

Aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als
stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische
Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und
Mulchsaat**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Dipl. Ing. Agr. ökon., Ing. Melior. **Orsolya Fazekas**

aus Budapest / Ungarn

Kiel 2005

Dekan: Prof. Dr. Siegfried Wolfram

Erster Berichterstatter: Prof. Dr. Rainer Horn

Zweiter Berichterstatter: Prof. Dr. Nicola Fohrer

Tag der mündlichen Prüfung: 17.11.2005

„Ne feledd, hogy a talajon nem csak állsz, hanem élsz is!”

Stefanovits Pál

*(“Vergiss es nicht, Du stehst nicht nur auf dem Boden,
sondern Du lebst auch auf ihm!”)*

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungen	XV
1 Einleitung	1
2 Einführung in die Thematik	5
2.1 Spannungen im Boden.....	5
2.1.1 Wirksame und neutrale Spannungen.....	5
2.2 Zusammendrückbarkeit des Bodens	7
2.2.1 Zeitlicher Ablauf der Zusammendrückbarkeit (Konsolidation).....	12
2.2.2 Wasser als Stabilitätsfaktor	13
2.2.3 Vertikale und Horizontale Spannungskomponente im Boden.....	15
2.2.4 Scherfestigkeit des Bodens	16
2.3 Das Dreidimensionale Spannungskonzept	19
2.4 Spannungsausbreitung im Boden.....	23
2.5 Deformation von Böden	25
2.6 Bruchtheorien	27
3 Material und Methoden.....	30
3.1 Standortbeschreibung.....	30
3.2 Versuchsanordnung.....	31

3.3	Untersuchungsmethoden der Freilandversuche.....	33
3.3.1	Beschreibung des Maschineneinsatzes – Holmer Terra Dos.....	33
3.3.2	Dynamische Belastungsversuche	34
3.3.3	Erfassung der Reifenkontaktfläche und des Kontaktflächendruckes	37
3.3.4	Erfassung der Regenwurmgänge.....	38
3.4	Untersuchungsmethoden der Laborversuche.....	38
3.4.1	Bestimmung der allgemeinen bodenphysikalischen Parameter ..	39
3.4.2	Bestimmung der speziellen bodenmechanischen Parameter	41
3.4.2.1	Druck- und Zeitsetzungsverhalten des Bodens, Ableitung der Vorbelastung (Pv)	42
3.4.2.1.1	Berücksichtigung der Wasserspannung.....	45
3.4.2.1.1.1	Ungestörte Bodenproben	46
3.4.2.1.1.2	Gestörte Bodenproben	46
3.4.2.2	Bestimmung der Scherwiderstandsparameter	46
3.5	Statistische Auswertung	48
4	Ergebnisse und Diskussion	49
4.1	Bodenphysikalische und mechanische Belastung einer konventionell und konservierend bearbeiteten landwirtschaftlichen Fläche.....	49
4.1.1	Freilandmessungen.....	49
4.1.1.1	Kontaktflächen und Kontaktflächendruck bei den dynamischen Belastungen.....	49

4.1.1.2	Bodendeformation (Spurtiefe, DTS-Sensor-Verschiebung)	55
4.1.1.3	Spannungsmessungen	58
4.1.2	Diskussion zum Thema Freilandmessungen	67
4.1.3	Regenwurmgängeaufnahme	72
4.1.4	Diskussion zum Thema Regenwurmgängeaufnahme	75
4.2	Labormessungen	78
4.2.1	Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung	78
4.2.2	Diskussion zum Thema Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung	83
4.2.3	Luftleitfähigkeit	87
4.2.4	Gesättigte Wasserleitfähigkeit	91
4.2.4.1	Zusammenhang zwischen Permeabilität bei Luft und Wasser im Boden	95
4.2.4.2	Zusammenhang zwischen Porengrößenverteilung und Luftleitfähigkeit bzw. gesättigte Wasserleitfähigkeit	97
4.2.5	Diskussion zum Thema Luftleitfähigkeit und gesättigte Wasserleitfähigkeit und deren Zusammenhang zur Porengrößenverteilung.	99
4.2.6	Analyse des Drucksetzungsverhaltens des Bodens, Vorbelastung	104
4.2.7	Scherwiderstand	110
4.2.8	Diskussion zum Thema zur Analyse des Drucksetzungsverhaltens des Bodens und Scherwiderstand	119

4.3 Bedeutung der Wasserspannung auf die Stabilität an gestörten/homogenisierten und an ungestörten Bodenproben 124

4.3.1	Gestörte/Homogenisierte Bodenproben.....	124
4.3.1.1	Drucksetzungsverhalten als Funktion der Belastungsdauer	124
4.3.1.2	Porenwasserdruckänderung mit der Auflast und Zeitdauer der Belastung	126
4.3.1.3	Ermittlung der Vorbelastung und des Umkehrpunktes der Wasserspannungs- und Auflastzeitbeziehung.....	128
4.3.2	Ungestörte Bodenproben	130
4.3.2.1	Drucksetzungsverhalten und Porenwasserdruckänderung als Funktion der Belastungsdauer.....	130
4.3.2.1.1	Vergleich der Wasserspannungsverläufe zwischen gestörten und ungestörten Bodenproben.....	132
4.3.2.2	Auswertung der Vorbelastung und des Umkehrpunktes der Wasserspannungskurve bei unterschiedlichen Auflastzeiten	133
4.3.2.3	Berücksichtigung des Porenwasserdruckes bei der Bestimmung der Vorbelastung - effektive Spannung.....	137
4.3.2.4	Die Auswirkung unterschiedlicher Entwässerungsstufen auf die Bodenstabilität bei ungestörten Bodenproben	142
4.3.3	Diskussion zur Bedeutung der Wasserspannung auf die Stabilität an gestörten/homogenisierten und an ungestörten Bodenproben.....	144

5 Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerungen..... 150

6 Zusammenfassung 157

7 Literaturverzeichnis.....163**Anhang****Danksagung****Lebenslauf**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Spannungen im Dreiphasensystem an einer Schnittfläche	6
Abbildung 2-2	Volumenänderung der Bodenprobe und die dazu gehörige Drucksetzungskurve und deren Parameter (Kézdi, 1952)	9
Abbildung 2-3	Idealisierte Drucksetzungskurve in semilogarithmischer Auftragung	10
Abbildung 2-4	Definition des Verdichtungsbeiwertes bzw. der Verdichtungszahl	11
Abbildung 2-5	Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade	17
Abbildung 2-6	Wirkende Spannungen auf einen theoretischen Körper (Kézdi, 1952)	20
Abbildung 2-7	Durch eine Punklast induzierte Spannung an einem Bodenelement (Koolen und Kuipers, 1983)	23
Abbildung 2-8	Spannungsisobaren (Druckzwiebeln) bei unterschiedlichen Konzentrationsfaktoren (Kézdi, 1969)	24
Abbildung 2-9	Normalverformung (a) und Scherverformung (b) (Koolen und Kuipers, 1983)	26
Abbildung 2-10	Rankine-Prandtl'sche Bruchtheorie für begrenzte Lasten (Kézdi, 1952)	28
Abbildung 3-1	Versuchsanordnung in einem Teilschlag des Versuchsfeldes in Harste	31
Abbildung 3-2	Probenahmeterminale aus verschiedenen Teilschlägen (Abkürzungen: ZR – Zuckerrübe, WW – Winterweizen, WG – Wintergerste, HTD – Holmer Terra Dos)	32

Abbildung 3-3	Holmer Terra Dos, 6 reihiger Köpfrdebunker, Gewicht halbbeladen ca. 35Mg.....	33
Abbildung 3-4	Ansicht (nicht maßstabsgetreu) vom Displacement Transducer System (DTS) (Kühner, 1997).....	35
Abbildung 3-5	Messaufbau in der Grube mit den SSTs und einem DTS....	37
Abbildung 3-6	Aufbau der Multistep-Drucksetzungsanlage	42
Abbildung 3-7	Kalibrierung der Meßsensoren (Kraft-, Wegaufnehmer und Tensiometer)	44
Abbildung 3-8	Bestimmung der Vorbelastung aus der Drucksetzungskurve nach der Methode nach Casagrande (1936).....	45
Abbildung 3-9	Bestimmung des maximalen Scherwiderstandes bei einer Scherkurve unter Berücksichtigung der Wasserspannung (schematische Darstellung)	47
Abbildung 4-1	Gemessene gesamte Kontaktflächen unter allen Rädern bei der Pflug- und Mulchvariante und auf Asphalt	52
Abbildung 4-2	Zusammenhang zwischen Kontaktflächen und Kontaktflächendrücken bei unterschiedlichen Radlasten bei der Pflug- und Mulchvariante (die Abkürzungen sind dieselben wie in der Tabelle 4-3) (V-Vorderrad, H-Hinterrad, L-Links, R-Rechts).....	54
Abbildung 4-3	Beispiel für die vertikale und horizontale Bodenbewegung im Oberboden (20cm Tiefe) bei der Überfahrt mit Vorder- und Hinterrad (4. Wiederholung, Mulch, im Nov. 2002)	56
Abbildung 4-4	Relative Bodenbewegung in 20 und 40 cm Tiefe bei Pflug- und Mulchvarianten zu den Befahrungsterminen Nov. 2002 und Nov. 2003. Die Zahlen unter den Säulen stellen die relative horizontale Bodenbewegung in mm dar (Die Nummern der Bearbeitungsvarianten sind unterschiedliche Befahrungsflächen)	57

Abbildung 4-5	Typische Hauptspannungsverläufe (σ_1 , σ_2 , σ_3) und Invarianten (MNS, OCTSS) des Spannungstensors am Beispiel der beiden Varianten: Pflug und Mulch (4. Feldwiederholung, im Nov. 2002).....	59
Abbildung 4-6	Spannungskomponenten bei Pflug- und Mulchvariante in unterschiedlichen Tiefen im Nov. 2002.....	60
Abbildung 4-7	Lastabhängiger Spannungseintrag (σ_1) in unterschiedlichen Tiefen (keine Angaben für die Pflugvariante bei höherer Radlast)	61
Abbildung 4-8	Spurversetzte Spannungskomponenten bei Pflug- und Mulchvariante in unterschiedlichen Tiefen im Nov. 2002.....	62
Abbildung 4-9	Spannungskomponenten bei Pflug- und Mulchvariante in unterschiedlichen Tiefen im Nov. 2003 (keine Angaben sind für Pflug 60cm Tiefe vorhanden)	63
Abbildung 4-10	Spurversetzte Spannungskomponenten bei Pflug- und Mulchvariante in unterschiedlichen Tiefen im Nov. 2003.....	64
Abbildung 4-11	Flächenanteil der Biomakroporen bzw. Regenwurmgänge in drei Tiefen und unterschiedlichen Bearbeitungen im Nov. 2002	73
Abbildung 4-12	Flächenanteil der Biomakroporen bzw. Regenwurmgänge in drei Tiefen und unterschiedlichen Bearbeitungen im Nov. 2003	74
Abbildung 4-13	Richtungswechsel eines Regenwurmgangs in der Pflugsohle	75
Abbildung 4-14	Aggregatlagerungsdichte im Nov. 2003 (2. und 4. Feldwiederholung).....	80
Abbildung 4-15	Zusammenhang zwischen Aggregatlagerungsdichte und Lagerungsdichte von ungestörten Proben (2. und 4. Feldwiederholung, im Nov. 2003)	81
Abbildung 4-16	Luftkapazität und nutzbare Feldkapazität bei allen Probenahmeterminen (St. Zyl.: 100cm ³)	82

Abbildung 4-17	Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Flächenanteil der Regenwurmgänge (im Nov. 2002 und 2003).....	85
Abbildung 4-18	Mittelwerte von jeweils 6 Stechzylindern der Gesamtporenvolumina (GPV) der jeweiligen Varianten und deren Standardabweichung (St. Zyl.: 100cm ³).....	87
Abbildung 4-19	Luftleitfähigkeitsquotient (nach/vor Belastung) nach unterschiedlichen Auflasten bei allen Varianten und Tiefen, berechnet aus k_l [log cm/d] (St.Zyl: 236cm ³) im Nov. 2003	89
Abbildung 4-20	Zusammenhang zwischen der Luftleitfähigkeit vertikal und horizontal entnommener Proben (St.Zyl.: 236cm ³), im Nov. 2003	90
Abbildung 4-21	Koeffizient der Luftleitfähigkeit an horizontal entnommenen Proben in zwei Tiefen nach unterschiedlichen Auflasten (jeder Kurvenpunkt stellt eine einzelne Probe dar), berechnet aus k_l [log cm/d] (St.Zyl.: 236cm ³), im Nov. 2003.....	91
Abbildung 4-22	Zusammenhang der gemessenen gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f) zwischen vertikal und horizontal entnommenen Stechzylinderproben (St.Zyl.: 100cm ³), im Nov. 2003.....	92
Abbildung 4-23	Koeffizient zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben bei gemessener Wasser- (k_f) und Luftleitfähigkeit (k_l) berechnet aus log cm/d (St. Zyl: 100cm ³), im Nov. 2003.....	93
Abbildung 4-24	Geschätzte gesättigte Wasserleitfähigkeit im Nov. 2003 (nach Schaap und Leij, 1998)	95
Abbildung 4-25	Zusammenhang zwischen Luftpermeabilität (K_l) und gesättigte Wasserpermeabilität (K_f) von allen vertikal (V) und horizontal (H) entnommenen Stechzylinderproben (St. Zyl.: 100cm ³), im Nov. 2003.....	96
Abbildung 4-26	Zusammenhang zwischen Luft- und Wasserpermeabilität an vertikal und horizontal entnommenen Stechzylinderproben (100cm ³) hinsichtlich auf die Tiefen, im Nov. 2003.....	97

