

# INHALTSVERZEICHNIS

Seite

<b>Abbildungen</b>	<b>.....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellen</b>	<b>.....</b>	<b>XII</b>
<b>Abkürzungen, Einheiten, Symbole</b>	<b>.....</b>	<b>XIV</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>
<b>1.1 Problematik</b>	<b>.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Zielsetzung</b>	<b>.....</b>	<b>4</b>
<b>2 BODENVERDICHTUNGEN IM GESPRÄCH</b>	<b>.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Grundlegende Untersuchungen</b>	<b>.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Modellhafte Erfassung</b>	<b>.....</b>	<b>20</b>
<b>3 STANDORTE UND ANALYSEMETHODEN</b>	<b>.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Untersuchungsablauf</b>	<b>.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Standorte und betriebliche Situation</b>	<b>.....</b>	<b>39</b>
3.2.1 Betriebs- und Flächenauswahl	.....	39
3.2.2 Naturräumliche Einordnung	.....	44
3.2.3 Bodenbewirtschaftung	.....	57
3.2.4 Technische Ausstattung	.....	58
<b>3.3 Bodenuntersuchungen</b>	<b>.....</b>	<b>60</b>
3.3.1 Bodenphysikalische Messungen	.....	62
3.3.2 Bodenmechanische Tests	.....	64
3.3.3 Bodenchemische Kennzeichnung	.....	67
<b>3.4 Klassifizierung physikalischer und mechanischer Kenngrößen</b>	<b>.....</b>	<b>67</b>
3.4.1 Feldbodenkundliche Parameter	.....	68
3.4.2 Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung	.....	69
3.4.3 Wasser- und Luftpermeabilität	.....	70
3.4.4 Vorbelastung	.....	71
3.4.5 Eindringwiderstand	.....	71
<b>3.5 Statistische Auswertung</b>	<b>.....</b>	<b>72</b>

---

<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION</b>	<b>74</b>
<b>4.1</b>	<b>Zum Status der Bodenverdichtungen in Nordrhein-Westfalen</b>	<b>75</b>
4.1.1	Feldbefunde	76
4.1.2	Laborbefunde	84
4.1.3	Anwendungen des Indikatorenmodells	88
4.1.4	Diskussion	95
<b>4.2</b>	<b>Validierung der Prognosekonzepte zur Vermeidung von schädlichen Bodenveränderungen</b>	<b>106</b>
4.2.1	Prognosekonzept Schadverdichtungsgefährdungsklassen	108
4.2.1.1	Einzelindikator Lagerungsdichte	108
4.2.1.2	Versuchsbedingungen	113
4.2.2	Prognosekonzept Vorbelastung	116
4.2.2.1	Einzelindikator Vorbelastung (aktuell)	116
4.2.2.2	Versuchsbedingungen	119
4.2.2.3	Algorithmen	123
4.2.3	Prognosekonzept Druckbelastungsquozient	134
4.2.3.1	Einzelindikator Vorbelastung (potenziell)	134
4.2.3.2	Versuchsbedingungen	135
4.2.3.3	Algorithmen	135
4.2.4	Fazit	136
<b>4.3</b>	<b>Bewertungsmaßstab für eine gefügeschonende Landbewirtschaftung</b>	<b>138</b>
4.3.1	Standortspezifische Verdichtungsempfindlichkeit	139
4.3.1.1	Schluffstandorte	140
4.3.1.2	Sandstandorte	142
4.3.1.3	Lehmstandorte	145
4.3.1.4	Tonstandorte	147
4.3.1.5	Diskussion	149
4.3.2	Mechanische Bodenbelastung	154
4.3.2.1	Fahrzeugparameter	154
4.3.2.2	Druckausbreitung	158
4.3.2.3	Diskussion	162
4.3.3	Modellhafte Bewertung landwirtschaftlicher Arbeitsverfahren	166
4.3.4	Fazit	170

---

<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSENDER DISKUSSION.....</b>	<b>171</b>
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND FORSCHUNGSBEDARF .....</b>	<b>179</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>182</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>186</b>

