0	100	0	0
3	a	1	K	589	0	0	10	30	60	59	0	10	20	50	20	4	0	0	100
3	a	1	KB	617	0	10	30	10	50	22	40	10	20	10	20	1	33	33	33
3	a	1	UB	1288	0	0	0	30	70	28	0	50	30	0	20	2	0	67	33
3	a	2	K	550	0	0	0	30	70	72	0	0	10	60	30	4	0	33	67
3	a	2	KB	234	10	0	20	40	30	13	60	20	10	0	10	1	33	33	33
3	a	2	UB	813	0	0	0	20	80	25	0	70	10	10	10	2	0	67	33
3	b	1	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	b	1	KB	135	0	30	50	0	20	8	70	30	0	0	0	1	100	0	0
3	b	1	UB	759	0	0	0	0	100	22	0	40	60	0	0	2	0	67	33
3	b	1	tUB	309	0	0	0	60	40	15	10	90	0	0	0	2	0	67	33
3	b	2	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	b	2	KB	93	10	10	30	30	20	12	40	40	20	0	0	1	33	33	33
3	b	2	UB	1230	0	0	0	0	100	22	0	50	50	0	0	2	0	100	0
3	b	2	tUB	550	0	0	0	30	70	15	10	90	0	0	0	2	0	100	0
4	a	1	K	204	0	0	0	80	20	8	70	30	0	0	0	1	100	0	0
4	a	1	KB	331	0	0	0	50	50	13	20	80	0	0	0	1	67	33	0
4	a	1	UB	468	0	0	0	0	100	23	0	30	70	0	0	2	0	100	0
4	a	2	K	162	0	0	10	80	10	8	80	20	0	0	0	1	67	33	0
4	a	2	KB	490	0	0	0	20	80	15	0	100	0	0	0	1	33	67	0
4	a	2	UB	389	0	0	0	10	90	19	0	90	10	0	0	2	0	100	0
5	a	1	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	a	1	KB	56	0	30	60	10	0	4	90	10	0	0	0	0	100	0	0
5	a	1	UB	240	0	0	0	90	10	7	90	10	0	0	0	0	100	0	0
5	a	2	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	a	2	KB	724	0	0	0	40	60	11	40	60	0	0	0	0	100	0	0
5	a	2	UB	447	0	0	0	44	56	10	56	44	0	0	0	0	100	0	0
6	a	1	K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
6	a	1	KB	191	0	0	0	100	0	6	100	0	0	0	0	1	100	0	0
6	a	1	UB	355	0	0	0	40	60	10	50	50	0	0	0	1	67	33	0
6	a	1	tUB	85	0	0	80	20	0	7	90	10	0	0	0	0	100	0	0

Fortsetzung A5

S	s	P	T	kf (%)						k ₀₀ (%)						PL (%)			
				gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	<1	1-2	>2
6	a	2	K																
6	a	2	KB	204	0	0	20	50	30	8	90	10	0	0	0	1	100	0	0
6	a	2	UB	302	0	0	0	60	40	10	40	60	0	0	0	1	100	0	0
6	a	2	tUB	110	0	0	20	80	0	5	100	0	0	0	0	0	100	0	0
7	a	1	K	135	10	50	0	0	40	45	0	10	40	50	0	1	33	67	0
7	a	1	KB	41	10	40	20	20	10	45	0	20	30	40	10	0	100	0	0
7	a	1	UB	11	50	20	10	20	0	26	0	40	40	20	0	0	100	0	0
7	b	1	K	49	20	40	10	0	30	87	10	0	0	30	60	1	67	0	33
7	b	1	KB	59	30	20	20	10	20	93	0	10	0	20	70	0	100	0	0
7	b	1	UB	60	30	20	0	20	30	22	10	40	40	10	0	0	100	0	0
8	a	1	K																
8	a	1	KB	28	30	20	40	0	10	8	80	10	0	10	0	0	100	0	0
8	a	1	UB	46	10	60	20	0	10	21	30	40	10	0	20	0	100	0	0
8	a	2	K																
8	a	2	KB	18	40	40	0	0	20	10	70	0	10	20	0	0	100	0	0
8	a	2	UB	44	30	30	20	10	10	19	30	40	10	10	10	1	33	67	0
8	b	1	K																
8	b	1	KB	25	20	20	50	10	0	7	60	20	20	0	0	0	100	0	0
8	b	1	UB	98	10	20	30	10	30	14	30	40	30	0	0	4	0	0	100
8	b	2	K																
8	b	2	KB	15	30	30	30	10	0	7	60	30	10	0	0	1	100	0	0
8	b	2	UB	110	20	20	10	20	30	12	40	30	10	10	10	12	0	0	100
9	a	1	K																
9	a	1	KB	17	50	30	0	10	10	3	90	0	10	0	0	1	33	67	0
9	a	1	UB	34	50	20	10	0	20	7	60	20	10	10	0	6	0	0	100
9	a	2	K																
9	a	2	KB	12	30	40	10	10	10	8	50	50	0	0	0	3	0	33	67
9	a	2	UB	59	50	10	10	0	30	11	50	20	0	20	10	4	0	0	100
9	b	1	K	117	20	30	20	0	30	19	40	20	10	20	10	2	0	33	67
9	b	1	KB	74	20	40	10	0	30	12	50	30	10	10	0	1	67	33	0
9	b	1	UB	49	20	40	10	10	20	15	30	40	20	0	10	2	0	50	50
9	b	2	K	204	20	20	0	10	50	25	30	30	0	30	10	0	100	0	0
9	b	2	KB	76	30	20	0	10	40	26	20	30	20	10	20	1	67	33	0
9	b	2	UB	48	50	10	0	10	30	20	50	0	10	10	30	9	0	0	100
9	c	1	K	72	10	30	30	0	30	13	30	40	30	0	0				
9	c	1	KB	71	30	30	0	10	30	18	40	20	10	10	20				
9	c	1	UB	3548	0	10	0	10	80	81	10	10	10	10	60				
10	a	1	K	27	20	60	10	0	10	8	70	30	0	0	0	0	100	0	0
10	a	1	KB	17	50	30	0	0	20	5	80	0	10	10	0	1	33	67	0
10	a	1	UB	24	40	30	0	10	20	16	20	50	20	10	0	8	0	0	100
10	a	2	K	33	30	40	10	0	20	4	80	10	10	0	0	0	100	0	0
10	a	2	KB	79	20	30	10	0	40	17	40	0	50	10	0	1	67	0	33
10	a	2	UB	224	0	50	0	10	40	21	40	20	10	20	10	6	0	0	100
10	b	1	K	83	0	33	33	0	33	11	56	11	22	11	0	5	0	33	67
10	b	1	KB	32	30	40	10	0	20	9	60	20	20	0	0	2	33	33	33
10	b	1	UB	27	50	20	10	0	20	8	70	10	20	0	0	8	0	0	100
10	b	2	K	295	0	20	10	20	50	26	10	30	40	20	0	14	0	0	100
10	b	2	KB	51	30	20	10	10	30	4	100	0	0	0	0	0	100	0	0
10	b	2	UB	50	20	40	10	10	20	12	50	30	20	0	0	3	0	33	67
11	a	1	K	107	20	20	0	10	50	112	0	0	20	0	80	9	0	0	100
11	a	1	KB	83	20	30	10	10	30	32	10	0	60	30	0	2	0	33	67
11	a	1	UB	69	30	20	20	0	30	18	50	20	0	20	10	2	0	33	67
11	a	2	K	832	0	10	10	10	70	83	0	0	0	70	30	4	0	33	67
11	a	2	KB	170	20	20	10	10	40	32	20	10	40	20	10	3	0	33	67

Fortsetzung A5

S	s	P	T	kf (%)						k ₀₀ (%)						PL (%)			
				gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	<1	1-2	>2
11	a	2	UB	60	20	30	20	0	30	18	10	70	10	10	0	9	0	0	100
11	b	1	K	145	11	0	44	11	33	30	11	33	22	22	11	1	50	50	0
11	b	1	KB	724	0	0	10	20	70	34	0	20	60	20	0	1	67	33	0
11	b	1	UB	65	20	30	30	0	20	11	60	10	10	20	0	2	33	33	33
11	c	1	K	89	20	20	20	0	40	27	30	0	30	40	0	0	100	0	0
11	c	1	KB																
11	c	1	UB	12	40	50	0	10	0	8	70	20	0	0	10	0	100	0	0
11	c	2	K	17	40	40	10	0	10	13	40	40	20	0	0	0			
11	c	2	KB																
11	c	2	UB	5	90	10	0	0	0	4	70	20	10	0	0	0			
12	a	1	K	29	30	60	0	0	10	15	30	40	20	10	0	0	100	0	0
12	a	1	KB	18	30	50	20	0	0	15	20	60	20	0	0	0	100	0	0
12	a	1	UB	170	10	0	40	10	40	50	0	20	20	40	20	5	0	33	67
12	a	2	K	34	50	10	10	0	30	20	10	50	20	20	0	0	100	0	0
12	a	2	KB	21	40	40	0	10	10	11	40	50	0	10	0	0	100	0	0
12	a	2	UB	36	40	20	10	10	20	16	30	30	30	0	10	1	33	33	33
12	b	1	K	23	30	30	30	10	0	31	0	40	30	30	0	0	100	0	0
12	b	1	KB	59	10	20	50	10	10	22	20	40	20	10	10	0	100	0	0
12	b	1	UB	269	0	30	10	10	50	71	0	0	30	40	30	2	0	67	33
12	b	2	K	32	20	60	0	10	10	17	30	40	20	10	0	0	100	0	0
12	b	2	KB	15	40	50	10	0	0	14	20	80	0	0	0	0	100	0	0
12	b	2	UB	93	0	50	10	20	20	35	0	30	40	10	20	2	0	67	33
13	a	1	K	76	10	50	10	0	30	21	20	30	20	30	0	13	0	0	100
13	a	1	KB	26	10	60	20	10	0	9	50	40	10	0	0	0	100	0	0
13	a	1	UB	95	10	40	10	0	40	22	20	40	10	30	0	5	0	0	100
13	a	2	K	708	0	10	30	0	60	14	20	60	20	0	0	16	0	0	100
13	a	2	KB	21	33	56	0	0	11	4	89	0	0	11	0	1	67	33	0
13	a	2	UB	151	20	20	0	10	50	22	0	50	30	20	0	2	0	33	67
13	b	1	K	17	40	40	10	0	10	13	40	50	0	10	0	1	25	50	25
13	b	1	KB	15	30	60	10	0	0	14	20	60	20	0	0	1	75	0	25
13	b	1	UB	21	50	30	0	0	20	17	20	50	20	10	0	3	0	0	100
13	b	2	K	162	10	30	20	10	30	25	10	50	20	10	10	2	0	50	50
13	b	2	KB	30	20	60	10	0	10	14	30	60	0	0	10	1	67	33	0
13	b	2	UB	42	30	40	10	0	20	18	10	60	20	10	0	4	0	0	100
14	a	1	K	27	50	25	0	0	25	36	0	25	50	13	13	0	100	0	0
14	a	1	KB	11	25	75	0	0	0	21	25	0	63	13	0	2	50	0	50
14	a	1	UB	27	25	50	13	13	0	24	13	38	25	25	0	2	50	0	50
14	a	2	K	59	13	50	13	13	13	56	0	13	38	25	25	0	100	0	0
14	a	2	KB	10	38	63	0	0	0	6	63	13	25	0	0	0	100	0	0
14	a	2	UB	89	13	25	25	13	25	43	0	25	38	25	13	3	0	50	50
14	b	1	K	8	50	50	0	0	0	4	63	38	0	0	0	0	100	0	0
14	b	1	KB	112	0	38	25	0	38	35	13	25	38	0	25	2	0	50	50
14	b	1	UB	78	13	38	13	13	25	69	0	0	25	50	25	9	0	0	100
14	b	2	K	13	25	75	0	0	0	4	75	25	0	0	0	0	100	0	0
14	b	2	KB	21	13	63	25	0	0	66	0	25	25	13	38	2	50	0	50
14	b	2	UB	39	38	25	13	0	25	41	13	25	25	25	13	9	0	0	100
14	c	1	K	35	25	38	13	13	13	17	13	50	25	13	0	0	100	0	0
14	c	1	KB	13	38	63	0	0	0	63	13	0	38	13	38	2	0	50	50
14	c	1	UB	18	13	63	25	0	0	54	0	0	63	13	25	1	0	100	0
14	c	2	K	12	38	63	0	0	0	5	63	38	0	0	0	0	100	0	0
14	c	2	KB	22	13	75	0	0	13	14	38	25	13	13	13	2	0	50	50
14	c	2	UB	129	13	13	13	38	25	50	0	0	50	25	25	4	0	0	100
14	d	1	K	31	25	50	0	13	13	8	50	25	0	25	0	0	67	0	33
14	d	1	KB	50	13	50	13	0	25	5	50	38	13	0	0	0	67	33	0