Abbildung 4-27	Zusammenhang zwischen der Porengrößenverteilung und den Leitfähigkeiten, ermittelt an vertikal entnommenen Proben (alle gemessenen 100cm ³ Stechzylinderproben), im Nov. 2003	99
Abbildung 4-28	Vorbelastung bestimmt unter Berücksichtigung von σ und σ' bei allen Varianten bei pF1,8 Vorentwässerung	105
Abbildung 4-29	Vorbelastung vertikaler (V) und horizontaler (H) Richtung bei pF1,8 Vorentwässerung, im Nov. 2003	108
Abbildung 4-30	Exemplarische Mohr-Coulomb'sche Bruchgeraden der unterschiedlichen Varianten in einer Tiefe von 12cm bei pF1,8 Vorentwässerung, im Nov. 2002	111
Abbildung 4-31	Kohäsion und Winkel der inneren Reibung aller Varianten und für alle Tiefen sowie Probenahmetermine bei pF1,8 Vorentwässerung ..	112
Abbildung 4-32	Mohr-Coulomb'sche Bruchgeraden und die maximale Scherbeanspruchung bei der Befahrung. Einzelne Messwerte aus Nov. 2002 bei den jeweiligen Feldwiederholungen.....	116
Abbildung 4-33	Mohr-Coulomb'sche Bruchgeraden und die maximale Scherbeanspruchung bei der Befahrung. Einzelne Messwerte aus Nov. 2003 bei den jeweiligen Feldwiederholungen.....	117
Abbildung 4-34	Zugspannung bei den vertikal und horizontal entnommenen Proben bei pF1,8 Vorentwässerung, im Nov. 2003	118
Abbildung 4-35	Schematische Darstellung des Aufbrechens von Platten im Boden	122
Abbildung 4-36	Setzungsverläufe bei unterschiedlichen Auflastzeiten pro Druckstufe während der Drucksetzungsversuche	124
Abbildung 4-37	Wasserspannungsverläufe bei unterschiedlichen Auflastzeiten pro Druckstufe während der Drucksetzungsversuche.....	125

Abbildung 4-38	Wasserspannungsunterschiede ($\Delta\psi_1$) zwischen Maximal- und Anfangswert der jeweiligen Auflaststufen als Funktion der Zeit während der Abfolge der Auflaststufen.....	126
Abbildung 4-39	Wasserspannungsunterschiede ($\Delta\psi_2$) zwischen Maximal- und Endwert der jeweiligen Auflaststufen als Funktion der Zeit während der Abfolge der Auflaststufen	127
Abbildung 4-40	Wasserspannungs- und Porenzifferverläufe bei definierten Auflasten als Grundlage für die Vorbelastungsbestimmung.....	128
Abbildung 4-41	Änderung der Vorbelastung und des Umkehrpunktes der Wasserspannungs-/Auflastbeziehung als Funktion der Belastungsdauer	129
Abbildung 4-42	Exemplarischer Verlauf der Wasserspannungen während des Drucksetzungsversuches im Ödometer.....	131
Abbildung 4-43	Wasserspannungsverläufe bei 10min und 120min pro Auflaststufe an gestörten und ungestörten Bodenproben (die Kurven der ungestörten Proben sind repräsentativ für 1Mb12cm im Nov. 2002)	133
Abbildung 4-44	Beziehung zwischen Vorbelastung und Umkehrpunkt der Wasserspannungskurve während des Drucksetzungsvorgangs in Abhängigkeit von der Auflastzeit pro Auflaststufe (im Nov. 2002).....	134
Abbildung 4-45	Koeffizient der Vorbelastung zwischen 10 und 120min Auflastzeit pro Auflaststufe (im Nov. 2002)	136
Abbildung 4-46	Exemplarischer gravimetrischer Wassergehaltsverlauf während des Drucksetzungsvorgangs bei 4 unterschiedlichen ungestörten Bodenproben	138
Abbildung 4-47	Wassergehalt der Sintermetallplatten und des Bodens sind als ein geschlossenes System anzusehen.....	139

Abbildung 4-48	Zur Vorbelastungsbestimmung benötigte Drucksetzungskurven mit Normalspannung und effektiver Spannung (mit und ohne χ) (als Beispiel V1Mb40 im Nov. 2003).....	140
Abbildung 4-49	Beziehung zwischen den berechneten einzelnen Vorbelastungswerten auf der Grundlage der Gesamt(Normal)speannung und der effektiven Spannung (ohne χ) (im Nov. 2003).....	141
Abbildung 4-50	Beziehung zwischen den ausgerechneten einzelnen Vorbelastungswerten mit effektiver Spannung unter Berücksichtigung des Sättigungsgrades (mit χ -Faktor) und der effektiven Spannung (ohne χ -Faktor) (im Nov. 2003).....	142
Abbildung 4-51	Beziehung zwischen den Vorbelastungswerten bei Entwässerungen von -60hPa und -300hPa bei allen Varianten und Tiefen (im April 2002).....	143
Abbildung 4-52	Beziehung zwischen den Kohäsionswerten bei Entwässerungen von -60hPa und -300hPa (im April 2002).....	144
Abbildung 4-53	Einfluss der unterschiedlich aggregierten Bodenhorizonte auf die Vorbelastungs- und Kohäsionswerte bei -60 und -300hPa Entwässerungsstufe (im April 2002).....	148
Abbildung 5-1	Folge einer erstmalig die Eigenstabilität überschreitende intensive Belastung durch die Verwendung einer schwereren Maschine.....	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Profilbeschreibung der Parabraunerde aus Löss.....	30
Tabelle 3-2	Fahrzeugbeschreibung (Holmer Terra Dos, 2004)	34
Tabelle 4-1	Maschinenspezifische Parameter zu den Befahrungsversuchen	50
Tabelle 4-2	Kontaktflächen [cm ²] des Stollen- und Stollenzwischenraumes der Zuckerrübenerntemaschine auf der Pflug-, Mulchvariante und Asphalt (V-Vorderrad, H-Hinterrad, L-Links, R-Rechts)	51
Tabelle 4-3	Berechnete Kontaktflächen und Kontaktflächendrücke nach Koolen und Kuipers (1983) (1) und nach Bolling und Söhne (1982) (2) im Vergleich zu gemessenen Kontaktflächen auf Asphalt als hartem Medium bei unterschiedlichen Radlasten und Reifeninnendrücken (V-Vorderrad, H- Hinterrad, L-Links, R-Rechts).....	53
Tabelle 4-4	Spurtiefen bei Pflug- und Mulchvariante (im Nov. 2002 und 2003)	55
Tabelle 4-5	Zusammenfassende Ergebnisse der direkten erst- und einmaligen Befahrungen: größte Hauptspannung (σ_1), Verhältnis zwischen den drei Hauptspannungen ($\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$) und die octaedrische Spannungsziffer (OCTSS/MNS) aus allen Feldmessungen und den beiden Befahrungsterminen.....	66
Tabelle 4-6	Lagerungsdichte bei allen Probenahmeterminen (St.Zyl.: 100cm ³)	79
Tabelle 4-7	Interaggregatporenvolumen im November 2003	86
Tabelle 4-8	Porenzifferänderung (ϵ) nach 400kPa Belastung und nach Entlastung bei vertikal (V) und bei horizontal (H) entnommenen Proben, bei pF1,8	109

Tabelle 4-9	Quotient der Vorbelastung aus horizontal und vertikal entnommenen Proben (die kleinen Buchstaben bedeuten die signifikante Differenz zwischen Behandlungen innerhalb einer Tiefe, die großen Buchstaben charakterisieren die Signifikanzunterschiede zwischen den Tiefen innerhalb einer Variante bei einem Signifikantniveau von 0,05) ...	110
Tabelle 4-10	Kohäsion und Winkel der inneren Reibung bei pF1,8 Vorentwässerung (die kleinen Buchstaben bedeuten die sign. Differenz zwischen Behandlungen innerhalb einer Tiefe, die großen Buchstaben definieren die Signifikanz zwischen den Tiefen innerhalb einer Variante).....	114
Tabelle 4-11	Quotient der Kohäsion (C) bzw. des Winkels der inneren Reibung (φ) zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben, Nov. 2003	115
Tabelle 4-12	Zusammenfassende Kennzeichnung von Bruchbedingungen in unterschiedlichen Feldwiederholungen und Tiefen bei beiden Befahrungsterminen (+: Scherbruch; -:kein Scherbruch; k.A.: keine Angabe).....	117
Tabelle 4-13	Quotient der Zugspannung zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben, im Nov. 2003.....	119

Abkürzungen

%	Prozent
∅	Durchmesser
°	Einheit von Winkel (Grad)
°C	Einheit von Temperatur (Grad Celsius)
A	Fläche
Apr.	April
a_v	Verdichtungsbeiwert
B/d	Reifengröße (Breite/Durchmesser)
bar	Einheit des Reifeninnendrucks
c	Kohäsion
c'	effektive Kohäsion
cm	Einheit von Länge (Zentimeter)
cm ²	Einheit von Fläche (Quadratcentimeter)
cm ³	Einheit von Volumen (Kubikcentimeter)
d	Tag
DTS	Displacement Transducer System
e	Porenziffer
e_0	Anfangsporenziffer
e_p	Porenziffer bei einer bestimmten Auflast (p)
e_r	Endporenziffer (Residual)

e_s	Anfangsporenziffer (Saturated)
E_v	Verdichtungszahl
F	1. Kraft, 2. Fläche
f	Querschnitt des Standrohres
g	Erdbeschleunigung
g/cm^3	Einheit von Lagerungsdichte
GPV	Gesamtporenvolumen
h	1. Anfangshöhe des Bodens, 2. Stunde, 3. Hekto
H	1. Horizontal, 2. Hinterrad
h	Höhe
h_0	1. theoretische Höhe des festen Anteils des Bodens, 2. Druckhöhe zu Beginn der Messung
h_1	Druckhöhe am Ende der Messung
h_∞	Endsetzung
ha	Hektar
ha/h	Einheit von Maschinenarbeitsleistung (Hektar pro Stunde)
Hor.	Horizontal
h_t	bis zu t Zeit verlaufene Setzung
HTD	Holmer Terra Dos
I, II, III	Sektoren eines Grundbruchs
IfZ	Institut für Zuckerrübenforschung

K	Quotient
k.A.	keine Angabe
K_0	Ruhedruckkoeffizient
kf	gesättigte Wasserleitfähigkeit
Kf	Wasserpermeabilität
kg	Einheit von Gewicht (Kilogramm)
kl	Luftleitfähigkeit
Kl	Luftpermeabilität
km	Einheit von Länge (Kilometer)
km/h	Einheit von Geschwindigkeit (Kilometer pro Stunde)
KW	Einheit von Leistung (Kilowatt)
l	1. Länge, 2. Liter
L	Links
L/B/H	Länge, Breite, Höhe
$l+\Delta l$	Deformation einer Länge
LK	Luftkapazität
m	Einheit von Länge (Meter)
Mb	Mulch befahren
Mg	Einheit von Gewicht (Megagramm)
min	Einheit von Zeit (Minuten)
mm	Einheit von Länge (Millimeter)

mm/min	Einheit von Vorschubgeschwindigkeit
MNS	mittlere Normalspannung
Mub	Mulch unbefahren
mV	Einheit von elektrischer Spannung (Millivolt)
N	Einheit von Kraft und Last (Newton)
nFK	nutzbare Feldkapazität
Nov.	November
OCTSS	oktaedrische Scherspannung
OCTSS/MNS	Octaedrische Spannungsziffer
p	1. Auflast, 2. Belastung, 3. Druck
Pa	Einheit von Druck (Pascal)
Pb	Pflug befahren
pF	dekadischer Logarithmus der Porenwasserspannung
pH	logarithmierter Wert der H_3O^+ -Ionen in einer wässrigen Lösung
PS	Einheit von Leistung (Pferdestärke)
Pub	Pflug unbefahren
Pv	Vorbelastung
r	Radius
R	Rechts
R^2	Korrelationskoeffizient
SST	Stress State Transducer

St. Zyl.	Stechzylinder
t	Zeit
TW	Totwassergehalt
u	neutrale Spannung des Wassers
ü.N.N	über Normal Null
u_a	Porenluftdruck
u_w	Porenwasserdruck
V	1. Vertikal, 2. Vorderrad, 3. Volumen
Vert.	Vertikal
Wdh.	Wiederholung
WG	1. Wassergehalt, 2. Wintergerste
WW	Winterweizen
x, y, z	Hauptrichtungen
ZR	Zuckerrübe
α	Winkel zwischen $\Delta\varepsilon$ und Δp
α, β, γ	Mohr'sche Kreise
γ_{oct}	oktaedrische Scherverformung
Δ	Änderung
ε	Porenziffer
ε_0	Anfangsporenzahl
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Normalverformungen in den Hauptrichtungen

ε_{oct}	oktaedrische Normalverformung
ε_{xyz}	Normalverformung in der xyz-Richtung
θ	Winkel zwischen senkrechter Richtung und Vektorradius
μ	Konsolidationsbeiwert
ν	Konzentrationsfaktor
ρ_l	Dichte der Luft
σ	Gesamtspannung
σ'	effektive Spannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
σ_n	Normalspannung
σ_{oct}	oktaedrische Normalspannung
σ_r	Normalspannung zum Vektorradius
σ_x	Spannungspunkt auf der Koordinatengeraden
τ	Scherspannung
τ_{oct}	oktaedrische Scherspannung
φ	Winkel der inneren Reibung
φ'	effektiver Winkel der inneren Reibung
χ	Faktor, der den Wassersättigungszustand des Bodens beschreibt
$\psi_{i,\text{anfang}}$	ursprünglicher Porenwasserdruck zu Beginn der Belastung
$\psi_{i,\text{end}}$	Porenwasserdruck zum Ende der Belastung

$\psi_{i,\max}$	größter Porenwasserdruck während der Belastung
Ω	Winkel über die Orientierung der oktaedrischen Scherspannung in der Oktaederebene

1 Einleitung

Heutzutage werden auf Deutschlands fruchtbarsten Böden ca. 500.000ha mit Zuckerrüben bestellt mit einer Ertragsleistung von ca. 55t/ha, was einen Zuckerertrag von ca. 8,5t/ha ergibt. In Deutschland werden somit ca. 4 Millionen Tonnen Zucker erzeugt (Zuckerindustrie, 2005). Die Erntezeit ist Wetterbedingt sehr eingeschränkt und dauert von September bis Mitte November.