DANKE

LEBENS LAUF

ANHANG

<b>Abbildungen</b>	<b>Seite</b>
Abb. 1: Zielsetzung des Forschungsvorhabens	6
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)	10
Abb. 3: Kausalkette „Bodenbelastung“ – „Bodenbeanspruchung“ nach KÜHNER (1998)	11
Abb. 4: Druckzwiebel mit Linien gleichen Bodendrucks in drei Fahrspuren (BOLLING & SÖHNE 1982)	13
Abb. 5: Die vier Bausteine des Konzepts für bodenschonendes Befahren (SOMMER 1998b)	19
Abb. 6: Obere Grenzwerte des optimalen Lagerungsdichtebereiches von Ap-Horizonten in Abhängigkeit von der Bodenart nach PETELKAU et al. (2000)	23
Abb. 7: Pflanzenabhängige ökologische Schadverdichtungsbereiche (PETELKAU et al. 2000)	24
Abb. 8: Druck-Verdichtungskurve in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (% nFK) für die Bodenart SI3 nach PETELKAU et al. (2000)	25
Abb. 9: Texturabhängige Schadverdichtungsklassen für Böden basierend auf der KA5 (PETELKAU et al. 2000)	26
Abb. 10: Maximal zulässige Belastbarkeit bei einer Bodenfeuchte von 70 % nFK der Bodenartengruppen in den SVGK 1 bis 5 (PETELKAU et al. 2000)	26
Abb. 11: Verlauf der Drucksetzungskurve im Wieder- und Erstverdichtungsbereich	28
Abb. 12: Ermittlung von Druckbelastbarkeit und Druckbelastung des Bodens nach dem Vorbelastungskonzept (verändert nach LEBERT et al. 2004)	30
Abb. 13: Ableitung der Druckbelastbarkeit nach dem Modell DBQ	33
Abb. 14: Untersuchungsablauf	40
Abb. 15: Geographische Lage der Standorte	42
Abb. 16: Parabraunerde-Pseudogley in der Soester Börde	46
Abb. 17: Podsol (links) und Gley (rechts) aus diluvialen Schmelzwassersanden im Münsterland	48
Abb. 18: Parabraunerde aus Löss in der Jülicher Börde	51

---

Abb. 19:	Grundwasserbeeinflusster Auenboden der Unteren Rhein- niederung	54
Abb. 20:	Pseudogley aus Tonstein im Siebengebirge	57
Abb. 21:	Aufbau der Drucksetzungsanlage (Ödometer)	65
Abb. 22:	Ermittlung der Vorbelastung nach CASAGRANDE (1936) aus der Drucksetzungskurve	66
Abb. 23:	Aufbau des Penetrometers	66
Abb. 24:	Platzierung der Bodenarten von 224 Untersuchungshorizonten im Körnungsdigramm nach der KA5 (AG BODEN 2005)	74
Abb. 25:	Spatendiagnose, Effektive Lagerungsdichte und Packungsdichte in 212 Untersuchungshorizonten in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden	77
Abb. 26:	Makroporenanteile in 212 Untersuchungshorizonten in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden	80
Abb. 27:	Eindringwiderstand (MPa) von 212 Untersuchungstiefen in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Unter- suchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2136)	81
Abb. 28:	Fluviatile horizontal eingeregelt Sandablagerungen im Unterbodenbereich (Horizont II <sub>Gor</sub> ) vom Standort 4a	82
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	83
Abb. 30:	Lagerungsdichte ( $\text{g/cm}^3$ ) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)	85
Abb. 31:	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)	87
Abb. 32:	Intrinsische Luftleitfähigkeit ( $\text{cm}^2$ ) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden (n=2036)	87
Abb. 33:	Luftkapazität (%) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumenbasis und Unterboden	90
Abb. 34:	Standort 21a (Unterboden)	94
Abb. 35:	Standort 14g (Krume)	95

Abb. 36:	Standort 19a (Krume)	95
Abb. 37:	Standort 10a (Krume)	95
Abb. 38:	Typische Drucksetzungskurve für einen nordrhein-westfälischen Sandboden	102
Abb. 39:	Raseneisenstein auf einer münsterländischen Ackerfläche	102
Abb. 40:	Häufigkeitsverteilung der Wasserleitfähigkeit in 10-facher Wiederholung im Bt-Horizont einer Parabraunerde aus Löss	104
Abb. 41:	Durchwurzelter Krumbereich eines scharfkantigen verdichteten Polyedergefüges (Standort 19a)	105
Abb. 42:	Fließschema zur Modellvalidierung	107
Abb. 43:	Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Luftkapazität für den gelockerten (links) und nicht gelockerten (rechts) Krumbereich der beprobten Sande (n=78 bzw. 20)	111
Abb. 44:	Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Luftkapazität für die Krumbasis (links) und den Unterboden (rechts) der beprobten Schluffe (n=366 bzw. 399)	111
Abb. 45:	Korrelative Beziehung zwischen Lagerungsdichte und gesättigter Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) für den gelockerten Krumbereich der Schluffe (links) und Sande (rechts) (n=157 bzw. 78)	112
Abb. 46:	Kompressions- und Schergerät nach PETELKAU et al. (1988)	115
Abb. 47:	Verlauf der Luftkapazität (%) in Abhängigkeit von der Auflast (kPa) für verschieden texturierte Böden bei unterschiedlicher Bodenwasserspannung	119
Abb. 48:	Box-Plots der tiefenabhängigen Vorbelastungsergebnisse der einzelnen Standorte für eine Bodenwasserspannung von pF 1,8	122
Abb. 49a:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Schluffstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	128
Abb. 49b:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Schluffstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	129
Abb. 50a:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Tonstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	130
Abb. 50b:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Tonstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	130