Fortsetzung A5

S	s	P	T	kf (%)						k ₀₀ (%)						PL (%)			
				gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	<1	1-2	>2
14	d	1	UB	589	0	13	0	25	63	76	0	0	13	75	13	4	0	33	67
14	d	2	K	100	13	38	25	0	25	13	50	25	13	13	0	1	67	0	33
14	d	2	KB	25	25	13	63	0	0	12	50	25	13	13	0	1	67	33	0
14	d	2	UB	42	13	25	38	13	13	31	0	13	75	13	0	5	0	0	100
14	e	1	K	10	63	25	13	0	0	4	75	13	13	0	0	0	100	0	0
14	e	1	KB	17	25	63	13	0	0	24	13	25	50	13	0	1	67	0	33
14	e	1	UB	87	0	25	25	25	25	30	0	13	75	13	0	3	0	0	100
14	e	2	K	71	0	50	38	0	13	12	38	38	13	13	0	1	67	33	0
14	e	2	KB	37	0	38	63	0	0	19	50	0	25	25	0	2	0	67	33
14	e	2	UB	81	13	38	25	13	13	43	0	0	63	38	0	5	0	0	100
14	f	1	K	25	13	50	25	13	0	4	75	0	13	0	13	0	67	0	33
14	f	1	KB	28	25	63	0	0	13	5	63	25	13	0	0	1	67	33	0
14	f	1	UB	1023	0	13	0	25	63	78	0	0	25	50	25	6	0	0	100
14	f	2	K	28	38	38	0	13	13	7	75	0	13	0	13	0	100	0	0
14	f	2	KB	47	38	25	13	0	25	12	50	0	25	13	13	0	100	0	0
14	f	2	UB	115	0	38	38	0	25	28	0	38	38	25	0	2	0	75	25
14	g	1	K	8	60	30	10	0	0	1	100	0	0	0	0	0	100	0	0
14	g	1	KB																
14	g	1	UB	12	60	30	0	10	0	2	100	0	0	0	0	0	100	0	0
14	h	1	K	28	38	38	13	0	13	5	75	25	0	0	0				
14	h	1	KB																
14	h	1	UB	110	13	50	0	0	38	10	63	0	38	0	0				
15	a	1	K	34	0	50	38	13	0	54	0	0	50	38	13	35	0	0	100
15	a	1	KB	19	13	75	13	0	0	20	38	13	13	38	0	0	67	33	0
15	a	1	UB	21	38	38	25	0	0	17	25	38	25	13	0	1	0	100	0
15	a	2	K	537	13	0	25	0	63	56	0	13	25	38	25	31	0	0	100
15	a	2	KB	42	25	50	13	0	13	43	0	0	75	13	13	0	100	0	0
15	a	2	UB	76	13	50	13	0	25	51	25	0	38	13	25	2	0	67	33
15	b	1	K	85	25	25	25	0	25	21	13	50	13	13	13	0	100	0	0
15	b	1	KB	13	63	25	0	0	13	15	63	0	13	25	0	1	67	33	0
15	b	1	UB	209	13	38	0	0	50	28	13	13	50	25	0	2	0	33	67
15	b	2	K	46	13	63	0	0	25	51	0	13	50	13	25	0	100	0	0
15	b	2	KB	56	13	38	25	13	13	26	0	50	25	25	0	0	100	0	0
15	b	2	UB	22	25	38	25	0	13	52	0	13	38	25	25	2	0	100	0
16	a	1	K																
16	a	1	KB	35	50	0	20	0	30	10	50	40	10	0	0	1	67	33	0
16	a	1	UB	32	35	25	15	5	20	13	45	15	30	5	5	2	14	57	29
16	b	1	K	55	20	30	0	40	10	30	0	40	40	20	0	9	0	0	100
16	b	1	KB	7	56	44	0	0	0	9	44	11	22	22	0				
16	b	1	UB	126	20	20	10	10	40	26	30	20	10	40	0				
17	a	1	K	20	60	0	10	10	20	5	70	0	10	20	0	0	75	0	25
17	a	1	KB	158	0	30	20	10	40	36	0	40	30	10	20	3	25	0	75
17	a	1	UB	676	0	10	10	10	70	63	0	0	50	20	30	11	0	0	100
18	a	1	K	62	10	50	10	0	30	14	40	20	10	30	0	2	33	0	67
18	a	1	KB	589	0	20	0	30	50	33	20	20	20	10	30	1	100	0	0
18	a	1	UB	1380	0	10	10	10	70	81	0	0	20	40	40	6	0	0	100
19	a	1	K	10	50	30	0	20	0	8	60	10	20	10	0	2	0	67	33
19	a	1	KB	17	50	20	10	0	20	10	50	20	0	30	0	5	0	0	100
19	a	1	UB	83	20	40	0	10	30	32	10	20	40	20	10	5	0	0	100
19	a	2	K	59	20	20	30	20	10	19	20	20	30	30	0	3	0	0	100
19	a	2	KB	38	50	20	0	0	30	9	70	10	0	20	0	6	0	0	100
19	a	2	UB	229	30	0	0	0	70	36	10	10	50	20	10	7	0	0	100
20	a	1	K	295	0	20	10	30	40	41	10	10	30	40	10	8	0	33	67

Fortsetzung A5

S	s	P	T	kf (%)						k ₀₀ (%)						PL (%)				
				gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch	gM	<1	1-2	>2	
20	a	1	KB	0	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	0	0
20	a	1	UB																	
20	a	2	K	100	20	10	0	30	40	62	0	0	20	50	30	2	33	33	33	
20	a	2	KB	0	100	0	0	0	0	4	50	40	0	10	0	0	100	0	0	
20	a	2	UB	0	100	0	0	0	0	1	90	10	0	0	0	1	67	33	0	
20	b	1	K	174	10	20	20	10	40	26	10	10	70	10	0	1	33	33	33	
20	b	1	KB	0	100	0	0	0	0	12	40	20	30	0	10	0	100	0	0	
20	b	1	UB	0	100	0	0	0	0	1	100	0	0	0	0	1	100	0	0	
20	b	2	K	174	0	40	10	20	30	55	0	10	30	40	20	1	50	50	0	
20	b	2	KB	0	100	0	0	0	0	2	78	11	0	11	0	1	100	0	0	
20	b	2	UB	0	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	67	33	0	
21	a	1	K	1905	0	0	0	0	100	155	0	0	0	0	100	13	0	33	67	
21	a	1	KB	126	20	10	20	10	40	27	10	40	20	20	10	1	67	0	33	
21	a	1	UB	41	30	30	0	10	30	9	60	10	30	0	0	1	67	33	0	
21	a	2	K	1096	0	0	0	20	80	69	0	0	20	50	30	10	0	0	100	
21	a	2	KB	166	20	10	0	20	50	19	30	20	30	20	0	1	33	67	0	
21	a	2	UB	10	50	30	10	0	10	3	80	10	10	0	0	2	0	33	67	
21	b	1	K	661	10	0	20	0	70	48	10	10	10	50	20	1	33	67	0	
21	b	1	KB	37	40	10	0	20	30	5	70	20	0	0	10	2	0	33	67	
21	b	1	UB	11	40	60	0	0	0	1	100	0	0	0	0	5	0	33	67	
21	b	2	K	501	0	10	20	0	70	26	30	0	20	30	20	4	33	0	67	
21	b	2	KB	102	40	0	10	0	50	13	40	30	20	10	0	2	33	0	67	
21	b	2	UB	110	40	10	0	0	50	14	50	20	10	20	0	6	0	0	100	
22	a	1	K	5	86	0	14	0	0	0	100	0	0	0	0					
22	a	1	KB																	
22	a	1	UB																	
22	a	2	K	4	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0					
22	a	2	KB																	
22	a	2	UB																	
23	a	1	K	63	10	40	10	10	30	19	40	20	20	10	10	1	67	33	0	
23	a	1	KB	10	60	10	10	10	10	18	10	60	20	10	0	5	0	0	100	
23	a	1	UB	11	80	0	0	10	10	1	80	10	10	0	0	3	0	0	100	
23	a	2	K	14	40	40	10	0	10	8	60	10	30	0	0	7	0	0	100	
23	a	2	KB	71	40	20	0	0	40	13	50	20	20	0	10	2	0	100	0	
23	a	2	UB	6	80	20	0	0	0	0	100	0	0	0	0	1	33	33	33	

A6: Gefügeform (ein=einzel, koh=kohärent, kit=kitt, pol=polyeder, sub=subpolyeder, krü=krümel, pris= prismen), Scherparameter c und phi, arithmetische Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (s) der gemessenen Vorbelastung (Pv) und modellierten Vorbelastung nach Lebert (Le), DVWK, Nissen (Ni) und DIN V 19688 sowie Lagerungsdichte (Ld), Gesamtporenvolumen (GPV), weite Grobporen (wG) und nutzbare Feldkapazität (nFK) gemessen an 236 cm³ Stechzylinder der Standorte (S), Schläge (s), Profilgruben (P) und Untersuchungstiefen (T) ■ = nicht beprobte Untersuchungstiefen