Die dokumentierte Geschichte der Zuckerrübe (*Beta vulgaris var. Altissima L.*) beginnt mit der Entdeckung von zuckerreichen Inhaltsstoffen in der Zuckerrübe und den ersten pflanzenbaulichen Versuchen durch A. S. Marggraf und F. C. Achard Ende des 18. Jahrhunderts (Anonym, 1984). Die ersten Geräte wurden um 1850 von der Industrie geliefert, die ein Abreißen der Wurzeln beim Aufziehen der Rüben verhindern sollten. Bis nach dem ersten Weltkrieg blieb die gebräuchlichste Erntemethode die beschwerliche Handarbeit gewesen. In den Jahren 1920-1922 wurde das „Pommritzer Verfahren“ entwickelt, dessen Prinzip darin bestand, die im Boden sitzende Rübe zu köpfen, das Blatt zu ernten und die Rübe zu roden. Dieser Ablauf galt somit als Grundstein in der Entwicklung der modernen Rodeverfahren. Zunächst wurden die einzelnen Arbeitsschritte der Blatt- und Rübenernte mechanisiert. Das schwere Handroden wurde von einem ein- oder mehrreihigen schleppergezogenen Rodepflug und später von Bunkersammlern abgelöst, die neben dem Roden und Reinigen auch das Zwischenbunkern der Rüben übernahmen (Meincke, 1954).

Damals wurden die Rübenvollerntemaschinen unter folgenden Grundsätzen gebaut (Meincke, 1954): Erntemaschine und Schlepper sollten neben den Rübenreihen fahren, so dass mit Spurweite, Reifenprofil und Steuerung keine Rücksicht auf den Reihenabstand der Rüben genommen werden muß und das Rübenblatt nicht verschmutzt wird. Die Rodung von Rübenblatt und Rüben sollten gleichzeitig stattfinden. Blätter und Rüben sollten in Querschwaden abgelegt werden, die Bedienung sollte vom Schlepperfahrer erledigt werden können.

Die Entwicklung der Köpfrodemechanismen ging schnell und stetig voran und erreichte in den `80er Jahren einen Höhepunkt in der Produktionsvielfalt mit 1 bis 6-reihigen gezogenen und Selbstfahrer Köpfrodemaschinen. Zur Durchführung der Rübenkampagne werden heute immer leistungsfähigere und damit schwerere Erntemaschinen eingesetzt. Folgende Grundsätze werden bei der Weiterentwicklung berücksichtigt (FAT, 2001): Verminderung der Ernteverluste, Erhöhung der Reihenzahl (bei Köpfrdebunker), Zusammenlegung der Arbeitsgänge bei mehrphasigen Verfahren, Perfektionierung der Funktionssicherheit, Arbeitsqualität und des Arbeitskomforts, während Blattbergung/-verfütterung geringe Bedeutung haben.

Seit den `90er Jahren dominieren die 5 bis 7-reihigen Selbstfahrer Köpfrdebunker in Mitteleuropa, wobei in Großbritannien, Belgien und Frankreich noch immer die 9-reihigen Köpfrdelader weiter entwickelt werden. Während in den nördlichen und südlichen Ländern mit kleinen Feldparzellen die 1 bis 3-reihigen gezogenen und Selbstfahrer Köpfrdebunker bevorzugt zum Einsatz kommen, ist in den mitteleuropäischen Ländern mit großen Feldparzellen, Deutschland mit inbegriffen, der Trend zu 6-reihigen Köpfrdebunkern unverkennbar (FAT, 2001). Die Landmaschinenentwicklung ist mit einer drastischen Gewichtserhöhung verbunden, denn Kompromisse, wie etwa nicht ausreichende Bunkerinhalte auf langen Feldparzellen akzeptiert die Praxis nicht mehr (Ehlers, 2003).

Zum Zweck der Funktionssicherung der Böden, die den Pflanzen unter anderem als Standort dienen, wurde das Bundes-Bodenschutzgesetz (Anonym, 1998) erlassen. In §17 Absatz 2 wird unter den Gesichtspunkt der „*guten fachlichen Praxis*“ definiert, dass die Bodenfruchtbarkeit als natürliche Ressource zu sichern ist, die Bodenstruktur erhalten oder verbessert werden soll, dass Bodendegradationen, insbesondere die von Maschinen verursachte Bodenverdichtung, möglichst vermieden werden sollen, um folglich auch Bodenabträge zu vermeiden (Anonym, 1998). Im Verlauf der Vegetationsperiode werden Böden aber u. a. während der Bodenbearbeitung und der Ernte jährlich mehrmals intensiv belastet. Dies führt gleichzeitig je nach Eigenstabilität zu einer Bodendeformation, bzw. einer irreversiblen

Gefügestörung im Boden (Voorhees et al., 1978; Soane et al., 1981; 1982; Hakansson et al., 1988; Drescher et al., 1988; Horn et al., 2000; Pagliai und Jones, 2002). Die Landmaschinenentwicklung kommt mit einer Leistungserhöhung der Maschinen, verbunden mit einer Gewichtszunahme, dem Bundes-Bodenschutzgesetz nicht entgegen und verstärkt somit die Problematik der Bodenverdichtung (Soane und Ouwerkerk, 1994). Der andauernde Einsatz von immer schwereren landwirtschaftlichen Maschinen bewirkt aber nicht nur eine Zunahme des stark plattigen und tieferreichenden verdichteten Pflugsohlenbereichs. Dadurch wird die normalerweise natürliche, tiefenabhängige Bodengefügebildung gestört (Ehlers et al., 2000). Diese Tieferlegung der Bodenverdichtung hat Auswirkungen auf die Porenfunktionen wie den Wasser-, Wärme- und Lufthaushalt ebenso wie auch das Wurzelwachstum beeinflusst wird, was mit einer verringerten Nährstoffaufnahme verbunden ist, und damit unmittelbar ertragswirksam wird. Außerdem wird die Wasserinfiltration verzögert und der Oberflächenabfluss, bzw. die Bodenerosion erhöht.

Durch eine Bodenverdichtung ändern sich die Bodenstruktur und die daraus resultierenden bodenphysikalischen Kenngrößen, wie Lagerungsdichte, Porenziffer, Porosität, Leitfähigkeiten, Drucksetzungsverhalten, Vorbelastung und Scherparameter.

In der vorliegenden Arbeit werden daher die Ergebnisse von bodenphysikalischen Untersuchungen zu folgenden Fragestellungen vorgestellt und diskutiert:

- Wie reagiert die Wasserspannung als stabilisierender Faktor im Boden (=negativer Porenwasserdruck, Meniskenzugkräfte) auf applizierte Auflasten?
- Geht eine bodenstrukturelle Änderung durch eine Befahrung mit schweren landwirtschaftlichen Maschinen (z.B. ein Zuckerrübenköpfrödebunker) einher und in wie weit ändert sich dadurch die ökologische Funktion des Porensystems (Wasser- und Lufthaushalt)?

- Wie weit können mechanische Belastungen von unterschiedlichen Bodenbearbeitungssystemen (konventionell- Pflug und konservierend- Mulch) kompensiert werden, bzw. welche Auswirkungen haben sie auf die Bodenstruktur?

2 Einführung in die Thematik

2.1 Spannungen im Boden

Wird ein Boden mechanisch belastet, dann wirken Kräfte auf den Boden ein, die bezogen auf eine definierte Fläche als Druck oder Zug bezeichnet werden. Im Inneren des Bodens spricht man von Spannungen, während von außen entsprechend Drücke einwirken (Hartge und Horn, 1999).

2.1.1 Wirksame und neutrale Spannungen

Der ungesättigte Boden ist ein Dreiphasensystem und besteht aus der festen, flüssigen und gasförmigen Phase. Die feste Phase, bzw. die Körner, die flüssige Phase, bzw. das Porenwasser und auf der Oberfläche der Körner absorbiertes Wasser sind bei den im Boden wirksamen Spannungen nicht zusammendrückbar. Der Boden kann also nur durch das Auspressen der Luft und des Porenwassers zusammengedrückt werden. Nach der Art der Spannungsübertragung werden sich die Spannungskomponenten voneinander unterscheiden.

Da die Porenräume zwischen den Einzelkörnern im allgemeinen mit Wasser und Gas gefüllt sind, werden die von außen wirkenden Kräfte durch die drei Phasen übertragen. So treten Spannungen in allen drei Phasen auf. Nimmt man eine Schnittfläche eines Körnerhaufens an, wie es in Abbildung 2-1 gezeigt ist, die durch feste Körner, Wasserteilchen und luftgefüllte Poren hin durchgeht, werden die Spannungen auch in diesen Phasen übertragen.

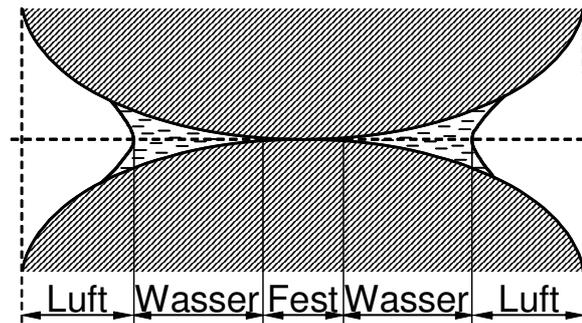


Abbildung 2-1 Spannungen im Dreiphasensystem an einer Schnittfläche

Durch eine von außen wirkende Kraft werden die Körner zusammengepresst und berühren sich einander. Die Fläche, auf welcher die Kraft wirkt, setzt sich in diesem System aus drei Teilen zusammen: Berührungsflächen zwischen Körnern, sowie Flächen, in denen Wasser und Luft wirken. Folglich wirken Spannungen im Boden auch in diesen 3 Komponenten.

Bei einem Zweiphasensystem, der aus dem Festteil und Wasser besteht, wird immer dann ein Porenwasserüberdruck bei einer Belastung auftreten, wenn die Lastaufbringung schneller als die auflastabhängige Entwässerung erfolgt. Die Gesamtspannung (σ) bei einem gesättigten Boden lässt sich in diesem Fall aus zwei Teilen zusammensetzen: wirksame oder effektive Spannung (σ'), die im bzw. zwischen Kornteilchen des Bodens zur Geltung kommt, und einer neutralen Spannung des Wassers (u). Für einen solchen Zustand, bei welchem im Boden ein Gleichgewicht herrscht, wird die effektive Spannungsgleichung verwendet (Terzaghi und Jelinek, 1954):

$$\sigma = \sigma' + u$$

Gl. 2-1

Neutrale Spannungen werden im Boden durch den hydrostatischen Druck des ruhenden Wassers, durch eine Zusammendrückung, durch die Oberflächenspannung des Wassers und durch die Auflockerung oder Verdichtung infolge von Scherdeformationen und durch den Strömungsdruck des Wassers hervorgerufen. Die neutrale Spannung kann entweder positive Vorzeichen bei gesättigtem Boden oder negative bei ungesättigtem Boden annehmen. Nimmt die neutrale Spannung 0hPa oder größere Werte an, dann kennzeichnet dieses die nicht mehr stabilisierende, jedoch inkompressible Wirkung des Wassers im Boden.

Wenn das Zweiphasensystem aus der festen und gasförmigen Phase besteht, entstehen ebenfalls neutrale Spannungen, allerdings in der Luft. Wenn die Luft durch eine Auflast aus den Poren wiederum schnell genug entweichen kann, wird der Luftüberdruck unmittelbar auf den Wert des atmosphärischen Druckes sinken.