Abb. 51a:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Lehmstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	132
Abb. 51b:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Lehmstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	132
Abb. 52a:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 1,8) für den Unterboden der Sandstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	133
Abb. 52b:	Vergleich der gemessenen und modellierten Vorbelastung (pF 2,5) für den Unterboden der Sandstandorte nach verschiedenen Regressionsmodellen	133
Abb. 53:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Schluffstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=179)	141
Abb. 54:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die unsortiert abgelagerten Böden der Sandstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=129)	144
Abb. 55:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die sortiert abgelagerten Böden der Sandstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=57)	145
Abb. 56:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Lehmstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=57)	146
Abb. 57:	Tiefenabhängige Vorbelastung und Lagerungsdichte für die Tonstandorte in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung (n=62)	148
Abb. 58:	Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Vorbelastung für nordrhein-westfälische Sandböden (n=107)	151
Abb. 59:	Tiefenwirkung einer Druckzwiebel bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (SOMMER 1998b)	153
Abb. 60:	Radlasten und Kontaktflächendrücke der Hinterräder des an den 23 Standorten jeweils eingesetzten schwersten Schleppers	155
Abb. 61:	Radlast und Kontaktflächendrücke typischer Erntemaschinen	157
Abb. 62:	Radlast und Kontaktflächendrücke typischer Transportmaschinen	157
Abb. 63:	Druckausbreitung für zwei verschiedene Schleppertypen mit unterschiedlicher Bereifung und Radlast (Reifeninnendruck 1,5 bar)	160

---

Abb. 64:	Druckausbreitung für zwei verschiedene Schleppertypen mit unterschiedlicher Bereifung und Radlast (Reifeninnendruck 0,8 bar)	160
Abb. 65:	Druckausbreitung für verschiedene Köpfrdebunker (weicher Boden)	162
Abb. 66:	Gegenüberstellung von Bodendruck und Vorbelastung für verschiedene Schlepper	167
Abb. 67:	Bodendruck und Vorbelastung für verschiedene Ernte- und Transportmaschinen	168



<b>Tabellen</b>	<b>Seite</b>
Tab. 1: Beispiel für die Berechnung der Druckbelastbarkeit eines Braunerde-Tschernosem nach PAUL (2004)	34
Tab. 2: Einschätzung der Verdichtungsgefährdung für einen nordrhein-westfälischen Marktfruchtbetrieb nach dem Modell DBQ (LÜTKE ENTRUP & BECK 2005)	36
Tab. 3: Von Bodenschadverdichtung direkt betroffene Bodenfunktionen und mögliche Parameter als Anzeiger (verändert nach LEBERT et al. 2004)	38
Tab. 4: Indikatorensystem und Schadensschwellenwerte zur Erkennung einer Bodenschadverdichtung (LEBERT et al. 2004)	38
Tab. 5: Standortcharakterisierung	43
Tab. 6: Klassifizierung der Parameter zur Feldgefügeansprache	68
Tab. 7: Klassifizierung des Makroporenanteils am Bodenvolumen	69
Tab. 8: Klassifizierung der Lagerungsdichte	69
Tab. 9: Klassifizierung der Luftkapazität (LK) und der nutzbaren Feldkapazität (nFK)	70
Tab. 10: Klassifizierung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) und der Luftleitfähigkeit ( $k_{00}$ )	71
Tab. 11: Klassifizierung der Vorbelastung	71
Tab. 12: Anteil der Bodenarten in NRW (GEOLOGISCHER DIENST 2004)	75
Tab. 13: Einteilung der Bodenarten in Bodenartenhauptgruppen nach KA5 (AG Boden 2005)	76
Tab. 14: Porengrößenverteilung in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe für die Untersuchungstiefen Krume, Krumbasis und Unterboden (n=2036)	86
Tab. 15: Bewertung des Bodengefügezustandes 46 landwirtschaftlicher Flächen für drei Untersuchungstiefen nach definierten Schadsschwellen	93
Tab. 16: Zusammenhang zwischen physikalischen Kennwerten und der Vorbelastung für n=43 Wertepaare in Abhängigkeit von der Bodenwasserspannung	117
Tab. 17: Gleichungssysteme zur Berechnung der Vorbelastung bei pF 1,8 und pF 2,5 nach verschiedenen Regressionsmodellen	125
Tab. 18: Mess- und Schätzwerte sowie korrelative Beziehungen der einzelnen Regressionsmodelle zur Abschätzung der Vorbelastung für 2 Bodenwasserspannungen	127

---

Tab. 19:	Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 14a-c	142
Tab. 20:	Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 9a+b	147
Tab. 21:	Vorbelastung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und der Bodenwasserspannung für 3 Untersuchungstiefen am Standort 21a+b	149
Tab. 22:	Maschinenspezifische Daten der an den 23 Standorten eingesetzten Schlepper	154
Tab. 23:	Spannweiten der tiefenabhängigen Druckausbreitung aller an den 23 Standorten eingesetzten Schlepper unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse	158
Tab. 24:	Tiefenabhängige Spannweiten der Druckausbreitung von Ernte- und Transportmaschinen unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse in bar	161