S	s	P	T	pF	c	phi	Pv		Le	DVWK	Ni	DIN V	Ld	GPV	wG	nFK
					geschätzt *		MW	s	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
1	a	1	K	1,8	■	■	55	28	■	■	■	■	1,28	48,9	18,8	24,0
				2,5			58	11					1,30	48,2	27,2	14,9
1	a	1	KB	1,8	■	■	142	13	■	■	■	■	1,31	48,0	13,8	28,7
				2,5			183	25					1,32	47,8	27,6	14,7
1	a	1	UB	1,8	8	26	127	15	109	109	77	0	1,47	43,5	19,6	20,5
				2,5	12	28	148	32	82	82	57	■	1,36	48,0	31,1	13,6
1	a	2	K	1,8	■	■	79	47	■	■	■	■	1,37	45,2	11,6	27,5
				2,5			150	14					1,40	44,0	23,5	14,5
1	a	2	KB	1,8	■	■	95	14	■	■	■	■	1,37	45,8	17,0	23,2
				2,5			142	19					1,40	44,6	28,5	10,5
1	a	2	UB	1,8	8	26	130	■	81	81	73	0	1,41	45,8	21,4	21,0
				2,5	12	28	113	18	138	138	58	■	1,40	46,5	34,8	8,3
1	b	1	K	1,8	■	■	30	5	■	■	■	■	1,30	48,4	20,3	22,1
				2,5			76	11					1,33	47,6	30,6	11,0
1	b	1	KB	1,8	■	■	130	28	■	■	■	■	1,44	44,1	16,4	22,0
				2,5			140	14					1,38	45,9	30,3	9,9
1	b	1	UB	1,8	8	30	113	4	66	66	73	0	1,38	46,9	24,0	19,9
				2,5	10	32	160	■	136	136	77	■	1,39	46,6	36,3	7,3
1	b	2	K	1,8	■	■	73	4	■	■	■	■	1,37	45,8	15,5	24,4
				2,5			40	■					1,18	53,2	37,0	10,2
1	b	2	KB	1,8	■	■	112	0	■	■	■	■	1,43	44,3	20,9	17,7
				2,5			123	8					1,44	43,9	32,2	6,0
1	b	2	UB	1,8	8	30	140	0	122	122	81	17	1,51	42,3	20,2	19,1
				2,5	10	32	163	18	165	165	80	■	1,48	43,6	32,7	7,9
2	a	1	K	1,8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				2,5												
2	a	1	KB	1,8	■	■	98	18	■	■	■	■	1,40	45,3	17,1	?
				2,5			140	21					1,41	44,7	22,4	18,2
2	a	1	UB	1,8	8	26	134	24	77	77	76	92	1,42	45,7	24,2	18,3
				2,5	12	28	155	18	64	64	88	■	1,41	46,0	27,3	15,3
2	a	2	K	1,8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				2,5												
2	a	2	KB	1,8	■	■	93	8	■	■	■	■	1,40	45,1	19,8	21,2
				2,5			108	11					1,39	45,5	30,3	11,1
2	a	2	UB	1,8	8	26	127	8	101	101	77	95	1,45	44,4	25,5	15,6
				2,5	12	28	126	21	138	138	89	■	1,41	46,2	37,0	6,1
2	b	1	K	1,8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				2,5												
2	b	1	KB	1,8	■	■	138	19	■	■	■	■	1,54	39,2	1,7	30,0
				2,5			127	3					1,58	37,4	10,4	19,5
2	b	1	UB	1,8	8	26	500	0	225	225	118	138	1,72	34,4	13,1	19,4
				2,5	12	28	500	■	267	267	102	■	1,68	36,0	27,4	6,6
2	b	2	K	1,8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				2,5												
2	b	2	KB	1,8	■	■	143	25	■	■	■	■	1,47	42,0	8,8	25,7
				2,5			133	4					1,55	39,0	9,9	21,6
2	b	2	UB	1,8	8	26	500	0	259	209	120	143	1,76	33,0	16,4	14,7

Fortsetzung A6

S	s	P	T	pF	c	phi	Pv		Le	DVWK	Ni	DIN V	Ld	GPV	wG	nFK
					geschätzt *		MW	s	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
				2,5	12	28	500	0	268	268	104		1,74	33,4	20,6	10,9
3	a	1	K	1,8			58	8					1,36	45,8	17,9	20,4
				2,5			98	11					1,37	45,3	24,4	13,5
3	a	1	KB	1,8			143	25					1,41	44,1	12,7	24,6
				2,5			190						1,44	42,6	17,7	18,1
3	a	1	UB	1,8	8	30	106	27	23	23	13	0	1,34	46,8	17,8	22,8
				2,5	10	32	165		79	79	13		1,37	45,4	26,5	12,7
3	a	2	K	1,8			51	8					1,28	49,0	20,1	21,5
				2,5			120	7					1,45	42,2	19,4	15,4
3	a	2	KB	1,8			125	21					1,46	41,7	10,9	24,0
				2,5			138	18					1,42	43,3	21,4	15,1
3	a	2	UB	1,8	8	30	124	6	21	21	14	0	1,36	46,2	15,6	24,4
				2,5	10	32	133	53	36	36	10		1,30	48,5	28,5	13,9
3	b	1	K	1,8												
				2,5												
3	b	1	KB	1,8			120	14					1,53	39,3	7,1	23,2
				2,5			115	14					1,44	42,6	19,5	14,3
3	b	1	UB	1,8	8	30	163	32	59	59	47	0	1,42	44,7	16,7	23,2
				2,5	10	32	210	14	99	99	40		1,44	43,5	24,6	14,1
3	b	1	tUB	1,8												
				2,5			500						1,66	36,8	27,9	7,3
3	b	2	K	1,8												
				2,5												
3	b	2	KB	1,8			153	4					1,37	45,7	7,7	29,1
				2,5			183	25					1,45	42,4	12,3	21,2
3	b	2	UB	1,8	8	30	200	0	3	3	42	11	1,34	47,6	14,0	28,8
				2,5	10	32	245	7	0	0	32		1,23	52,0	24,8	22,4
3	b	2	tUB	1,8			500	0					1,63	37,8	17,6	18,6
				2,5			500	0					1,23	52,0	24,8	22,4
4	a	1	K	1,8			85	21					1,44	43,5	16,2	21,8
				2,5			190	0					1,47	42,5	24,7	12,3
4	a	1	KB	1,8			160	0					1,61	38,8	20,2	15,2
				2,5			160	42					1,56	40,6	29,8	7,6
4	a	1	UB	1,8	8	26	500	0	200	200	106	127	1,60	39,7	26,9	11,7
				2,5	12	28	500	0	237	237	93		1,58	40,4	35,0	4,2
4	a	2	K	1,8			79	2					1,44	43,3	15,9	22,0
				2,5			150	14					1,49	41,6	23,7	12,4
4	a	2	KB	1,8			140						1,61	38,4	19,8	15,3
				2,5			150	14					1,55	40,7	30,9	6,5
4	a	2	UB	1,8	8	26	500	0	207	207	107	129	1,61	39,1	26,4	11,5
				2,5	12	28	500	0	262	262	95		1,64	38,1	32,8	4,1
5	a	1	K	1,8												
				2,5												
5	a	1	KB	1,8			500	0					1,72	35,3	6,9	26,5
				2,5									1,71	35,5	25,0	8,6
5	a	1	UB	1,8	8	26	500	0	204	204	108	138	1,71	35,3	10,6	23,8
				2,5	12	28	500	0	279	279	94		1,71	35,1	26,4	8,0
5	a	2	K	1,8												
				2,5												
5	a	2	KB	1,8			500	0					1,71	35,9	15,5	18,5
				2,5			500	0					1,71	35,8	30,9	3,0

Fortsetzung A6

S	s	P	T	pF	c	phi	Pv		Le	DVWK	Ni	DIN V	Ld	GPV	wG	nFK
					geschätzt *		MW	s	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
5	a	2	UB	1,8	8	26	500	0	196	196	108	139	1,72	34,9	8,0	26,1
				2,5	12	28	500	0	284	284	93		1,69	36,0	31,0	4,2
6	a	1	K	1,8												
				2,5												
6	a	1	KB	1,8			128	4					1,49	42,1	19,6	20,1
				2,5			150						1,50	41,6	31,3	7,9
6	a	1	UB	1,8	8	30	235	21	0	0	122	130	1,37	47,1	15,9	26,3
				2,5	10	32	220		0	0	104		1,29	50,2	32,7	12,6
6	a	1	tUB	1,8			500	0					1,58	40,0	15,0	23,0
				2,5			500	14					1,58	40,2	30,1	8,1
6	a	2	K	1,8												
				2,5												
6	a	2	KB	1,8			80	7					1,52	41,1	21,3	17,4
				2,5			145	0					1,54	40,2	30,4	7,5
6	a	2	UB	1,8	8	30	205	7	0	0	118	123	1,31	49,4	17,7	26,8
				2,5	10	32	210	7	0	0	108		1,40	45,9	27,4	13,6
6	a	2	tUB	1,8			500	0					1,64	38,0	12,6	23,4
				2,5			500	14					1,62	38,7	31,9	4,8
8	a	1	K	1,8												
				2,5												
8	a	1	KB	1,8			125	7					1,74	33,9	7,7	18,2
				2,5			150	28					1,71	35,1	16,9	10,1
8	a	1	UB	1,8	8	30	158	11	170	170	96	101	1,63	38,4	13,8	15,2
				2,5	10	32	215	21	202	202	123		1,63	38,2	19,6	9,1
8	a	2	K	1,8												
				2,5												
8	a	2	KB	1,8			125	14					1,72	34,5	8,9	17,6
				2,5			163	11					1,78	32,2	12,8	11,3
8	a	2	UB	1,8	8	30	150	28	173	173	98	104	1,65	37,4	10,6	17,4
				2,5	10	32	193	11	206	206	124		1,66	37,0	17,3	10,3
9	a	1	K	1,8												
				2,5												
9	a	1	KB	1,8			100	28					1,70	35,2	4,4	10,0
				2,5			135	7					1,74	34,0	1,4	11,8
9	a	1	UB	1,8	46	39	160	0	162	162	83	92	1,69	35,6	4,6	13,1
				2,5	66	43	170	14	128	128	138		1,69	35,5	3,4	14,2
9	a	2	K	1,8												
				2,5												
9	a	2	KB	1,8			78	17					1,78	32,6	2,4	9,3
				2,5			93	32					1,73	34,2	4,0	9,3
9	a	2	UB	1,8	46	39	115	35	157	157	81	90	1,67	36,3	5,2	13,1
				2,5	66	43	165		141	141	119		1,66	36,9	9,2	9,8
9	b	1	K	1,8			122	16					1,81	31,4	2,3	16,1
				2,5			145	64					1,75	33,7	4,7	15,9
9	b	1	KB	1,8			80	28					1,69	35,9	6,4	14,3
				2,5			118	32					1,69	36,0	10,2	10,6
9	b	1	UB	1,8	46	39	83	18	181	181	57	85	1,67	36,4	10,6	6,7
				2,5	66	43	158	46	144	144	112		1,66	36,9	10,5	7,3
9	b	2	K	1,8			108	25					1,82	31,1	1,2	16,8
				2,5			140	57					1,76	33,3	4,2	16,0
9	b	2	KB	1,8			137	35					1,70	35,2	5,0	15,1