Im Dreiphasensystem muß in der effektiven Spannungsgleichung folglich sowohl die feste, flüssige und gasförmige Phase hinsichtlich der einzelnen Spannungskomponenten berücksichtigt werden (Bishop, 1961). Hierbei muß in diesem Fall auch der χ -Faktor eingefügt werden, der den Flächenanteil des Porenwassers oder entgegengesetzt der Flächenanteil der luftgefüllten Poren bei einem gedachten Querschnitt durch das Porensystem des ungesättigten Bodens beschreibt:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \text{Gl. 2-2}$$

Hierbei ist u_a der Porenluftdruck, u_w der Porenwasserdruck, χ der Faktor, der den Wassersättigungszustand des Bodens beschreibt.

Der χ -Faktor nimmt Werte zwischen 0 bei pF7 und 1 bei wassergesättigtem Zustand an. Der χ -Faktor ist eine Funktion des Wassersättigungsgrades. Nach Snyder und Miller (1985) beschreibt er den Wassersättigungsgrad und damit die Charakteristik der pF/WG-Beziehung. Der Einfluss des Porenluftdruckes wird allgemein als vernachlässigbar angesehen.

2.2 Zusammendrückbarkeit des Bodens

Werden auf dem Boden vertikale Kräfte aufgetragen und eine horizontale Verformung ist nicht möglich (seitliche Dehnung ist nicht möglich), werden nur vertikale Formänderungen im Boden stattfinden.

Durch eine Zusammendrückung des Bodens wird die Porenziffer abnehmen. Dies kann bei folgenden Vorgängen vorkommen (Kézdi, 1964):

- Die Körner schieben sich übereinander und so verändert sich die Porenstruktur.
- Die Einzelkörner als elastischer Körper erleiden Formänderungen. Durch eine einwirkende Kraft im Körnerhaufen werden unterschiedliche Beanspruchungen vorkommen, wie Druck, Biegung, Zug und Scherung. Die elastische Zusammendrückung der Körner ist aber immer sehr klein.

Durch eine Zusammendrückung wird das Porenwasser in den Poren neu orientiert und je nach ungesättigter Wasserleitfähigkeit mehr oder weniger schnell abgeleitet. Wenn der Boden eine hohe Wasserleitfähigkeit aufweist, dann wird eine Setzung durch eine Belastung mit nur kurzer Zeitverzögerung stattfinden. Wenn aber der Boden eine niedrige Wasserleitfähigkeit aufweist, dann wird das Porenwasser nur mit längerer Zeitverzögerung mobilisiert und es findet eine zeitlich verzögerte Setzung statt, die mit der Wasserableitung einhergeht. Der Zeitablauf dieser Zusammendrückbarkeit wird Konsolidation genannt, die im Kapitel 2.2.1 detailliert beschrieben wird.

Möchte man die Formänderung beschreiben, so bieten sich hierfür verschiedene Parameter an, die sich mit der Belastung ändern (wie z.B. Höhe, Porenziffer, Lagerungsdichte) wenn sie gegen die Auflast aufgetragen werden. So bekommt man eine typische Drucksetzungskurve, welche steil anfängt und mit zunehmender Auflast immer flacher wird (Abbildung 2-2). Aus den veränderbaren Parametern wird meistens die Höhenänderung des Bodens als Porenziffer ausgedrückt und nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$e_p = e_0 - \Delta e = \frac{h - h_0 - \Delta h}{h_0} \quad \text{Gl. 2-3}$$

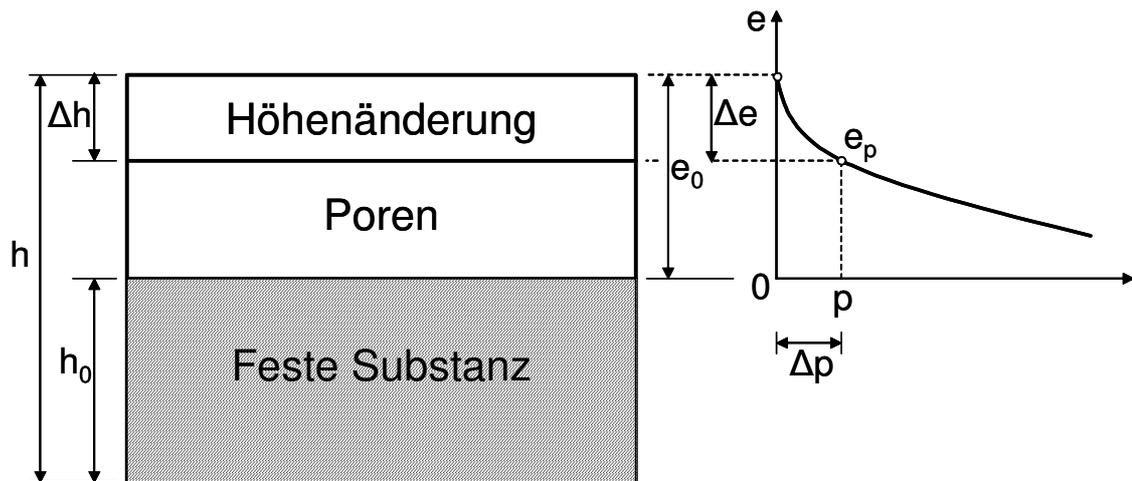


Abbildung 2-2 Volumenänderung der Bodenprobe und die dazu gehörige Drucksetzungskurve und deren Parameter (Kézdi, 1952)

Hierbei ist e_p die Porenziffer bei einer bestimmten Auflast (p), e_0 die Anfangsporenziffer, Δe die Porenzifferänderung, h die Anfangshöhe des Bodens, Δh die Höhenänderung und h_0 die theoretische Höhe des festen Anteils des Bodens.

Wird der Boden wiederholt be- bzw. entlastet, dann verhält er sich wie ein semielastisches Material: ein Teil der Volumenänderung durch die Zusammendrückung des Bodens ist eine bleibende Formänderung, die mit der Strukturänderung erklärt werden kann, während der andere Teil der Volumenänderung, meistens der kleinere Teil, die elastische, bzw. die reversible Verformung darstellt. Nach der Entlastung des Bodens wird die Drucksetzungskurve (Abbildung 2-3) oberhalb der Entlastungskurve verlaufen; die Form entspricht einer Hystereseschleife. Bei unterschiedlichen Bodentypen unterscheidet sie sich nur in der Neigung und Breite; die typische Form der Hystereseschleife bleibt jedoch erhalten. Wird bei Wiederbelastung der Wert der Vorbelastung (vorherige größte Belastung) erreicht, läuft die Drucksetzungskurve als eine Fortsetzung der Erstbelastung ab.

Wird die Verdichtungskurve linear aufgetragen, bekommt man den Verlauf aus der Abbildung 2-2. In der Praxis wird die Kurve häufig semilogarithmisch dargestellt und man erhält eine Gerade (Abbildung 2-3). Der Grenzübergang zwischen Erstverdichtungs- und Wiederverdichtungsast ergibt die Vorbelastung, die zur Vorhersage des Verhaltens des Bodens bei gegebenen Belastungen

verwendbar ist (Hartge und Horn, 1999). Für die Berechnung der Vorbelastung existieren mehrere grafische Methoden (Bölling, 1971). In der Land- und Forstwirtschaft erfolgt die Berechnung der Vorbelastung nach der Methode von Casagrande (1936), die im Kapitel „Material und Methode“ beschrieben ist.

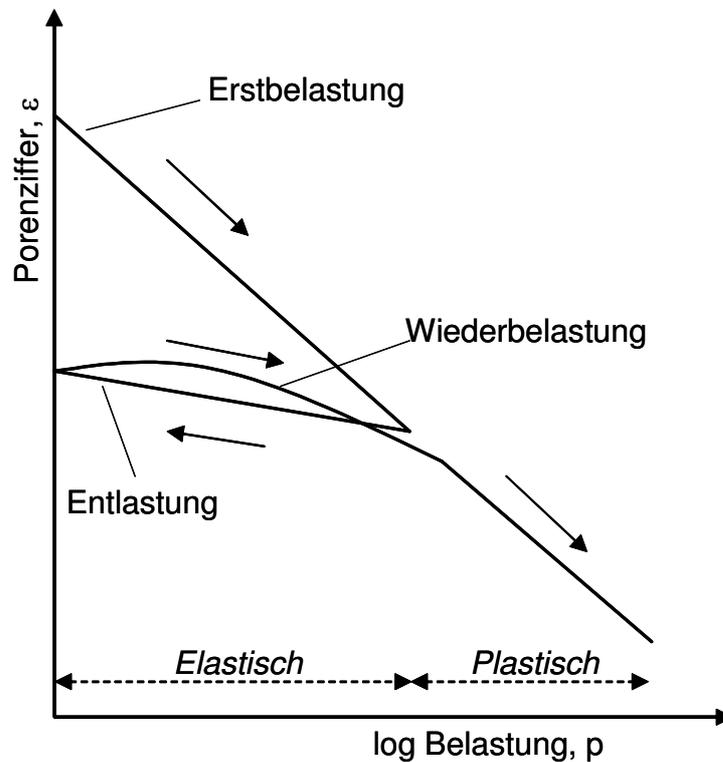


Abbildung 2-3 Idealisierte Drucksetzungskurve in semilogarithmischer Auftragung

Jeder Boden weist in der Natur eine Vorbelastung auf. Wurde der Boden schon in früheren geologischen Zeiten mit einer Schicht z.B. Eis, Deckschicht überlagert oder durch Austrocknung belastet, so gilt er auch als vorbelasteter Boden.

Die Zusammendrückbarkeit des Bodens hängt bei den Sanden vorwiegend von der Ausgangsdichte ab, bei Tonen ist auch der Anfangswassergehalt von Bedeutung. In der landwirtschaftlichen Betrachtung hängt die Zusammendrückbarkeit des Bodens neben dem Gewicht des darüber lagernden Bodens und der Last der Maschinen auch von der Frequenz und der Geschwindigkeit der Belastung (Lebert et al., 1989) und vom Wasser- sowie organischen Substanzgehalt des Bodens ab (Scheffer/Schachtschabel, 2002).

Je nach ursprünglicher Bodenstruktur kann deren Veränderung durch Bearbeitung (z.B. durch Pflügen, Tieflockerung) im Oberboden besonders ausgeprägt sein.

Zur Beschreibung der Verformungsfähigkeit bei elastischem Material wird in der Bodenmechanik das Elastizitätsmodul verwendet und durch die Spannung und Formänderung definiert (Kézdi, 1969). Bei dem Material, bei dem das Hooke'sche Gesetz gültig ist, ist das Elastizitätsmodul ein konstanter Wert. Bei dem Material, wo die Verformung durch eine Belastung mit der Drucksetzungskurve beschreibbar ist, gilt hingegen das Hooke'sche Gesetz nicht. In diesem Fall kann man nur in einem kleinen Teil der Kurve das Verformungsverhalten als Konstante ansehen. Der dem Elastizitätsmodul entsprechende Wert wird bei Böden als Verdichtungsbeiwert definiert (Abbildung 2-4) und wie folgt ausgerechnet:

$$a_v = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p}$$

Gl. 2-4

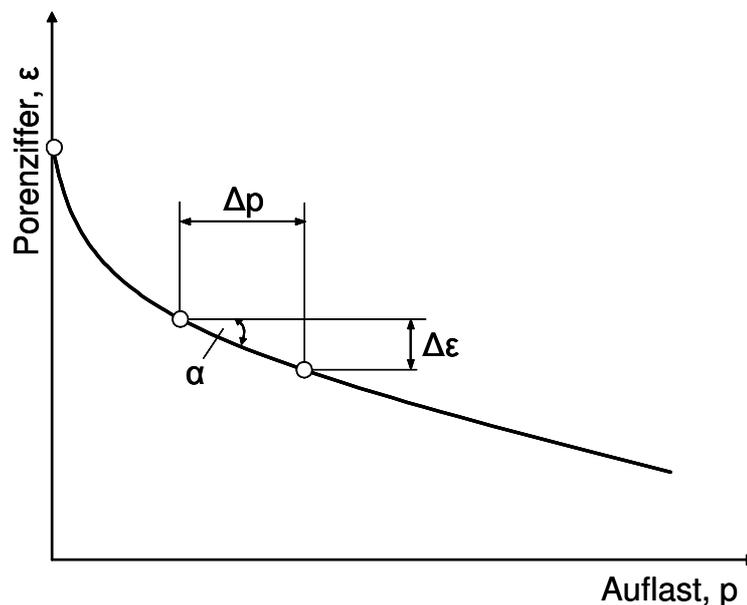


Abbildung 2-4 Definition des Verdichtungsbeiwertes bzw. der Verdichtungszahl

Wird in der Drucksetzungskurve statt der Porenziffer die Höhenänderung herangezogen, so bekommt man die Verdichtungszahl:

$$E_v = ctg \alpha = \frac{\Delta p}{\Delta h} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Bei den Gleichungen bedeutet a_v der Verdichtungsbeiwert, $\Delta \varepsilon$ die Porenzifferänderung bzw. Δh die Höhenänderung durch Belastungsänderung (Δp), E_v die Verdichtungszahl und α ist der Winkel zwischen $\Delta \varepsilon$ und Δp .

Zwischen dem Verdichtungsbeiwert und der Verdichtungszahl gilt folgender Zusammenhang:

$$a_v = \frac{1}{E_v} (1 + \varepsilon_0) \quad \text{Gl. 2-6}$$

wobei ε_0 die Anfangsporenzahl bedeutet.

Sowohl die Verdichtungszahl als auch der Verdichtungsbeiwert hängt von der Belastung und Anfangsporenziffer ab (Kézdi, 1964). Die Drucksetzungskurve kann durch die bodenphysikalischen Eigenschaften parametrisiert werden. In einem solchen Model werden von der Belastung abhängige Werte benutzt, um den Verdichtungsbeiwert definieren zu können (Assouline et al., 1997; Assouline, 2002; Bailey et al., 1986; Fritton, 2001).

2.2.1 Zeitlicher Ablauf der Zusammendrückbarkeit (Konsolidation)

Wird ein Boden belastet, wird die Zusammendrückung nicht zeitgleich erfolgen, sondern schreitet mit der Zeit voran. Folglich wird die vollständige Setzung erst nach längerer Zeit erreicht. Die zeitliche Verschiebung der Zusammendrückbarkeit beruht einerseits auf der Umorientierung der Körner, die belastungsabhängig erfolgt. Andererseits ist die Zusammendrückbarkeit von der Wasserleitfähigkeit abhängig. Böden, die eine kleinere Wasserleitfähigkeit aufweisen, können erst dann zusammengedrückt werden, wenn das Wasser in den Poren neu orientiert oder aus den Poren herausgepresst wird. Dieser Vorgang nimmt Zeit in Anspruch und wird als Konsolidation bezeichnet.

Bei der Konsolidation wird die Belastung zuerst vom Wasser getragen. In diesem Moment ändern sich die Porenwasserdrücke, die auch positive Werte

annehmen können. Im Falle von positiven Werten tritt keine Volumenänderung im Boden auf. Mit der Zeit wird das Wasser in den Poren umorientiert oder aus den Poren herausgepresst und so wird es möglich, dass die feste Phase zusammengedrückt werden kann. Hierbei nimmt die feste Phase einen Großteil der Belastung auf, wodurch eine Setzung stattfindet. Je zusammendrückbar der Boden ist, desto länger dauert die vollständige Setzung oder anders gesagt, je höher die Wasserleitfähigkeit des Bodens ist, desto schneller ist der Setzungsvorgang abgeschlossen. Dasselbe Prinzip gilt, wenn der Boden entlastet wird und im Boden statt Volumenabnahme eine Volumenzunahme vorkommt. Die Charakterisierung des zeitlichen Verlaufs der Konsolidierung wird im Folgenden beschrieben:

$$\mu = 100 \cdot \frac{\Delta h_t}{\Delta h_\infty} \quad \text{Gl. 2-7}$$

Hierbei ist μ der Konsolidationsbeiwert in %, Δh_t die bis zu t Zeit verlaufene Setzung und Δh_∞ die Endsetzung, die theoretisch nur nach unendlich langer Zeit stattfinden kann.

Der größte Teil der Setzung ist nach Abschluss der Konsolidation beendet. Der Wert der Endsetzung wird aber auch von dem sekundären Zeitfaktor beeinflusst. Hierbei findet während der sekundären Setzung eine Körnerumorientierung statt, die von der Reibung zwischen den Körnern abhängt. Dieser Vorgang ist bei Tonmineralen als Kriechen der Tonminerale bekannt.

2.2.2 Wasser als Stabilitätsfaktor

Das Wasser im Porenraum zwischen den Körner hat stets einen Einfluss auf die Stabilität der Lagerung. Das Wasser nimmt je nach dem Sättigungsgrad einen erheblichen Anteil des gesamten Bodens ein. Das Wasser beeinflusst die Stabilität des Bodens durch die Spannungsänderung an den Korn- und Wasserfilmkontakten. Aus Sicht der Stabilität kann man das Wasser im Boden in folgende Erscheinungsformen unterscheiden, die beim Aufbau der

Bodenstruktur und bei der Beeinflussung der Bodeneigenschaften eine große Rolle spielen (Kézdi, 1969):

- Das *Porenwasser* kann durch hydrodynamische Kräfte in Bewegung gebracht werden, vorausgesetzt, dass es sich nicht in geschlossenen Poren befindet.
- Das *Solvatationswasser* umhüllt die einzelnen Körner und steht unter der Wirkung der polaren und elektrischen Kräfte sowie der Ionenverbindung. Die Dicke dieser Schicht ist kleiner als 200 Moleküle. Die Dichte und die Viskosität ist größer als die des normalen Wassers. Das Solvatationswasser ist noch beweglich.
- Das *adsorbierte Wasser* umhüllt die Minerale mit einer dünnen Schicht von 1 bis 10 Molekülen. Dieses Wasser kann durch normale hydrodynamische Kräfte nicht in Bewegung gebracht werden, da die Adsorptionskräfte sehr groß sind.
- Das *Strukturwasser* gehört nicht zur Kategorie Wasser. Es besteht aus Hydroxylgruppen, die wesentliche Bestandteile der Kristallgitter sind. Dieses Wasser kann nur bei einer sehr hohen Temperatur entfernt werden, bei welcher die Kristallstruktur bereits zerstört wird. Per Definition handelt es sich folglich um „feste Substanz“.

Aus der Sicht der mechanischen Beanspruchung des Bodens und des Wassers werden das Strukturwasser und das Adsorptionswasser bei normalen Temperatur- und Druckänderungen nicht beeinflusst. Diese Wechselwirkungen werden in der Rheologie näher betrachtet. In den Bodenstabilitätseigenschaften spielt dagegen die äußere Form des Wassers eine große Rolle, die in Menisken erscheinen.

Das durch Menisken begrenzte Wasser übt eine kontrahierende Wirkung auf die Bodenmatrix aus. Ist die Bodenmatrix im Gleichgewicht, so zeigen die Menisken eine konkave Krümmung und die Kornteilchen werden durch den kontrahierenden Meniskenzug zusammengezogen. Dadurch wird der Boden stabilisiert. Wird der Boden nun zusammengepresst, dann muss sich das Wasser im abnehmenden Porenraum einen neuen Platz suchen. Dies

geschieht durch die Formänderung der Menisken; die Wirkung des kontrahierenden Meniskenzugs lässt nach. Die Folge ist eine drastische Verminderung der Stabilität, die so lange dauert, bis sich die ursprüngliche Meniskenform durch das Abfließen des überschüssig gewordenen Wassers wieder einstellt. Dieser Effekt wird in der neutralen Spannung bei der effektiven Spannungsgleichung deutlich (Bishop, 1961). Die Wasserspannungen im Boden können somit die Stabilität beeinflussen. Jeder trocknende Boden ist folglich in seiner Struktur so lange stabil, wie die wirksamen Kontaktflächen nicht kleiner werden als es dem Betrag der Wasserspannungsänderungen entspricht, während positive Porenwasserdrücke die Stabilität verringern.

2.2.3 Vertikale und Horizontale Spannungskomponente im Boden

Im Ruhezustand des Bodens entspricht eine vertikale Spannung in einer definierten Ebene dem Gewicht der Bodensäule, die in einer homogenen Bodenschicht mit der Tiefe gleichmäßig zunimmt. Mit zunehmender Tiefe erhöht sich das Raumgewicht des Bodens und dadurch wird die Bodensubstanz immer stärker zusammengepresst. Folglich nennt man derartige Böden auch normalverdichtet. Wenn hingegen in der landwirtschaftlichen Bodennutzung die Bodenoberfläche mit Lasten wie z.B. mit Fahrzeugen oder Tieren zusätzlich belastet wird und dadurch der Boden zusammengedrückt wird, spricht man von überverdichteten Boden. Nach dem Entfernen der Last bleibt die Setzung bestehen, welche durch eine plastische Veränderung dem Boden zugefügt wurde; dies ist in der Drucksetzungskurve veranschaulicht (Abbildung 2-3).

In der Praxis ist die Spannungsverteilung in natürlich gelagerten Böden anisotrop, weil die größte Hauptspannung (σ_1) in vertikaler Richtung auftritt und die in der horizontalen Richtung auftretenden Hauptspannungen (σ_2 und σ_3) als gleich groß behandelt werden und betragsmäßig geringer sind. Die Beziehung zwischen den beiden Hauptspannungen beschreibt der Ruhedruckkoeffizient (K_0), welcher in der Regel zwischen 0,2 und 0,7 liegt (Hartge und Horn, 1999) und in der folgenden Gleichung ausgedrückt ist:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = K_0 \cdot \sigma_1$$

Gl. 2-8

2.2.4 Scherfestigkeit des Bodens

Werden die Spannungskreise der größten und kleinsten Hauptspannung bei unterschiedlichen Spannungszuständen in ein σ - τ Koordinaten-System eingezeichnet, ergibt sich eine Umhüllende, deren Form und Größe materialabhängig ist. Diese Umhüllenden werden meist als Gerade angenommen. Wenn ein Spannungskreis die Gerade schneidet, charakterisiert dies den Boden als instabil und es tritt ein Scherbruch im Boden auf; bleibt aber der maximale Spannungskreis unterhalb der Geraden, bleibt der Boden stabil und es findet im Boden kein Scherbruch statt.

Ein Scherbruch im Boden tritt folglich erst dann auf, wenn die Scherspannung größer ist als die innere Reibung (φ) und Kohäsion (c) zwischen den Körnern. Bei einem Scherbruch besteht zwischen den Normal- (σ_n) und Scherspannungen (τ) eine lineare Beziehung:

$$\tau = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad \text{Gl. 2-9}$$

Im allgemeinen Fall wird ein Scherbruch nicht dort vorkommen, wo die Scherspannung am größten ist, also in einem Winkel von 45° mit den Hauptspannungen (Abbildung 2-5). Der Scherbruch wird stattdessen dort stattfinden, wo die Normalspannung den größten Winkel zur X-Achse abschließt. In Abbildung 2-5 entspricht die Gerade AB der Schergeraden. Alle Spannungszustände, die mit einem Spannungskreis unterhalb dieser Linie beschreibbar sind, zeigen einen Ruhezustand, wo kein Scherbruch stattfindet. Die tangentiellen Spannungskreise zur Geraden AB zeigen einen Bruchzustand im Boden. Zeigt die X-Achse die Ebene, wo die größte Hauptspannung herrscht, wird die Gerade AP bei gegebener Hauptspannungskombination die Gleitflächenrichtung angeben. Diese Richtung schließt mit einem Winkel von $45^\circ + \varphi/2$ zur Hauptspannungsrichtung ab. Schneidet aber der Mohrsche Kreis die waagerechte Achse auf der negativen Seite, dann ist die kleinere Hauptspannung (σ_3) eine Zugspannung, die im Folgenden berechnet wird:

$$\sigma_3 = c \cdot \cot \varphi \quad \text{Gl. 2-10}$$

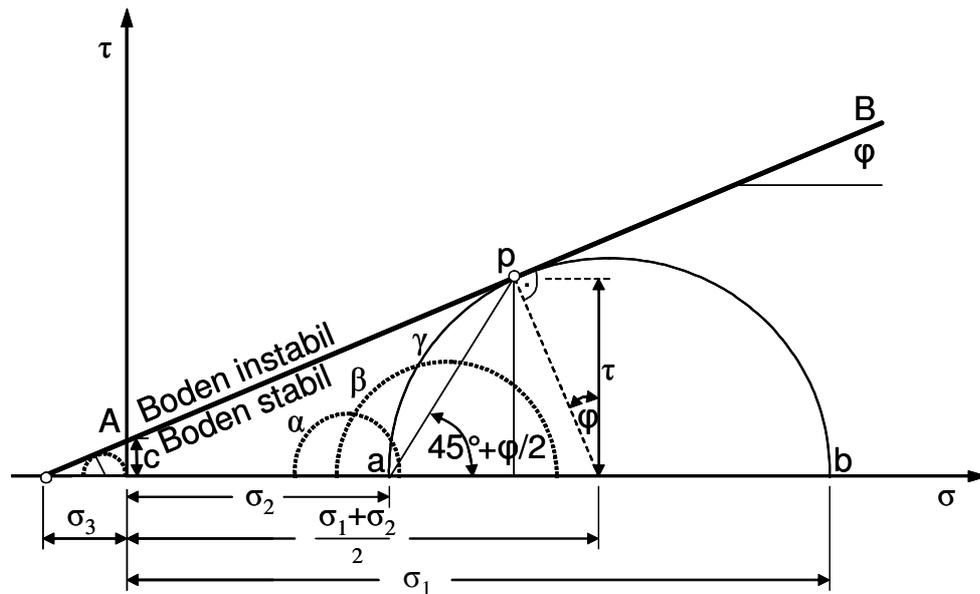


Abbildung 2-5 Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade

Wie bei allen Spannungszuständen, kann man hier auch die effektiven Spannungen während eines Schervorgangs berücksichtigen. Analog zur effektiven Spannungsgleichung von Bishop (1961) kann man auch die Scherspannung eines wassergesättigten Bodens beschreiben:

$$\tau' = c' + (\sigma_n - u_w) \cdot \operatorname{tg} \varphi' \quad \text{Gl. 2-11}$$

Hierbei setzt sich der Scherwiderstand aus den Parametern effektiver Winkel der inneren Reibung (φ') und effektive Kohäsion (c') zusammen.