Fortsetzung A6

S	s	P	T	pF	c	phi	Pv		Le	DVWK	Ni	DIN V	Ld	GPV	wG	nFK
					geschätzt *		MW	s	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
				2,5			225	21					1,65	37,3	5,3	16,8
9	b	2	UB	1,8	46	39	138	28	164	164	86	99	1,72	34,8	3,6	12,1
				2,5	66	43	165	50	127	127	137		1,71	35,2	2,8	13,3
11	a	1	K	1,8			60	14					1,37	48,6	12,6	22,0
				2,5			85	21					1,36	48,9	13,0	21,9
11	a	1	KB	1,8			78	4					1,47	45,4	7,6	21,4
				2,5			128	32					1,42	47,3	15,8	15,1
11	a	1	UB	1,8	12	35	88	4	119	173	116	83	1,50	45,0	7,3	22,1
				2,5	26	37	120	7	174	141	159		1,46	46,1	12,5	18,0
11	a	2	K	1,8			89	8					1,47	44,7	7,0	23,8
				2,5			120	7					1,48	44,5	10,1	20,4
11	a	2	KB	1,8			95						1,56	42,2	3,1	22,6
				2,5			154	6					1,53	43,3	9,7	17,1
11	a	2	UB	1,8	12	35	69	8	112	172	114	80	1,46	46,0	9,6	20,8
				2,5	26	37	110	7	169	149	159		1,44	47,0	16,1	15,3
11	c	1	K	1,8			120	7					1,57	40,4	2,2	21,7
				2,5			145	7					1,56	40,8	6,7	17,5
11	c	1	KB	1,8												
				2,5												
11	c	1	UB	1,8	40	30	125	0	137	137	86	130	1,66	37,2	0,0	17,7
				2,5	70	34	150	14	173	173	131		1,61	39,3	3,3	16,5
11	c	2	K	1,8			128	4					1,57	40,2	1,7	21,9
				2,5			170	14					1,53	41,7	7,9	17,2
11	c	2	KB	1,8												
				2,5												
11	c	2	UB	1,8	40	30	160		137	137	87	130	1,66	37,2	0,0	17,7
				2,5	70	34	185	21	178	178	130		1,65	37,7	3,0	15,2
12	a	1	K	1,8			97	8					1,56	39,9	1,8	27,4
				2,5			113	18					1,58	39,4	7,0	21,6
12	a	1	KB	1,8			91	18					1,59	38,7	3,1	23,9
				2,5			165	14					1,60	38,5	5,7	21,0
12	a	1	UB	1,8	12	35	100	28	111	111	119	83	1,46	44,6	10,6	21,7
				2,5	26	37	173	18	169	169	140		1,44	44,9	14,2	18,4
12	a	2	K	1,8			112						1,58	39,1	2,1	26,2
				2,5			80						1,47	43,5	11,9	20,8
12	a	2	KB	1,8			105						1,59	38,8	2,7	24,2
				2,5			145	21					1,59	39,0	7,2	20,0
12	a	2	UB	1,8	12	35	88	18	111	111	118	98	1,44	45,2	6,7	26,2
				2,5	26	37	183	18	186	186	142		1,51	42,3	8,5	21,5
12	b	1	K	1,8			85	21					1,53	42,2	3,5	27,9
				2,5												
12	b	1	KB	1,8			103	11					1,64	37,5	1,4	24,5
				2,5			130	42					1,67	36,6	3,5	21,6
12	b	1	UB	1,8	12	35	142	14	128	128	126	98	1,51	42,6	7,6	23,6
				2,5	26	37	180	28	186	186	141		1,48	43,6	11,4	20,9
12	b	2	K	1,8			55						1,43	45,3	8,4	26,1
				2,5			137	15					1,52	41,8	11,6	19,4
12	b	2	KB	1,8			105	21					1,63	38,0	3,7	22,8
				2,5			118	32					1,63	37,8	6,8	19,5
12	b	2	UB	1,8	12	35	130	0	128	128	126	99	1,51	42,5	7,2	23,9
				2,5	26	37	165	21	207	207	140		1,46	44,3	8,0	24,9

Fortsetzung A6

S	s	P	T	pF	c	phi	Pv		Le	DVWK	Ni	DIN V	Ld	GPV	wG	nFK
					geschätzt *		MW	s	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
13	a	1	K	1,8			25	0					1,35	48,1	8,4	32,3
				2,5			80	21					1,44	44,6	17,2	20,0
13	a	1	KB	1,8			80	28					1,56	40,6	2,6	30,0
				2,5			115	21					1,46	44,5	16,9	19,5
13	a	1	UB	1,8	12	35	88	1	114	114	124	93	1,42	45,8	7,8	27,1
				2,5	26	37	150	14	180	180	145		1,47	44,2	17,2	16,3
13	a	2	K	1,8			35	4					1,37	47,5	10,4	29,7
				2,5			81	27					1,42	45,4	17,3	20,8
13	a	2	KB	1,8												
				2,5			123	4					1,61	38,8	9,4	21,3
13	a	2	UB	1,8	12	35	98	25	134	134	131	111	1,51	42,5	5,2	26,5
				2,5	26	37	163	4	193	193	148		1,56	40,8	11,8	18,2
13	b	1	K	1,8			66	21					1,52	42,1	4,7	27,7
				2,5			135	14					1,57	40,4	12,5	18,2
13	b	1	KB	1,8			110						1,60	39,0	0,0	25,0
				2,5			115	14					1,52	41,9	12,2	15,7
13	b	1	UB	1,8	12	35	100		124	234	119	87	1,53	41,7	2,9	23,8
				2,5	26	37	158	4	165	209	165		1,53	41,9	9,3	17,5
13	b	2	K	1,8			100						1,53	41,7	4,0	28,1
				2,5			170	14					1,57	40,2	10,5	20,0
13	b	2	KB	1,8			110						1,59	39,4	0,0	25,4
				2,5			135	7					1,61	38,7	6,7	18,0
13	b	2	UB	1,8	12	35	105	14	122	230	119	87	1,52	42,0	3,0	23,9
				2,5	26	37	200	0	165	211	165		1,53	41,9	9,4	17,4
14	a	1	K	1,8												
				2,5												
14	a	1	KB	1,8			127	41					1,55	41,4	3,9	27,7
				2,5			159	43					1,49	43,7	10,8	23,1
14	a	1	UB	1,8	12	35	101	20	129	210	126	89	1,49	44,5	7,7	26,0
				2,5	26	37	124	21	201	189	148		1,49	44,3	11,8	21,7
14	b	1	K	1,8			118	11					1,57	41,0	2,8	29,0
				2,5			93	19					1,51	42,9	8,2	25,5
14	b	1	KB	1,8			119	22					1,56	41,2	4,2	28,3
				2,5			133	28					1,57	40,6	8,8	23,2
14	b	1	UB	1,8	12	35	95	23	130	130	124	95	1,49	44,5	7,6	26,4
				2,5	26	37	168	24	180	180	113		1,48	44,5	12,6	21,4
14	c	1	K	1,8			111	24					1,51	43,1	6,2	26,1
				2,5			145	17					1,51	42,9	11,5	20,7
14	c	1	KB	1,8			108	11					1,52	42,8	6,6	26,7
				2,5			123	16					1,57	40,9	9,2	22,1
14	c	1	UB	1,8	12	35	93	7	120	198	127	86	1,46	45,5	8,6	25,1
				2,5	26	37	154	11	192	191	157		1,48	44,7	13,4	19,5
21	a	1	K	1,8			30	0					1,18	53,8	14,1	26,1
				2,5			55						1,18	53,7	15,8	24,4
21	a	1	KB	1,8			150	0					1,43	44,8	6,8	18,6
				2,5			145	21					1,41	45,4	10,8	15,1
21	a	1	UB	1,8	40	30	105	35	131	131	72	84	1,37	46,9	5,1	19,7
				2,5	70	34	155	7	154	154	122		1,34	48,1	7,7	18,4
21	a	2	K	1,8			45	21					1,20	53,2	14,3	25,3
				2,5			88	18					1,16	54,6	17,8	23,3
21	a	2	KB	1,8			115	21					1,42	45,2	2,4	23,3

Fortsetzung A6

S	s	P	T	pF	c	phi	Pv		Le	DVWK	Ni	DIN V	Ld	GPV	wG	nFK
					geschätzt *		MW	s	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
				2,5			150	14					1,47	43,3	2,8	21,1
21	a	2	UB	1,8	40	30	103	18	124	124	83	85	1,29	50,1	4,4	23,6
				2,5	70	34	130	0	153	153	135		1,24	51,8	8,6	21,1
21	b	1	K	1,8			113	11					1,38	46,1	4,7	26,6
				2,5			153	4					1,36	47,0	9,5	22,6
21	b	1	KB	1,8			133	4					1,35	48,0	3,8	19,3
				2,5			170	28					1,33	49,0	6,4	17,7
21	b	1	UB	1,8	40	30	125	0	125	125	93	112	1,38	46,9	1,2	22,6
				2,5	70	34	123	4	154	154	131		1,35	48,2	5,2	20,0
21	b	2	K	1,8			115	7					1,37	46,6	5,6	26,2
				2,5			160	0					1,37	46,5	8,2	23,4
21	b	2	KB	1,8			165	7					1,54	40,9	4,4	11,7
				2,5			180	28					1,52	41,4	4,1	12,4
21	b	2	UB	1,8	40	30	85	7	129	129	70	81	1,30	50,1	7,2	19,8
				2,5	70	34	175	35	167	167	109		1,42	45,4	9,6	12,7

(*) Die Schätztabelle nach dem DVWK-Merkblatt 234 (1995) nur eine begrenzte Auswahl vorkommender Gefügeformen zur Schätzung der Scherparameter c und phi. Zur Anwendung der Gleichungen mussten die beprobten Horizonte möglichst einer in der Tabelle vorhandenen Gefügeformen zugeordnet werden. Die Angaben im Anhang A6 entsprechen also nur im weitesten Sinne den in-situ Verhältnissen.