Im wasserungesättigten Boden wird die effektive Spannung durch die Wasserspannungen erhöht und der Scherwiderstand solcher Böden wird mit der folgenden Gleichung (Baumgartl, 1991) beschrieben:

$$\tau = c' + (\sigma_n + \chi(u_a - u_w)) \cdot \operatorname{tg} \varphi' \quad \text{Gl. 2-12}$$

Die Scherparameter, wie Winkel der inneren Reibung und Kohäsion, werden dabei von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst:

- Textur: hierbei ist die Größe und Form der Bodenkörner wichtig, weil sie die Lagerungsverhältnisse und Porenräume beeinflussen können. Sind ungleichförmige Körner im Boden vorhanden, steigt die Zahl der Kontaktpunkte

an. Deswegen wird die Lagerung dichter, die Reibung zwischen den Bodenkörnern und dadurch die Bodenstabilität steigen (Kézdi, 1952).

- Form der Bodenkörner: je stärker die Abweichung von einer Kugel ist, desto schwerer ist die Verschiebung der Partikel gegeneinander (Hartge und Horn, 1999).
- Lagerungsdichte und Kornkontaktpunkte: sie beeinflussen das Gesamtporenvolumen des Bodens. Die Lagerungsdichte zeigt den Gefügestand eines Bodens und sie hat eine Auswirkung auf die Bodenstabilität (Hartge und Horn, 1999).
- Aggregierung: Aggregate sind stabiler als der Gesamtboden. Aggregate können durch Flockung (Roloff und Larson, 1989), durch Meniskenkräfte des Porenwassers (Dexter, 1988), durch mikrobielle Tätigkeit im Boden (Pagliai et al., 1980) und durch Kationen, wie Ca^{2+} (Edwards und Bremer, 1967) entstehen. Die Aggregatstabilität wird durch Wurzeln, Pilzhyphen und Mikroorganismen verstärkt (Tisdall und Oades, 1982).

Die Kohäsion wird von den folgenden wichtigen Faktoren beeinflusst:

- Wassergehalt: die Rolle des Wassers im Boden wurde im Kapitel 2.2.2 beschrieben. Ergänzend ist noch zu erwähnen, dass ein trocknender Boden stabiler als ein feuchter Boden ist, sofern die Interpartikelkräfte sich ausbilden können.
- Wasserspannung zwischen den Poren: hierbei ist es wichtig, die Meniskenkräfte im Boden zu erwähnen, die die Körner zueinander ziehen oder voneinander drücken können (siehe mehr darüber im Kapitel 2.2.2).
- Organische Substanz: die organo-mineralischen Bindungen (Hartge und Horn, 1999) und die stärker umgewandelten, hochmolekularen Huminstoffe (Soane, 1990) erhöhen die Aggregat- und Bodenstabilität.
- Salzkonzentration und Kationbelegung: Tonminerale und organische Substanzen des Bodens sind negativ geladen. Diese negative Ladung wird durch die Anlagerung (Sorption) äquivalenter Mengen an Kationen

ausgeglichen. Die Kationenaustauschkapazität hängt vom Gehalt und der Größe der zugänglichen Oberfläche und der Art und Höhe der Ladung des Austauschers ab.

2.3 Das Dreidimensionale Spannungskonzept

Wenn ein Bodenkörper im Ruhezustand ist, dann entsprechen die nach außen wirkenden Kräfte den nach innen. Wird dieser Bodenkörper mit einem beliebigen Querschnitt auf zwei Teile geteilt und wird ein Teil davon mit den darauf wirkenden Kräften entfernt, so muß man auf dem anderen Teil an der Querschnittsfläche Kräfte ausüben, um das Gleichgewicht zu halten. Die Verteilung dieser inneren Spannungen auf die Fläche ist kontinuierlich, so dass auf jedem Flächenelement ΔA eine Kraft ΔF zukommt. Bildet man den Quotienten $\Delta F/\Delta A$ und wird dann der Grenzübergang $dF \rightarrow 0$ gemacht, so gelangt dieser Quotient zu einem Grenzwert, den man als Spannung bezeichnet. Wirkende Spannungen auf eine bestimmte Fläche und Kräfte auf eine definierte Fläche sind Vektor bezogen. Diese Vektoren kann man an einer Fläche auf normale und tangentielle Vektoren, bzw. auf Normalspannungen (σ_n) und Scherspannungen (τ) teilen.

Wird zu einem Punkt im Bodenkörper in unterschiedlichen Richtungen eine Ebene gelegt, werden zu dieser Ebene unterschiedliche Spannungen gehören. Schneidet man aus einem Körper einen theoretischen Würfel aus (Abbildung 2-6), wird an dessen sechs Seiten jeweils ein Spannungsvektor herrschen, welche nach den Achsen des Koordinatensystems auf drei Komponenten aufgeteilt werden kann.

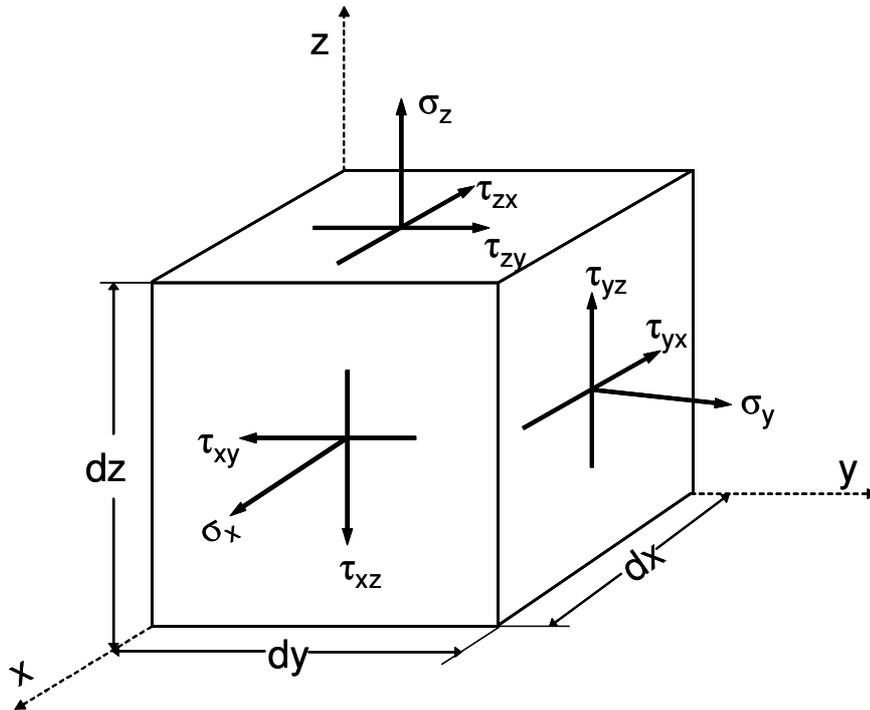


Abbildung 2-6 Wirkende Spannungen auf einen theoretischen Körper (Kézdi, 1952)

Logischerweise unterscheiden sich die Spannungen an den gegenüberliegenden Seiten in differenzialen Größen, es handelt sich um $3 \times 3 = 9$ Spannungskomponenten (drei Normalspannungen, σ_n und sechs Scherspannungen, τ), die als Spannungstensor gekennzeichnet sind (Koolen und Kuipers, 1983). Die Spannungstensoren sind in einer Matrix zusammengefasst:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2-13}$$

Alle Komponenten kommen in der Matrix an einer bestimmten Stelle vor. Die Normalspannungen sind diagonal platziert und die Scherspannungen an den gegebenen Stellen der Normalspannungen. Diese Matrix beschreibt die Position eines Punktes im Bodenkörper.

Eine Eigenschaft des Spannungstensors ist, dass die Werte der Komponenten in der Matrix von dem gewählten Koordinatensystem abhängen. Wird die Lage des Koordinatensystems in der Abbildung 2-6 geändert, ändert sich auch die

Lage des Würfels und dementsprechend werden andere Werte für die Spannungskomponenten in der resultierenden Matrix vorkommen. Die Spannungskomponenten können auch nach einer Drehung (Drehmomente) berechnet werden, vorausgesetzt ist, dass die ursprünglichen Spannungskomponenten und Drehwinkel zum Koordinatensystem bekannt sind. Dadurch sind die Vektor- und Spannungsgleichungen vom gewählten Koordinatensystem unabhängig.

Wird das Drehmoment der wirkenden Kräfte auf die Koordinatengerade der σ_x berechnet, sind die Scherspannungen mit demselben Vorzeichen gleich:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \text{Gl. 2-14}$$

Das Koordinatensystem in der Abbildung 2-6 lässt sich auch so wählen, dass sämtliche Scherspannungsbeträge gleichzeitig Null ergeben. In diesem Fall werden die Normalspannungen als Hauptspannungen ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) gekennzeichnet. Hierbei wird die größte Hauptspannung als σ_1 , die zweitgrößte als σ_2 und die drittgrößte als σ_3 definiert:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y'} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z'} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2-15}$$

In der Matrix des Spannungstensors sind Invarianten, die nicht von der Position des Koordinatensystems abhängen:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_2 \sigma_3 \\ I_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{xz}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-16}$$

Wird angenommen, dass die x, y und z Richtungen die Hauptrichtungen sind, und dass die Spannungen auf der senkrechten Ebene zu einem diagonalen Raum (oktaedrischer Raum) angeordnet sind, werden sie auf eine Normal- und eine tangentielle Komponente zerlegt. Diese Komponenten sind die oktaedrische Normalspannung (σ_{oct}) (oder als mittlere Normalspannung

gekennzeichnet) und die oktaedrische Scherspannung (τ_{oct}). Beide Komponenten können als Invariante ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} (OCTNS, MNS) \sigma_{oct} &= \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} I_1 \\ (OCTSS) \tau_{oct} &= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} = \sqrt{\frac{2}{9}(I_1^2 - 3I_2)} \end{aligned} \quad Gl. 2-17$$

Der Winkel Ω gibt die Orientierung der oktaedrischen Scherspannung in der Oktaederebene an:

$$\Omega_{oct} = \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{2\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_{oct})(\sigma_2 - \sigma_{oct})(\sigma_3 - \sigma_{oct})}}{\tau_{oct}^3} \right) \quad Gl. 2-18$$

Die oktaedrische und die mittlere Normalspannung (σ_{oct} , MNS) sind die einfachsten Maße, um die insgesamt in den Boden eingetragene Spannung zu beschreiben. Aus dem Verhältnis der Hauptspannungen ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) errechnet sich die oktaedrische oder mittlere Scherspannung (τ_{oct} , OCTSS). Hohe oktaedrische Scherspannungen ergeben sich aus größeren Differenzen der Hauptspannungen. Negative Werte der kleinsten Hauptspannung (σ_3) werden als Zugspannungen im Boden interpretiert. Es gibt eine Position im Koordinatensystem (45° gegen die erste und dritte Hauptachsenrichtung geneigt), wo die Scherspannung ein Maximum hat.

Nach der folgenden Gleichung können zu den Spannungstensoren entsprechende Spannungen addiert oder subtrahiert werden:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{pmatrix} \quad Gl. 2-19$$

In der zweiten Matrix kann z.B. hydrostatischer Druck stehen, der gleichförmig auf alle Richtungen wirkt.

2.4 Spannungsausbreitung im Boden

Die Spannungen verteilen sich im Raum immer dreidimensional. Die Berechnung der Spannungsausbreitung im Boden unter einer vertikalen Punktlast wurde erstmals bei Boussinesq (1885), zit. in Söhne (1953), beschrieben, wobei er sich ausschließlich auf die vertikale Spannungsverteilung bezogen hat (Fredlund und Rahardjo, 1993). Es wurde angenommen, dass eine vertikale Punktlast auf eine Bodenoberfläche in einem homogenen, isotropen, linear-elastischen Halbraum wirkt. Damit wurde beschrieben, dass die Druckfortpflanzung gleich groß ist. Daraus entstand die vertikale Punktlastmethode.

In der vertikalen Punktlastmethode wurde angenommen, dass eine Punktlast zwischen Reifen und Boden herrscht. Ein solcher Fall wird in Abbildung 2-7 dargestellt.

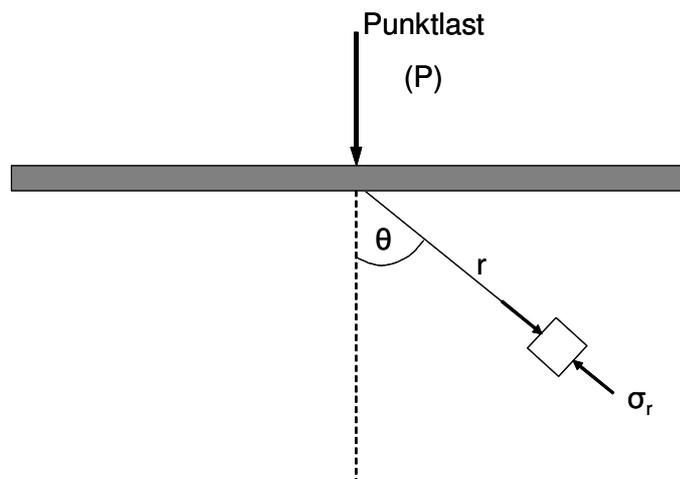


Abbildung 2-7 Durch eine Punktlast induzierte Spannung an einem Bodenelement (Koolen und Kuipers, 1983)

Ein unendlich kleiner Würfel wird im Boden dargestellt, der so liegt, dass der Vektorradius (r) senkrecht auf einer Seite des Würfels steht. Die Berechnungen von Boussinesq zeigen, dass nur Spannungen auf den Flächen senkrecht zum Vektorradius (r) wirken. An beiden Seiten dieses Würfels wirkt ausschließlich eine Normalspannung (σ_r), die in diesem Fall als Hauptspannung (σ_1) bezeichnet wird; diese lässt sich berechnen:

$$\sigma_r = \sigma_1 = \frac{3P}{2\pi r^2} \cos \theta \quad \text{Gl. 2-20}$$

Mit Hilfe dieser Gleichung läßt sich die Spannung für jeden Punkt im Boden berechnen, so dass die Richtung des Vektorradius (r) definiert ist. Wenn die Hauptspannung senkrecht unter der Punktlast berechnet werden soll, dann ist der Winkel (θ) zwischen der senkrechten Richtung und dem Vektorradius (r) Null, demzufolge $\cos\theta=1$.

Der Boden hat in Wirklichkeit aber ein elastoplastisches Verhalten (siehe Abbildung 2-3). Deswegen hat (Fröhlich, 1934) den Konzentrationsfaktor (ν) eingeführt und damit die Gleichung modifiziert:

$$\sigma_r = \frac{\nu P}{2\pi r^2} \cos^{\nu-2} \theta \quad \text{Gl. 2-21}$$

Der Konzentrationsfaktor (ν) berücksichtigt die unterschiedliche Festigkeit der Böden, wobei: $\nu=3$ als harter, $\nu=4$ als normaler und $\nu=5$ als weicher Boden definiert sind (Abbildung 2-8). Burger et al. (1988) ermittelten Konzentrationsfaktoren von 3 bis 9 für eine Vielzahl von Böden unter Ackernutzung, wobei die Messungen anhand von partiell belasteten Bodenmonolithen erfolgten. Je größer der Konzentrationsfaktor ist, desto größer ist die Konzentration der Hauptspannung um die Lastachse und umso größer ist die Tiefenwirkung der Spannung.

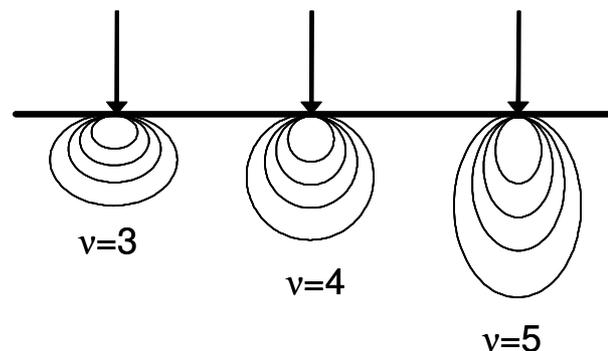


Abbildung 2-8 Spannungsisobaren (Druckzwiebeln) bei unterschiedlichen Konzentrationsfaktoren (Kézdi, 1969)

Horn et al. (1991), Hartge und Horn (1999) sowie Becher (2004) weisen darauf hin, dass die Druckfortpflanzung und damit der Konzentrationsfaktor keine Bodenkonstante ist, weil er von Bodengeneese, Wassergehalt oder von antropogenen Eingriffen (z.B. Maschineneinsatz) beeinflusst wird.

Da die land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeuge mit ihren Reifen oder Ketten keine Punktlasten erzeugen, sondern eine Vielzahl unterschiedlicher Drücke über die Kontaktfläche verteilt sind, hat Söhne (1953) eine weitere Theorie aufgestellt. Die gesamte Fläche wurde in Teilflächen aufgeteilt und die Teilflächendrücke wurden als Punktlast angenommen. Dadurch werden die Druckzwiebeln (bei gleichem spezifischen Flächendruck an der Oberfläche) mit zunehmender Gesamtlast größer und sie reichen tiefer in den Boden.

Zur Vorhersage des Spannungszustandes in einem Punkt des Bodens wird der Spannungswürfel (Abbildung 2-6) verwendet. Hierbei können die sechs voneinander unabhängigen Richtungen (Nichols et al., 1987) bei unterschiedlicher Druckverteilung ermittelt werden.

2.5 Deformation von Böden

Jeder Punkt im belasteten Boden weist einen bestimmten Spannungs- und Verformungszustand auf. Die Beschreibung der Verformung erfolgt auf gleichem Weg, wie die Beschreibung des Spannungszustandes. Der Spannungszustand wird über die beiden Kenngrößen Normalspannung und Scherspannung definiert, während die Deformation aus Normalverformung und Scherverformung besteht. Die Normalverformung kann mit einem unendlich kleinen Liniensegment beschrieben werden, dessen Länge l ist. Durch eine Deformation wird eine Länge von $l+\Delta l$ erreicht (Abbildung 2-9). Die Normalverformung und die Scherverformung werden im Folgenden ausgerechnet, wobei die Scherverformung durch eine Änderung der zunächst rechten Winkel des Flächenelementes im Bogenmaß ausgedrückt werden kann:

$$\text{Normalverformung} = \frac{\Delta l}{l}$$

Gl. 2-22

$$\text{Scherverformung} = \frac{1}{2}(\alpha + \beta)$$

Gl. 2-23

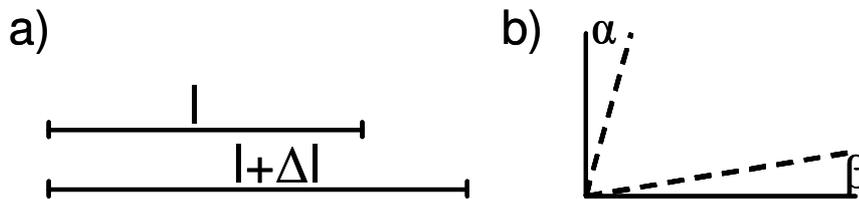


Abbildung 2-9 Normalverformung (a) und Scherverformung (b) (Koolen und Kuipers, 1983)

Der Verformungszustand im unbelasteten Bodenkörper kann auf einen Punkt in einem unendlich kleinen Würfel analog auf die Spannungstensoren mit einer Matrix in einem Koordinatensystem von x, y und z gelegt werden.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2-24}$$

Wenn der Boden belastet wird, wird der Punkt im Körper auch belastet und deformiert. Durch die Deformation ändern sich die Länge und die Winkel der Seiten. So wird sich die Verformung in der Länge wie folgt ändern: Die Normalverformung in der x-Richtung ist ε_x , in der y-Richtung ε_y , in der z-Richtung beträgt sie ε_z . In einem unbelasteten Würfel sind rechte Winkel vorhanden, aber durch eine Belastung werden sich die Winkel an den Seiten wie im Folgenden ändern: Die Scherverformung zwischen x und y Richtungen ist ε_{xy} , zwischen x und z Richtungen ist sie ε_{xz} und zwischen y und z Richtungen ist sie ε_{yz} .

Die Matrix, die mit Normalverformung und Scherverformung beschrieben wird, nennt man Verformung oder Deformationstensor. Ihre Eigenschaften und Symmetrie sind dasselbe wie der Spannungstensor, Symmetrie und Verformungstensor haben auch eine bestimmte Position im Koordinatensystem. Dieser Tensor kann auch in einem solchen Koordinatensystem gewählt werden, wo die Scherverformung Null ist. In diesem Fall wird die Normalverformung als

Hauptverformung ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) und die Koordinatenrichtungen als Hauptrichtungen gezeichnet.

Ebenso wie bei den Spannungen gibt es hier auch auf dem Koordinatensystem eine Position (45° gegen die ε_1 - und ε_2 -Richtung geneigt), wo die Scherverformung ein Maximum hat. Es existieren auch hier Invarianten in der Matrix des Verformungstensors, die unabhängig vom gewählten Koordinatensystem sind. Analog zur Spannungstheorie können hier auch oktaedrische Normalverformung (ε_{oct}) und oktaedrische Scherverformung (γ_{oct}) berechnet werden. Ein Verformungstensor kann auch in einen volumenändernden und in einen volumenkonstanten Anteil erweitert oder zerlegt werden.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_m & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y - \varepsilon_m & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z - \varepsilon_m \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2-25}$$

Der zweite Teil der Matrix ist der volumenändernde Verformungsanteil, der dritte Teil der Matrix ist die volumenkonstante Scherverformung, wobei der volumenändernde Verformungsanteil mit der folgenden Gleichung beschrieben wird:

$$\varepsilon_m = \frac{1}{3}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad \text{Gl. 2-26}$$

2.6 Bruchtheorien

Wird eine Bodenoberfläche räumlich begrenzt belastet, so wird der darunter liegende Boden zusammengedrückt. Solange die Auflast relativ klein ist, ist die Setzung linear mit der Auflast. Es entspricht dem elastischen Bereich der Drucksetzungskurve (Abbildung 2-3). Bei weiter erhöhten Auflasten hört die Linearität der Drucksetzungskurve auf und in dem Boden werden Gleitflächen ausgebildet. Die belastete Fläche wird ihre Stabilität verlieren und der Boden dehnt sich in horizontaler Richtung aus, bis ein vollständiger Bruch im Boden stattfindet (Abbildung 2-10).

Der Grundbruch wird durch drei Sektoren (I, II, III) beschrieben: Unter der Last herrscht im I. Sektor, der im Prinzip keilförmig ist, die größere Hauptspannung senkrecht. In dem II. Sektor herrscht die radiale Scherung, deren Grenzbereiche zur Oberfläche $45^\circ \pm \varphi/2$ sind. Im III. Sektor herrscht der passive Rankine-Prandtl'sche Zustand. Der nach dem Bruch vorgekommene Zustand wird auf der rechten Seite (B) von Abbildung 2-10 dargestellt: Der I. Sektor wird wie ein Keil in den Boden reingedrückt und dadurch werden der II. und III. Sektor von ihren Positionen versetzt.

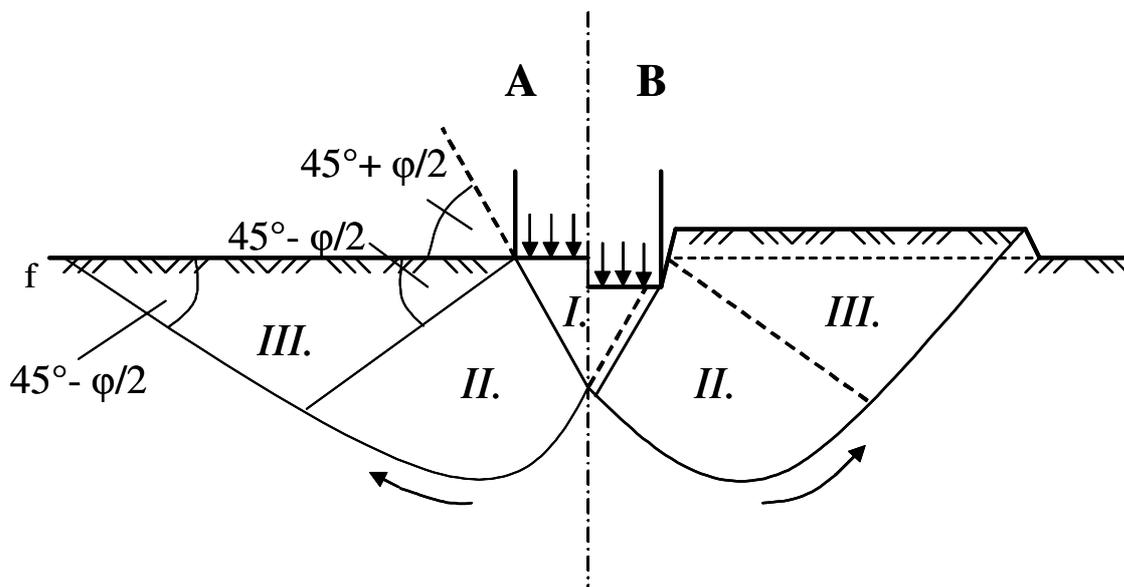


Abbildung 2-10 Rankine-Prandtl'sche Bruchtheorie für begrenzte Lasten (Kézdi, 1952)

Die Verdichtungskurve (Abbildung 2-3) kann zwei typische Formen zeigen (Kézdi, 1952):

- Tritt der Bruch im Boden plötzlich nach kurzem Übergang auf, kommen im Boden stark ausgeprägte Gleitflächen verbunden mit einer deutlichen Volumenreduktion vor. Ein solcher Fall tritt u.a. bei stark verdichtetem Boden auf, wenn die Wasserableitung gewährleistet ist.
- Tritt der Bruch langsam im Boden auf, so setzt sich die Drucksetzungskurve nach Überschreitung des elastischen Bereichs (Überschreitung des Vorbelastungswertes) kontinuierlich mit einem anderen Winkel zur y-Achse fort. Ein solcher Fall tritt meistens bei einem lockeren Boden auf.