A7a: Schlepperausstattung, Bereifung, Kontaktfläche (KF), Radlast, Kontaktflächendruck (KFD) der Standorte (S) sowie Druckausbreitung für weiche Bodenverhältnisse (RP=Radposition, VR=Vorderräder, HR=Hinterräder)

S	Schlepper	RP	Bereifung	KF (cm ²)	Radlast (kg)	KFD (bar)	Druck (bar) in der Tiefe (cm) Bodenverhältnisse weich						
							0	10	20	30	40	50	60
1	Deutz DX 6.50	VR	16.9 R 28	1752	1128	0,63	1,27	0,98	0,58	0,34	0,21	0,15	0,10
		HR	20.8 R 38	3018	1692	0,55	1,10	0,94	0,65	0,42	0,29	0,20	0,15
	Deutz 6806	VR	10-16	738	760	0,80	1,60	0,96	0,42	0,22	0,13	0,08	0,06
		HR	16.9 R 34	1825	1140	0,48	0,97	0,76	0,45	0,27	0,17	0,12	0,08
2	Fendt Farmer 312	VR	16.9-26	1701	1066	0,61	1,23	0,95	0,55	0,32	0,20	0,14	0,10
		HR	18.4 R 38	2572	1599	0,61	1,22	1,01	0,67	0,43	0,28	0,19	0,14
	John Deere 6220	VR	12.4 R 28	1328	804	0,59	1,19	0,86	0,46	0,26	0,16	0,11	0,08
		HR	540/65 R 38	3283	1206	0,36	0,72	0,62	0,44	0,29	0,20	0,14	0,10
	John Deere 6210	VR	12.4 R 28	1328	878	0,65	1,30	0,93	0,50	0,28	0,17	0,12	0,08
		HR	540/65 R 38	3303	1317	0,39	0,78	0,67	0,48	0,32	0,22	0,15	0,11
3	John Deere 4455	VR	16.9 R 30	1930	1310	0,67	1,33	1,06	0,64	0,38	0,25	0,17	0,12
		HR	20.8 R 42	3310	1965	0,58	1,17	1,00	0,71	0,47	0,32	0,23	0,17
	Case-IH 1255 XL	VR	14.9 R 28	1517	1136	0,73	1,47	1,11	0,62	0,36	0,22	0,15	0,11
		HR	20.8-38	3080	1704	0,54	1,09	0,93	0,64	0,42	0,29	0,20	0,15
	New Holland TL 90 DT	VR	320/70 R 28	1677	776	0,45	0,91	0,68	0,39	0,23	0,15	0,10	0,07
		HR	14.9 R 38	1778	1164	0,64	1,29	1,00	0,59	0,35	0,22	0,15	0,11
4	Fendt Favorit 611	VR	13.6 R 28	1522	1186	0,76	1,53	1,14	0,64	0,37	0,23	0,15	0,11
		HR	18.4 R 38	2672	1779	0,65	1,31	1,09	0,73	0,47	0,31	0,21	0,16
	Fendt Farmer 309	VR	440/65 R 24	2397	858	0,35	0,70	0,58	0,37	0,23	0,15	0,11	0,08
		HR	540/ 65 R 34	3071	1287	0,41	0,82	0,70	0,49	0,32	0,22	0,15	0,11
5	Massey Ferguson MF 3120	VR	420/70 R 28	1858	1000	0,53	1,06	0,83	0,50	0,30	0,19	0,13	0,09
		HR	520/70 R 38	3356	1500	0,44	0,88	0,75	0,53	0,36	0,24	0,17	0,13
	Massey Ferguson MF 3075	VR	380/70 R 28	2157	876	0,40	0,80	0,63	0,40	0,24	0,16	0,11	0,08
		HR	16.9 R 38	2168	1314	0,59	1,19	0,96	0,60	0,37	0,24	0,16	0,12
6	Renault Ares 630	VR	540/65 R 28	2680	1036	0,38	0,76	0,63	0,43	0,27	0,18	0,13	0,09
		HR	650/65 R 38	4499	1554	0,34	0,68	0,60	0,46	0,33	0,23	0,17	0,13
7	John Deere 4450	VR	18.4 R 26	2065	1364	0,65	1,30	1,04	0,65	0,39	0,25	0,17	0,12
		HR	580/70 R 42	4298	2046	0,47	0,94	0,82	0,62	0,44	0,31	0,22	0,17
	New Holland TS 115	VR	420/70 R 28	1849	948	0,50	1,01	0,79	0,47	0,28	0,18	0,12	0,09
		HR	460/85 R 38	2913	1422	0,48	0,96	0,81	0,55	0,36	0,24	0,17	0,12
	Fendt GT 350	VR	7.5/5-16	518	627	1,19	2,38	1,20	0,47	0,23	0,14	0,09	0,06
		HR	9.5/9-36	930	941	0,99	1,99	1,26	0,60	0,32	0,19	0,13	0,09
8	Fendt 711 Vario	VR	540/65 R 28	2710	1196	0,43	0,87	0,73	0,49	0,31	0,21	0,14	0,10
		HR	650/65 R 38	4544	1794	0,39	0,78	0,69	0,53	0,37	0,27	0,19	0,14
	Fendt 716 Vario	VR	540/65 R 28	2711	1200	0,43	0,87	0,73	0,49	0,31	0,21	0,14	0,11
		HR	650/65 R 38	4545	1800	0,39	0,78	0,69	0,53	0,38	0,27	0,19	0,15
9	Versuchsgut Wahn nicht mehr existent												
10	Deutz DX 110	VR	14.9 R 24	1602	1000	0,61	1,23	0,93	0,53	0,31	0,19	0,13	0,09
		HR	18.4 R 38	2517	1500	0,58	1,17	0,97	0,64	0,40	0,26	0,18	0,13
	Deutz DX 90	VR	380/70 R 24	2006	900	0,44	0,88	0,70	0,43	0,26	0,17	0,11	0,08
		HR	16.9 R 38	2188	1350	0,61	1,21	0,98	0,62	0,38	0,25	0,17	0,12
	Fendt Farmer 308 LS	VR	13.6 R 24	1398	761	0,53	1,07	0,79	0,43	0,24	0,15	0,10	0,07
		HR	16.9 R 34	1960	1142	0,57	1,15	0,91	0,56	0,33	0,21	0,14	0,10
11	Deutz Agrotron 6.30	VR	14.9 R 28	1401	928	0,65	1,30	0,96	0,53	0,30	0,18	0,12	0,09
		HR	16.9 R 34	2099	1392	0,65	1,30	1,05	0,65	0,40	0,26	0,17	0,13
	Deutz Agrotron 150	VR	540/65 R 28	2688	1078	0,39	0,79	0,66	0,44	0,28	0,19	0,13	0,09
		HR	650/65 R 42	4784	1617	0,33	0,66	0,59	0,46	0,33	0,24	0,17	0,13

Fortsetzung A7a

S	Schlepper	RP	Bereifung	KF (cm ²)	Radlast (kg)	KFD (bar)	Druck (bar) in der Tiefe (cm) Bodenverhältnisse weich						
							0	10	20	30	40	50	60
12	Massey Ferguson MF 8250	VR	660/25 R 28	3580	1724	0,47	0,95	0,82	0,59	0,40	0,28	0,20	0,15
		HR	900/50 R 42	6273	2586	0,40	0,81	0,74	0,60	0,45	0,34	0,25	0,19
	Massey Ferguson MF 9250	VR	710/55 R 30	4462	1850	0,41	0,81	0,72	0,55	0,39	0,28	0,20	0,15
		HR	800/70 R 38	5536	2775	0,49	0,98	0,89	0,71	0,52	0,38	0,28	0,21
13	Massey Ferguson MF 8240	VR	540/65 R 30	2887	1533	0,52	1,04	0,88	0,60	0,39	0,26	0,18	0,13
		HR	650/65 R 42	4911	2300	0,46	0,92	0,82	0,64	0,46	0,33	0,24	0,18
	Massey Ferguson MF 3115	VR	480/65 R 28	2241	1000	0,44	0,88	0,71	0,45	0,28	0,18	0,12	0,09
		HR	600/65 R 38	3965	1500	0,37	0,74	0,65	0,48	0,33	0,23	0,17	0,12
	Mercedes-Benz MB 1000	VR	16.9 R 26	1711	1125	0,64	1,29	1,00	0,58	0,34	0,22	0,15	0,10
		HR	16.9 R 26	1711	1125	0,64	1,29	1,00	0,58	0,34	0,22	0,15	0,10
14	John Deere 6820	VR	480/70 R 28	2365	1116	0,46	0,93	0,76	0,49	0,31	0,20	0,14	0,10
		HR	580/70 R 38	4028	1674	0,41	0,82	0,72	0,53	0,37	0,26	0,19	0,14
	John Deere 6600	VR	14.9 R 28	1402	930	0,65	1,30	0,96	0,53	0,30	0,18	0,12	0,09
		HR	18.4 R 38	2459	1395	0,56	1,11	0,92	0,60	0,38	0,25	0,17	0,12
	John Deere 6300	VR	420/70 R 24	2288	823	0,35	0,71	0,57	0,37	0,23	0,15	0,10	0,07
		HR	16.9 R 38	2124	1235	0,57	1,14	0,92	0,57	0,35	0,23	0,15	0,11
15	Deutz AgroXtra 4.47	VR	450/65 R24	2397	760	0,31	0,62	0,51	0,33	0,21	0,14	0,09	0,07
		HR	540/65 R 38	3270	1140	0,34	0,68	0,59	0,42	0,28	0,19	0,13	0,10
	John Deere 3200 (Pflegebereifung)	VR	7.50-16	521	666	1,25	2,51	1,27	0,50	0,25	0,14	0,09	0,07
		HR	11.2 R 42	1281	999	0,77	1,53	1,07	0,57	0,32	0,20	0,13	0,09
16	Fendt Vario 716	VR	540/65 R 28	2718	1240	0,45	0,90	0,75	0,51	0,32	0,22	0,15	0,11
		HR	650/65 R 38	4556	1860	0,40	0,80	0,71	0,54	0,39	0,28	0,20	0,15
17	JCB Fastrac 1115	VR	540/65 R 30	2858	1375	0,47	0,95	0,80	0,54	0,35	0,24	0,16	0,12
		HR	540/65 R 30	2858	1375	0,47	0,95	0,80	0,54	0,35	0,24	0,16	0,12
18	Fendt 924 Vario	VR	600/65 R 28	3362	1760	0,51	1,03	0,89	0,63	0,42	0,29	0,20	0,15
		HR	710/70 R 38	5511	2640	0,47	0,94	0,85	0,67	0,50	0,36	0,27	0,20
	Fendt 716 Vario	VR	540/65 R 28	2718	1240	0,45	0,90	0,75	0,51	0,32	0,22	0,15	0,11
		HR	710/70 R 38	5366	1860	0,34	0,68	0,61	0,48	0,36	0,26	0,19	0,14
19	John Deere 7710	VR	520/70 R 30	2868	1316	0,45	0,90	0,76	0,52	0,34	0,23	0,16	0,11
		HR	710/70 R 38	5387	1974	0,36	0,72	0,65	0,51	0,38	0,27	0,20	0,15
	John Deere 6910	VR	480/70 R 30	2481	1078	0,43	0,85	0,71	0,46	0,29	0,19	0,13	0,10
		HR	710/70 R 38	5321	1616	0,30	0,60	0,54	0,42	0,31	0,23	0,17	0,13
20	Fendt 309 LSA	VR	13.6 R 24	1398	858	0,60	1,21	0,89	0,48	0,27	0,17	0,11	0,08
		HR	16.9 R 34	2040	1287	0,62	1,24	0,99	0,61	0,37	0,24	0,16	0,12
	Fendt 312 LSA	VR	16.9 R 26	1679	1066	0,62	1,25	0,96	0,56	0,33	0,20	0,14	0,10
		HR	18,4 R 38	2572	1599	0,61	1,22	1,01	0,67	0,43	0,28	0,19	0,14
	Fendt 615 LSA	VR	14.9-30	1695	1353	0,78	1,57	1,21	0,70	0,41	0,26	0,17	0,12
		HR	20.8 R 38	3206	2030	0,62	1,24	1,06	0,75	0,50	0,34	0,24	0,17
John Deere 4050	VR	12.4-24	1239	1269	1,00	2,01	1,43	0,75	0,41	0,25	0,17	0,12	
	HR	18.4 R 36	2599	1903	0,72	1,44	1,19	0,79	0,50	0,33	0,23	0,17	
21	Deutz Agrostar 6.11	VR	480/70 R 24	2138	908	0,42	0,83	0,67	0,42	0,26	0,17	0,11	0,08
		HR	520/70 R 38	3331	1362	0,40	0,80	0,69	0,49	0,33	0,22	0,16	0,12
	Case-IH Maxum 5140	VR	480/70 R 24	2156	1004	0,46	0,91	0,74	0,46	0,28	0,18	0,13	0,09
		HR	600/65 R 38	3967	1506	0,37	0,75	0,65	0,48	0,34	0,23	0,17	0,12
	Case-IH Magnum 7120	VR	480/70 R 30	2571	1560	0,60	1,19	0,99	0,66	0,42	0,27	0,19	0,14
		HR	710/70 R 38	5455	2340	0,42	0,84	0,76	0,60	0,44	0,32	0,24	0,18
22	John Deere 8420	VR	750/65 R 26	4733	1965	0,35	0,70	0,63	0,48	0,35	0,25	0,18	0,14
		HR	850/60-38	6256	2948	0,40	0,80	0,73	0,59	0,45	0,33	0,25	0,19
	John Deere 7810	VR	540/65 R 30	2917	1392	0,57	1,14	0,97	0,66	0,43	0,29	0,20	0,15
		HR	650/65 R 42	4956	2088	0,50	1,01	0,90	0,70	0,51	0,36	0,27	0,20
	John Deere 8400 T						Raupefahrwerk						

Fortsetzung A7a

23	Fendt 612 LSA	VR	540/65 R 28	2719	1245	0,45	0,90	0,75	0,51	0,33	0,22	0,15	0,11
		HR	18.4 R 38	2722	1868	0,67	1,35	1,13	0,76	0,49	0,32	0,22	0,16
	Deutz 7006	VR	10-16	738	600	0,80	1,60	0,96	0,42	0,22	0,13	0,08	0,06
		HR	16.9 R 34	1825	900	0,48	0,97	0,76	0,45	0,27	0,17	0,12	0,08

A7b: Schlepperausstattung, Bereifung, Kontaktfläche (KF), Radlast, Kontaktflächendruck (KFD) der Standorte (S) sowie Druckausbreitung für feste Bodenverhältnisse (RP=Radposition, VR=Vorderräder, HR=Hinterräder)

S	Schlepper	RP	Bereifung	KF (cm ²)	Radlast (kg)	KFD (bar)	Druck (bar) in der Tiefe (cm) Bodenverhältnisse fest						
							0	10	20	30	40	50	60
1	Deutz DX 6.50	VR	16.9 R 28	1752	1128	0,63	0,63	0,55	0,39	0,27	0,18	0,13	0,10
		HR	20.8 R 38	3018	1692	0,55	0,55	0,50	0,40	0,30	0,22	0,17	0,13
	Deutz 6806	VR	10-16	738	760	0,80	0,80	0,60	0,33	0,19	0,12	0,08	0,06
		HR	16.9 R 34	1825	1140	0,48	0,48	0,42	0,31	0,21	0,14	0,10	0,08
2	Fendt Farmer 312	VR	16.9-26	1701	1066	0,61	0,62	0,53	0,38	0,25	0,17	0,12	0,09
		HR	18.4 R 38	2572	1599	0,61	0,61	0,55	0,43	0,31	0,23	0,17	0,13
	John Deere 6220	VR	12.4 R 28	1328	804	0,59	0,59	0,49	0,33	0,21	0,14	0,10	0,07
		HR	540/65 R 38	3283	1206	0,36	0,36	0,33	0,27	0,21	0,15	0,12	0,09
	John Deere 6210	VR	12.4 R 28	1328	878	0,65	0,65	0,54	0,36	0,23	0,15	0,11	0,08
		HR	540/65 R 38	3303	1317	0,39	0,39	0,36	0,29	0,22	0,17	0,13	0,10
3	John Deere 4455	VR	16.9 R 30	1930	1310	0,67	0,67	0,58	0,43	0,30	0,21	0,15	0,11
		HR	20.8 R 42	3310	1965	0,58	0,58	0,53	0,44	0,33	0,25	0,19	0,15
	Case-IH 1255 XL	VR	14.9 R 28	1517	1136	0,73	0,74	0,63	0,43	0,28	0,19	0,13	0,10
		HR	20.8-38	3080	1704	0,54	0,54	0,49	0,40	0,30	0,22	0,17	0,13
	New Holland TL 90 DT	VR	320/70 R 28	1677	776	0,45	0,45	0,38	0,27	0,18	0,12	0,09	0,06
		HR	14.9 R 38	1778	1164	0,64	0,64	0,56	0,40	0,27	0,19	0,13	0,10
4	Fendt Favorit 611	VR	13.6 R 28	1522	1186	0,76	0,77	0,65	0,45	0,29	0,20	0,14	0,10
		HR	18.4 R 38	2672	1779	0,65	0,65	0,59	0,46	0,34	0,25	0,18	0,14
	Fendt Farmer 309	VR	440/65 R 24	2397	858	0,35	0,35	0,31	0,24	0,17	0,12	0,09	0,07
		HR	540/ 65 R 34	3071	1287	0,41	0,41	0,37	0,30	0,23	0,17	0,13	0,10
5	Massey Ferguson MF 3120	VR	420/70 R 28	1858	1000	0,53	0,53	0,46	0,34	0,23	0,16	0,11	0,08
		HR	520/70 R 38	3356	1500	0,44	0,44	0,40	0,33	0,25	0,19	0,14	0,11
	Massey Ferguson MF 3075	VR	380/70 R 28	2157	876	0,40	0,40	0,35	0,26	0,18	0,13	0,09	0,07
		HR	16.9 R 38	2168	1314	0,59	0,60	0,53	0,40	0,28	0,20	0,14	0,11
6	Renault Ares 630	VR	540/65 R 28	2680	1036	0,38	0,38	0,34	0,27	0,20	0,14	0,11	0,08
		HR	650/65 R 38	4499	1554	0,34	0,34	0,32	0,27	0,22	0,17	0,13	0,11
7	John Deere 4450	VR	18.4 R 26	2065	1364	0,65	0,65	0,57	0,43	0,30	0,21	0,15	0,11
		HR	580/70 R 42	4298	2046	0,47	0,47	0,43	0,37	0,29	0,23	0,18	0,14
	New Holland TS 115	VR	420/70 R 28	1849	948	0,50	0,50	0,44	0,32	0,22	0,15	0,11	0,08
		HR	460/85 R 38	2913	1422	0,48	0,48	0,43	0,35	0,26	0,19	0,14	0,11
	Fendt GT 350	VR	7.5/5-16	518	627	1,19	1,19	0,79	0,39	0,21	0,13	0,08	0,06
		HR	9.5/9-36	930	941	0,99	0,99	0,76	0,45	0,27	0,17	0,12	0,09
8	Fendt 711 Vario	VR	540/65 R 28	2710	1196	0,43	0,43	0,39	0,31	0,23	0,17	0,12	0,09
		HR	650/65 R 38	4544	1794	0,39	0,39	0,36	0,31	0,25	0,20	0,15	0,12
	Fendt 716 Vario	VR	540/65 R 28	2711	1200	0,43	0,43	0,39	0,31	0,23	0,17	0,12	0,09
		HR	650/65 R 38	4545	1800	0,39	0,39	0,36	0,31	0,25	0,20	0,15	0,12
9	Versuchsgut Wahn nicht mehr existent												
10	Deutz DX 110	VR	14.9 R 24	1602	1000	0,61	0,61	0,52	0,37	0,24	0,17	0,12	0,09
		HR	18.4 R 38	2517	1500	0,58	0,59	0,52	0,41	0,30	0,21	0,16	0,12
	Deutz DX 90	VR	380/70 R 24	2006	900	0,44	0,44	0,38	0,28	0,20	0,14	0,10	0,07
		HR	16.9 R 38	2188	1350	0,61	0,61	0,54	0,40	0,29	0,20	0,15	0,11
	Fendt Farmer 308 LS	VR	13.6 R 24	1398	761	0,53	0,53	0,45	0,30	0,20	0,13	0,09	0,07
		HR	16.9 R 34	1960	1142	0,57	0,57	0,50	0,37	0,26	0,18	0,13	0,09

Fortsetzung A7b

S	Schlepper	RP	Bereifung	KF (cm ²)	Radlast (kg)	KFD (bar)	Druck (bar) in der Tiefe (cm) Bodenverhältnisse fest						
							0	10	20	30	40	50	60
11	Deutz Agrotron 6.30	VR	14.9 R 28	1401	928	0,65	0,65	0,55	0,37	0,24	0,16	0,11	0,08
		HR	16.9 R 34	2099	1392	0,65	0,65	0,57	0,43	0,30	0,21	0,15	0,11
	Deutz Agrotron 150	VR	540/65 R 28	2688	1078	0,39	0,39	0,35	0,28	0,21	0,15	0,11	0,08
		HR	650/65 R 42	4784	1617	0,33	0,33	0,31	0,27	0,22	0,17	0,13	0,11
12	Massey Ferguson MF 8250	VR	660/25 R 28	3580	1724	0,47	0,47	0,43	0,36	0,28	0,21	0,16	0,12
		HR	900/50 R 42	6273	2586	0,40	0,40	0,38	0,34	0,29	0,23	0,19	0,15
	Massey Ferguson MF 9250	VR	710/55 R 30	4462	1850	0,41	0,41	0,38	0,32	0,26	0,20	0,16	0,13
		HR	800/70 R 38	5536	2775	0,49	0,49	0,46	0,40	0,34	0,27	0,22	0,17
13	Massey Ferguson MF 8240	VR	540/65 R 30	2887	1533	0,52	0,52	0,47	0,38	0,28	0,21	0,15	0,12
		HR	650/65 R 42	4911	2300	0,46	0,46	0,43	0,37	0,30	0,24	0,19	0,15
	Massey Ferguson MF 3115	VR	480/65 R 28	2241	1000	0,44	0,44	0,39	0,30	0,21	0,15	0,11	0,08
		HR	600/65 R 38	3965	1500	0,37	0,37	0,34	0,29	0,23	0,18	0,14	0,11
Mercedes-Benz MB 1000	VR	16.9 R 26	1711	1125	0,64	0,65	0,56	0,40	0,27	0,18	0,13	0,10	
	HR	16.9 R 26	1711	1125	0,64	0,65	0,56	0,40	0,27	0,18	0,13	0,10	
14	John Deere 6820	VR	480/70 R 28	2365	1116	0,46	0,46	0,41	0,32	0,23	0,16	0,12	0,09
		HR	580/70 R 38	4028	1674	0,41	0,41	0,38	0,32	0,25	0,19	0,15	0,12
	John Deere 6600	VR	14.9 R 28	1402	930	0,65	0,65	0,55	0,37	0,24	0,16	0,11	0,08
		HR	18.4 R 38	2459	1395	0,56	0,56	0,50	0,39	0,28	0,20	0,15	0,11
John Deere 6300	VR	420/70 R 24	2288	823	0,35	0,35	0,31	0,24	0,17	0,12	0,09	0,07	
	HR	16.9 R 38	2124	1235	0,57	0,57	0,50	0,38	0,27	0,19	0,14	0,10	
15	Deutz AgroXtra 4.47	VR	450/65 R24	2397	760	0,31	0,31	0,28	0,21	0,15	0,11	0,08	0,06
		HR	540/65 R 38	3270	1140	0,34	0,34	0,31	0,26	0,19	0,15	0,11	0,08
	John Deere 3200 (Pflegebereifung)	VR	7.50-16	521	666	1,25	1,26	0,84	0,41	0,22	0,14	0,09	0,06
		HR	11.2 R 42	1281	999	0,77	0,77	0,62	0,41	0,26	0,17	0,12	0,09
16	Fendt Vario 716	VR	540/65 R 28	2718	1240	0,45	0,45	0,40	0,32	0,24	0,17	0,13	0,10
		HR	650/65 R 38	4556	1860	0,40	0,40	0,37	0,32	0,26	0,20	0,16	0,13
17	JCB Fastrac 1115	VR	540/65 R 30	2858	1375	0,47	0,47	0,43	0,34	0,25	0,19	0,14	0,11
		HR	540/65 R 30	2858	1375	0,47	0,47	0,43	0,34	0,25	0,19	0,14	0,11
18	Fendt 924 Vario	VR	600/65 R 28	3362	1760	0,51	0,51	0,47	0,39	0,30	0,22	0,17	0,13
		HR	710/70 R 38	5511	2640	0,47	0,47	0,44	0,39	0,32	0,26	0,21	0,17
	Fendt 716 Vario	VR	540/65 R 28	2718	1240	0,45	0,45	0,40	0,32	0,24	0,17	0,13	0,10
		HR	710/70 R 38	5366	1860	0,34	0,34	0,32	0,28	0,23	0,19	0,15	0,12
19	John Deere 7710	VR	520/70 R 30	2868	1316	0,45	0,45	0,41	0,33	0,24	0,18	0,13	0,10
		HR	710/70 R 38	5387	1974	0,36	0,36	0,34	0,29	0,24	0,20	0,16	0,13
	John Deere 6910	VR	480/70 R 30	2481	1078	0,43	0,43	0,38	0,30	0,22	0,15	0,11	0,09
		HR	710/70 R 38	5321	1616	0,30	0,30	0,28	0,24	0,20	0,16	0,13	0,10
20	Fendt 309 LSA	VR	13.6 R 24	1398	858	0,60	0,60	0,51	0,34	0,22	0,15	0,10	0,07
		HR	16.9 R 34	2040	1287	0,62	0,62	0,54	0,41	0,28	0,20	0,14	0,11
	Fendt 312 LSA	VR	16.9 R 26	1679	1066	0,62	0,62	0,54	0,38	0,26	0,17	0,12	0,09
		HR	18,4 R 38	2572	1599	0,61	0,61	0,55	0,43	0,31	0,23	0,17	0,13
	Fendt 615 LSA	VR	14.9-30	1695	1353	0,78	0,78	0,68	0,48	0,32	0,22	0,16	0,11
		HR	20.8 R 38	3206	2030	0,62	0,62	0,57	0,46	0,35	0,26	0,20	0,15
	John Deere 4050	VR	12.4-24	1239	1269	1,00	1,01	0,83	0,54	0,34	0,22	0,15	0,11
		HR	18.4 R 36	2599	1903	0,72	0,72	0,65	0,51	0,37	0,27	0,20	0,15
21	Deutz Agrostar 6.11	VR	480/70 R 24	2138	908	0,42	0,42	0,37	0,28	0,20	0,14	0,10	0,07
		HR	520/70 R 38	3331	1362	0,40	0,40	0,37	0,30	0,23	0,17	0,13	0,10
	Case-IH Maxum 5140	VR	480/70 R 24	2156	1004	0,46	0,46	0,40	0,31	0,22	0,15	0,11	0,08
		HR	600/65 R 38	3967	1506	0,37	0,37	0,34	0,29	0,23	0,18	0,14	0,11
	Case-IH Magnum 7120	VR	480/70 R 30	2571	1560	0,60	0,60	0,53	0,42	0,31	0,22	0,16	0,12
		HR	710/70 R 38	5455	2340	0,42	0,42	0,40	0,35	0,29	0,23	0,18	0,15

Fortsetzung A7b

s	Schlepper	RP	Bereifung	KF (cm ²)	Radlast (kg)	KFD (bar)	Druck (bar) in der Tiefe (cm) Bodenverhältnisse fest						
							0	10	20	30	40	50	60
22	John Deere 8420	VR	750/65 R 26	4733	1965	0,35	0,35	0,33	0,28	0,23	0,18	0,14	0,11
		HR	850/60-38	6256	2948	0,40	0,40	0,38	0,33	0,28	0,23	0,19	0,15
	John Deere 7810	VR	540/65 R 30	2917	1392	0,57	0,57	0,52	0,41	0,31	0,23	0,17	0,13
		HR	650/65 R 42	4956	2088	0,50	0,50	0,47	0,41	0,33	0,26	0,21	0,17
	John Deere 8400 T	Raupenfahwerk											
23	Fendt 612 LSA	VR	540/65 R 28	2719	1245	0,45	0,45	0,41	0,32	0,24	0,17	0,13	0,10
		HR	18.4 R 38	2722	1868	0,67	0,67	0,61	0,48	0,35	0,26	0,19	0,14
	Deutz 7006	VR	10-16	738	600	0,80	0,80	0,60	0,33	0,19	0,12	0,08	0,06
		HR	16.9 R 34	1825	900	0,48	0,48	0,42	0,31	0,21	0,14	0,10	0,08

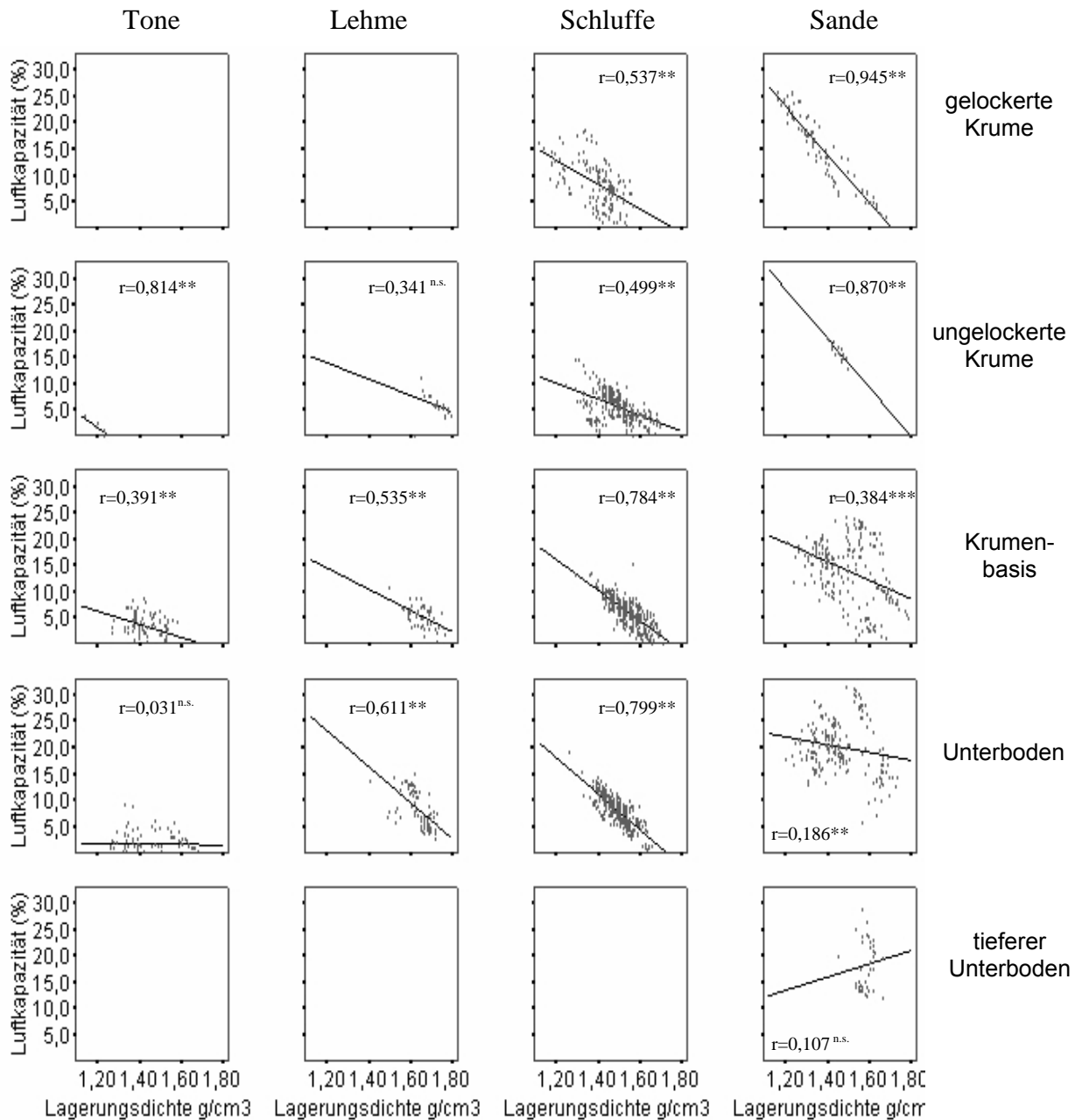
A8a: Typische Ernte- und Transportmaschinen, Bereifung, Kontaktfläche (KF), Radlast, Kontaktflächendruck (KFD) sowie Druckausbreitung für weiche Bodenverhältnisse (RP=Radposition, VR=Vorderräder, MR=Räder der mittleren Achse, HR=Hinterräder)

Ernte bzw. Transportmaschine	RP	Bereifung	KF (cm ²)	Radlast (kg)	KFD (bar)	Druck (bar) in der Tiefe (cm) Bodenverhältnisse weich						
						0	10	20	30	40	50	60
KRB ROPA EUROTIGER	VR	800/65 R 32	6970	9167	1,29	2,58	2,37	1,96	1,51	1,14	0,87	0,67
	MR	73x44-32	9975	9167	0,90	1,80	1,69	1,46	1,19	0,95	0,75	0,59
	HR	66x43-25	8898	9167	1,01	2,02	1,88	1,59	1,28	1,00	0,78	0,62
KRB KLEINE SF 10	VR	710/70 R 38	5995	6475	1,06	2,12	1,93	1,55	1,16	0,86	0,64	0,49
	HR	800/55-30.5	5698	6475	1,11	2,23	2,02	1,61	1,20	0,88	0,65	0,50
MD Claas Lexion 440	VR	650/75 R 32	5238	7070	1,32	2,65	2,38	1,86	1,36	0,99	0,73	0,55
	HR	16.9/14-24	2582	3030	1,15	2,31	1,90	1,25	0,80	0,53	0,37	0,27
MD New Holland CX 880	VR	710/70 R 38	6326	8252	1,28	2,56	2,33	1,89	1,43	1,07	0,80	0,61
	HR	17.5 LR 24	2445	2358	0,95	1,89	1,56	1,01	0,64	0,42	0,29	0,21
MH Claas Jaguar 870	VR	24.5 R 32	4302	3000	0,68	1,37	1,21	0,91	0,64	0,45	0,33	0,24
	HR	540/65 R 24	2292	1400	0,60	1,20	0,97	0,62	0,39	0,25	0,17	0,12
Flüssigmisttankwagen FTS 10 m ³	HR	700/50-26.5	3387	6000	1,74	3,48	2,97	2,10	1,41	0,97	0,69	0,51
Flüssigmisttankwagen Biri 20 m ³	MR	700/50-22.5	3912	5100	1,28	2,56	2,24	1,65	1,14	0,79	0,57	0,42
	HR	700/50-22.5	3912	5100	1,28	2,56	2,24	1,65	1,14	0,79	0,57	0,42
Maiskarre Krampe TWK 16	VR	550/60-22.5	2977	3500	1,15	2,31	1,96	1,35	0,88	0,59	0,42	0,30
	HR	550/60-22.5	2977	3500	1,15	2,31	1,96	1,35	0,88	0,59	0,42	0,30

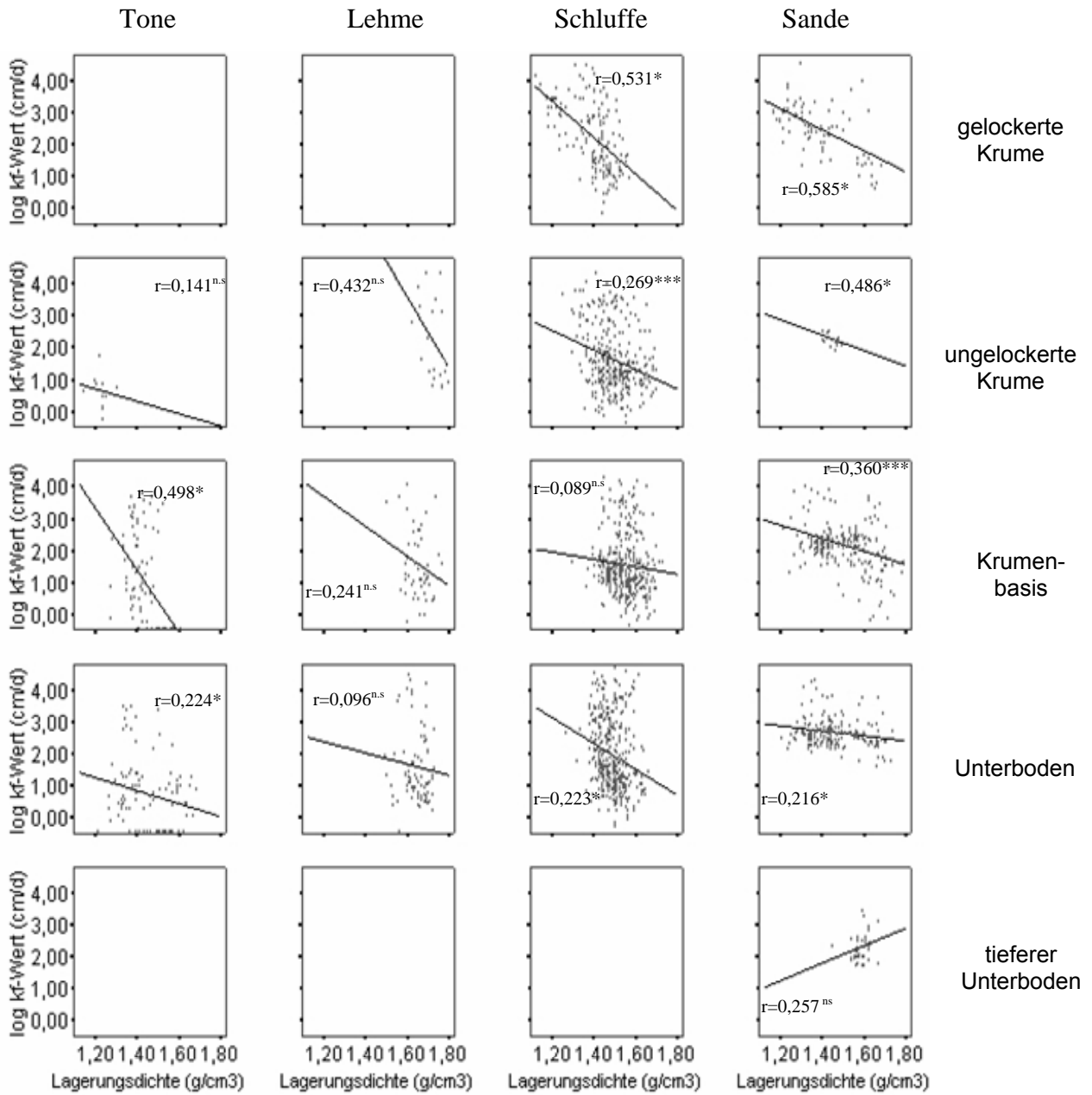
A8b: Typische Ernte- und Transportmaschinen, Bereifung, Kontaktfläche (KF), Radlast, Kontaktflächendruck (KFD) sowie Druckausbreitung für feste Bodenverhältnisse (RP=Radposition, VR=Vorderräder, MR=Räder der mittleren Achse, HR=Hinterräder)

Ernte bzw. Transportmaschine	RP	Bereifung	KF (cm ²)	Radlast (kg)	KFD (bar)	Druck (bar) in der Tiefe (cm) Bodenverhältnisse fest						
						0	10	20	30	40	50	60
KRB ROPA EUROTIGER	VR	800/65 R 32	6970	9167	1,29	1,29	1,22	1,10	0,94	0,78	0,64	0,52
	MR	73x44-32	9975	9167	0,90	0,90	0,86	0,79	0,70	0,61	0,52	0,44
	HR	66x43-25	8898	9167	1,01	1,01	0,96	0,88	0,77	0,66	0,55	0,46
KRB KLEINE SF 10	VR	710/70 R 38	5995	6475	1,06	1,06	1,00	0,88	0,74	0,60	0,49	0,39
	HR	800/55-30.5	5698	6475	1,11	1,12	1,05	0,92	0,77	0,62	0,50	0,40
MD Claas Lexion 440	VR	650/75 R 32	5238	7070	1,32	1,33	1,24	1,08	0,89	0,71	0,56	0,45
	HR	16.9/14-24	2582	3030	1,15	1,15	1,03	0,80	0,58	0,42	0,31	0,24
MD New Holland CX 880	VR	710/70 R 38	6326	8252	1,28	1,28	1,21	1,07	0,90	0,74	0,60	0,49
	HR	17.5 LR 24	2445	2358	0,95	0,95	0,85	0,65	0,47	0,34	0,25	0,19
MH Claas Jaguar 870	VR	24.5 R 32	4302	3000	0,68	0,68	0,64	0,54	0,43	0,34	0,26	0,21
	HR	540/65 R 24	2292	1400	0,60	0,60	0,53	0,41	0,29	0,21	0,15	0,11
Flüssigmisttankwagen FTS 10 m ³	HR	700/50-26.5	3387	6000	1,74	1,74	1,58	1,29	0,99	0,74	0,56	0,44
Flüssigmisttankwagen Biri 20 m ³	MR	700/50-22.5	3912	5100	1,28	1,28	1,18	0,99	0,78	0,60	0,46	0,36
	HR	700/50-22.5	3912	5100	1,28	1,28	1,18	0,99	0,78	0,60	0,46	0,36
Maiskarre Krampe TWK 16	VR	550/60-22.5	2977	3500	1,15	1,15	1,05	0,84	0,63	0,47	0,35	0,27
	HR	550/60-22.5	2977	3500	1,15	1,15	1,05	0,84	0,63	0,47	0,35	0,27

A9a: Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Luftkapazität für 2152 Messwerte in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe und der Untersuchungstiefe



A9b: Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und gesättigter Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) für 2152 Messwerte in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe und der Untersuchungstiefe



Danke

möchte ich vielen Menschen sagen, die auf unterschiedlichste Weise zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Herrn Priv.-Doz. Dr. Johannes Botschek danke ich für die wissenschaftliche Betreuung und die konstruktive Kritik insbesondere in der Start und Endphase des Forschungsvorhabens.

Herrn Prof. Dr. Werner Buchner möchte ich für die fachlichen Beratungen beim Verfassen dieser Arbeit sowie die Übernahme des Korreferates danken.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Thomas Weyer, unter dessen Leitung ich das Projektvorhaben an der Fachhochschule in Soest bearbeitet habe. Die mir überlassenen Freiheiten, die Rückendeckung bei auftretenden Problemen sowie die angeregten Diskussionen trugen zu einem erfolgreichen Gelingen des Vorhabens bei. Auch für die Begutachtung meiner Dissertation bedanke ich mich.

Mit Frau Theres Keuck stand mir eine hervorragende Laborkraft zur Seite, die durch ihren unermüdlichen Einsatz bei der Bodenprobenentnahme sowie den Laboranalysen stets verwertbare Ergebnisse produzierte. Die Arbeit mit ihr hat mir Spaß gemacht.

Dem Geologischen Dienst NRW (Herr Dr. Krahmer, Herr Dr. Schrey, Herr Janßen, Herr Elhaus) danke ich für den fachlichen Austausch und die Unterstützung bei den bodenphysikalischen Untersuchungen.

Für die Möglichkeit der Durchführung von Drucksetzungsversuchen bedanke ich mich beim Institut für Pflanzenbau der Universität Bonn.

Vielen Dank auch den zahlreichen Landwirten, auf deren Flächen die bodenphysikalischen Untersuchungen durchgeführt werden konnten.

Gedankt sei auch den Diplomanden und studentischen Hilfskräften, die durch ihre Arbeiten unmittelbar an dem Vorhaben beteiligt waren.

Meinen Zimmergenossen Frank Erlach und Judith Beck möchte ich für ihre hilfreichen Worte zu Beginn und die aufmunternden Worte zum Ende der Arbeit danken.

Allen Mitarbeitern der Fachhochschule Soest danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und dem allzeit kollegialen Miteinander (insbesondere zwischen Westfalen und Rheinländern).

Besonders möchte ich meinen „Bonner Bauern“ und der „KaterWG Soest“ danken, die mich während des Studiums und der Promotion stets daran erinnerten, dass neben dem wissenschaftlichen Arbeiten auch die Einhaltung bestimmter sozialer Gesetzmäßigkeiten („Wie gehen jetzt ein Bier trinken“) von elementarer Wichtigkeit waren und sind.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Familie, die mir das Studium ermöglicht hat und die Höhen und Tiefen während der Anfertigung der Arbeit hautnah miterleben „durfte“.

Die Arbeit wurde vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen finanziert.