In Abbildung 2-5 sind die Spannungszustandsänderungen des Bodens mit unterschiedlichen Mohr'schen Kreisen (α , β , γ) gekennzeichnet. Vor der Belastung herrscht ein Ruhezustand im Boden (α -Kreis), die Hauptspannungen sind σ_1 und σ_2 ebenso wie die Mohr'schen Kreise noch nicht die Coulomb'sche Gerade tangieren. Wird die Auflast erhöht, so erhöhen sich auch die Spannungen und die den Spannungen entsprechenden Mohr'schen Kreise werden in Richtung der Spannungserhöhung verschoben. Gleichzeitig erhöht sich auch der Durchmesser der Mohr'schen Kreise (β und γ Kreis). Dieser Prozess dauert so lange, bis der Mohr'sche Kreis die Coulomb'sche Gerade tangiert, in diesem Zustand tritt der Bruch im Boden ein.

3 Material und Methoden

3.1 Standortbeschreibung

Der Versuchsstandort befindet sich in Harste / Niedersachsen, ca. 8km nördlich von Göttingen und wurde vom Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ) in Göttingen 1991 eingerichtet und ab 1992 unterschiedlich bearbeitet. Das Versuchsfeld befindet sich 150m ü.N.N in einem leicht welligen Gebiet, was sich nach Nordwesten hin ca. 2% absenkt. Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt bei 8,8°C, der mittlere Jahresniederschlag beträgt 602mm. Der Boden ist eine Tschernosem-Parabraunerde (Stagnic Luvisol) aus Löss. Tabelle 3-1 informiert über einige bodenphysikalische Parameter eines Leitbodenprofils. Die Bodenzahl beträgt 78 und die Ackerzahl 80.

Tabelle 3-1 Profilbeschreibung der Parabraunerde aus Löss

Horizont	Tiefe [cm]	Tschernosem-Parabraunerde (TT-LL)
Axp	0-30	mittel toniger Schluff (Ut3), mittel/stark humos (h3/4), Krümel/Polyedergefüge, pH 7
Axh-AI	30-50	mittel/stark toniger Schluff (Ut3/4), mittel humos (h3), Plattengefüge, pH 6,9
Axh-Bht	50-90	mittel/stark toniger Schluff (Ut3/4), schwach humos (h2), Platten/Polyedergefüge, pH 7

Das Versuchsfeld ist ca. 4,5ha groß, ca. 100m breit und ca. 450m lang, und wird von einer Seite – parallel zum Hang – mit einem landwirtschaftlichen Weg und von einem Bach begrenzt, an der gegenüberliegenden Seite grenzt eine Ackerfläche. An der Kuppe ist der Versuchsstandort mit einer landwirtschaftlichen Straße und dahinter mit einem Ackerfeld abgegrenzt. Eine Landstraße bildet in der Senke des Versuchfeldes die Grenze.

3.2 Versuchsanordnung

Das Versuchsfeld besteht aus drei Teilschlägen, jeweils mit 4 Wiederholungen. Winterweizen, Wintergerste, Zuckerrübe und als Zwischenfrucht Senf wurden als Fruchtfolge gewählt. Die Bodenbearbeitung auf ortsfesten Parzellen variiert zwischen konventioneller (im Weiteren als Pflug bezeichnet) jährlich wendender und konservierender, nicht wendender (im Weiteren als Mulch bezeichnet) Bodenbearbeitung (Abbildung 3-1).

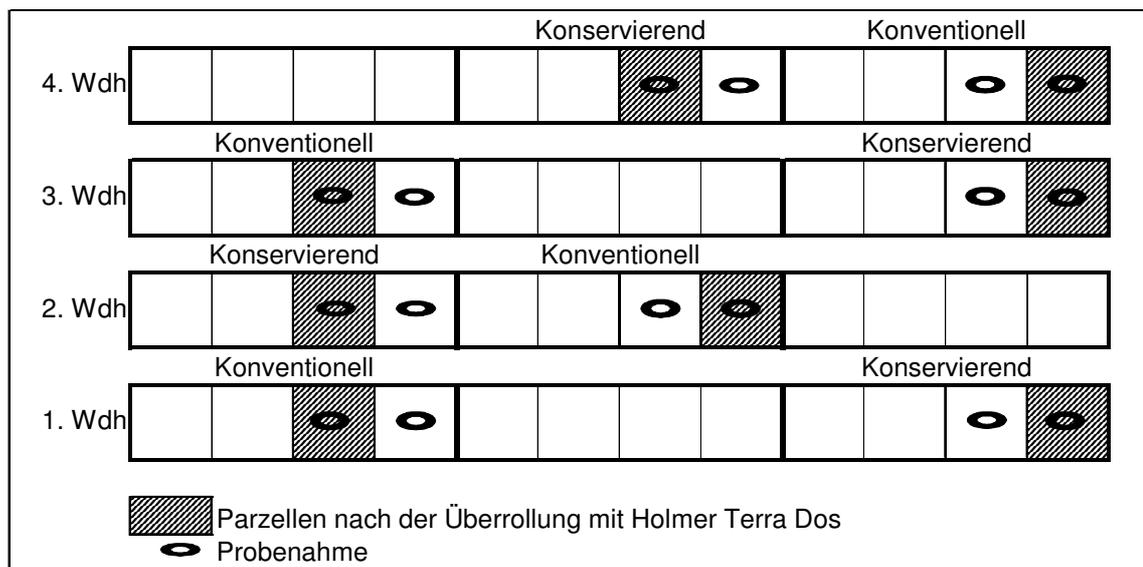


Abbildung 3-1 Versuchsanordnung in einem Teilschlag des Versuchsfeldes in Harste

Als Maschineneinsatz zur Zuckerrübenernte wurde bei konventioneller als auch konservierender Bodenbearbeitung ein schleppergezogener 1- oder 2-reihiger Köpfrödebunker mit 7Mg Gesamtgewicht und zur Getreideernte ein Selbstfahrer Mähdrescher mit ca. 15Mg verwendet. Zur konventionellen Pflugbewirtschaftung mit einem Wendepflug wurde eine Arbeitstiefe von ca. 30cm beibehalten.

Zur konservierenden Bearbeitung wurde ein Grubber mit einer Arbeitstiefe von ca. 8-10cm benutzt. Um die Wirkung eines schweren Rübenrodgers zu simulieren, wurde auf einigen ausgewählten Parzellen für konventionelle und konservierende Bewirtschaftung seit 2001 eine zusätzliche erst- und einmalige Überrollung mit einem Holmer Terra Dos Köpfrödebunker (Gewicht halbbeladen

ca. 35Mg) durchgeführt. Die Parzellen, die nicht mit dem Holmer Terra Dos belastet wurden, gelten als Kontrollflächen und werden im Weiteren als unbefahrene Flächen bezeichnet.

Die Bodenprobenahmen erfolgten bei beiden Varianten, wie konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung, sowohl in unbefahrenen und befahrenen Zustand, jeweils in drei verschiedenen Tiefen und zu drei Terminen (siehe Abbildung 3-2):

- Im April 2002 wurden Proben aus dem Oberboden in ca. 5cm, unterhalb der Pflugsohle in ca. 35cm und dem Unterboden in ca. 60cm Tiefe entnommen. Die Beprobung wurde unter Winterweizenanbau durchgeführt. Im Herbst 2001 wurde für die Zuckerrübenenernte ein Teil dieser Parzellen mit einem Holmer Terra Dos erst- und einmalig flächendeckend überrollt.
- Im November 2002 und November 2003 wurde die Probenahmetiefe im Oberboden bei ca. 12cm gewählt, welches bei der konventionellen Variante den Bearbeitungshorizont bedeutet und bei der konservierenden Variante unterhalb der Bearbeitungstiefe liegt. Als weitere Beprobungstiefen wurden 35cm und 60cm Tiefe gewählt. Die Probenahme erfolgte unter Zuckerrübenanbau. Ein Teil der Parzellen wurde mit Holmer Terra Dos erst- und einmalig überrollt und die Probenahme erfolgte bei den befahrenen Flächen unmittelbar nach der Befahrung.

	1. Teilschlag	2. Teilschlag	3. Teilschlag
2002 April		Anbau WW (2001 Herbst: HTD) (Vorfrucht: ZR)	
2002 Nov.	Anbau ZR Befahrung HTD (Vorfrucht: WG)		
2003 Nov.			Anbau ZR Befahrung HTD (Vorfrucht: WG)

Abbildung 3-2 Probenahmetermine aus verschiedenen Teilschlägen
(Abkürzungen: ZR – Zuckerrübe, WW – Winterweizen, WG – Wintergerste, HTD – Holmer Terra Dos)

3.3 Untersuchungsmethoden der Freilandversuche

Auf dem Versuchsfeld Harste wurden Spannungsmessungen im Herbst 2002 und 2003 während der erst- und einmaligen flächendeckenden Überrollung mit einem Holmer Terra Dos durchgeführt. Im Folgenden wird die Arbeitsweise des Rübenrodebunkers beschrieben, bevor die Messungen definiert werden.

3.3.1 Beschreibung des Maschineneinsatzes – Holmer Terra Dos



Abbildung 3-3 Holmer Terra Dos, 6 reihiger Köpfrödebunker, Gewicht halbbeladen ca. 35Mg

Die Rübenrodung erfolgt vor dem Gerät. Die vorwählbare Lenkautomatik wirkt über Blatt-Taster und über die Abtastung mit dem Scharkörper auf die Vorderachse oder auch auf die Vorder- und Hinterachse zusammen. Ein Schläger zerkleinert das Rübenblatt, welches dann auf den Ackerboden breit gestreut zwischen den Reihen abgelegt oder auch auf einen nebenher fahrenden Hänger übergeladen werden kann. Als nächstes kommen 6 zentral einstellbare Nachköpfer zum Einsatz und sorgen mit ihrer Schnittstärkenautomatik für eine gut angepasste Köpfqualität. Anschließend heben Polderschare die Rüben aus dem Boden. Über ein Rüttelschar und Wendewalzen werden sie gereinigt und schließlich über einen Ringelevator in den Rübenbunker befördert und mit einer Bunkerschnecke verteilt (Holmer Terra Dos, 2004).

Tabelle 3-2 Fahrzeugbeschreibung (Holmer Terra Dos, 2004)

Maschinentyp	Selbstfahrer Köpfrdebunker, 6-reihig
Motor	MAN D2876 LF03
Leistung	338 KW (460 PS)
Achsen	2 Achsen mit zuschaltbarer Differentialsperre
Fahrtrieb	über Gelenkwellen angetriebene mechanische Vorder- und Hinterachse, automatische Steuerung der Motordrehzahl und des Fahrtriebs
Fahrgeschwindigkeit	
Acker / Straße	0-11,5 / 0-20 km/h
Arbeitsleistung	bis zu 1,5 ha/h
Bereifung -vorne	Michelin 800/65 R32xM28 (ca. 80 cm breit)
-hinten	GoodYear VA73x44.00-32 (ca. 110 cm breit)
Abmessung: L/B/H	8,850 / 3,000 / 3,985 m
Achsabstand	5,10 m
Wendekreis	ca. 9,5 m
Kraftstofftank	ca. 1150 l
Bunkerkapazität	24 m ³ / ca. 17000 kg
Gewicht -leer	20850 kg (ohne Vorsatz, mit vollem Tank und Fahrer)
-Blattschläger	1040-1500 kg
-Roder	3240-3680 kg
-Blattband	310-410 kg
Evt. max. Gewicht	
insgesamt	42440 - 43440 kg

Der aktuelle Wassergehalt des Bodens zum Befahrungszeitpunkt wurde gravimetrisch durch Trocknung bei 105 °C nach Hartge und Horn (1992) ermittelt.

3.3.2 Dynamische Belastungsversuche

Um den Spannungszustand an einem Punkt des Bodens definieren zu können, benötigt man in sechs unabhängigen Raumrichtungen Spannungsmessungen. Der Sensorkopf, auch SST (Stress State Transducer) genannt, besteht aus 6 Einzelmesszellen, die nach dem Dehnungsmessstreifenprinzip funktionieren und in einem Aluminiumhohlkörper ($r=33\text{mm}$) eingefasst sind. Die Einzelmesszellen (Durchmesser = 22mm, Membranstärke = 2mm) sind um 50,8° auf der vorderen Halbkugel verschoben. Die Orientierung der Messzellen

wurde wie folgt festgelegt: Drei Messzellen (S_x , S_y , S_z) sind zur Messung der vertikalen und horizontalen Spannungskomponenten rechtwinklig zueinander angeordnet; weitere drei Messzellen (SN_1 , SN_2 , SN_3) sind im Oktaederwinkel ($54,73^\circ$) zum Sensor S_x und rechtwinklig zueinander angeordnet. Der Aufbau der Sensoren und das Messprinzip wurde bei Horn et al. (1992) und Kühner (1997) ausführlich beschrieben.

Die Auswertung von erfassten SST Daten, wie Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), mittlere Normalspannung (MNS) und oktaedrische Scherspannung (OCTSS), erfolgten mit dem Programm SSTKIEL.EXE (Johnson, 1994).

Um die bei mechanischen Belastungen hervorgerufenen Bodenbewegungen aufnehmen zu können, wurde das Displacement Transducer System (DTS) benutzt (Kühner, 1997), dessen Prinzip in Abbildung 3-4 dargestellt ist. Die lineare Bodenbewegung in drei Richtungen (X, Y und Z) wird auf einen Bezugspunkt außerhalb des Bodenkörpers übertragen und die Änderung berechnet.

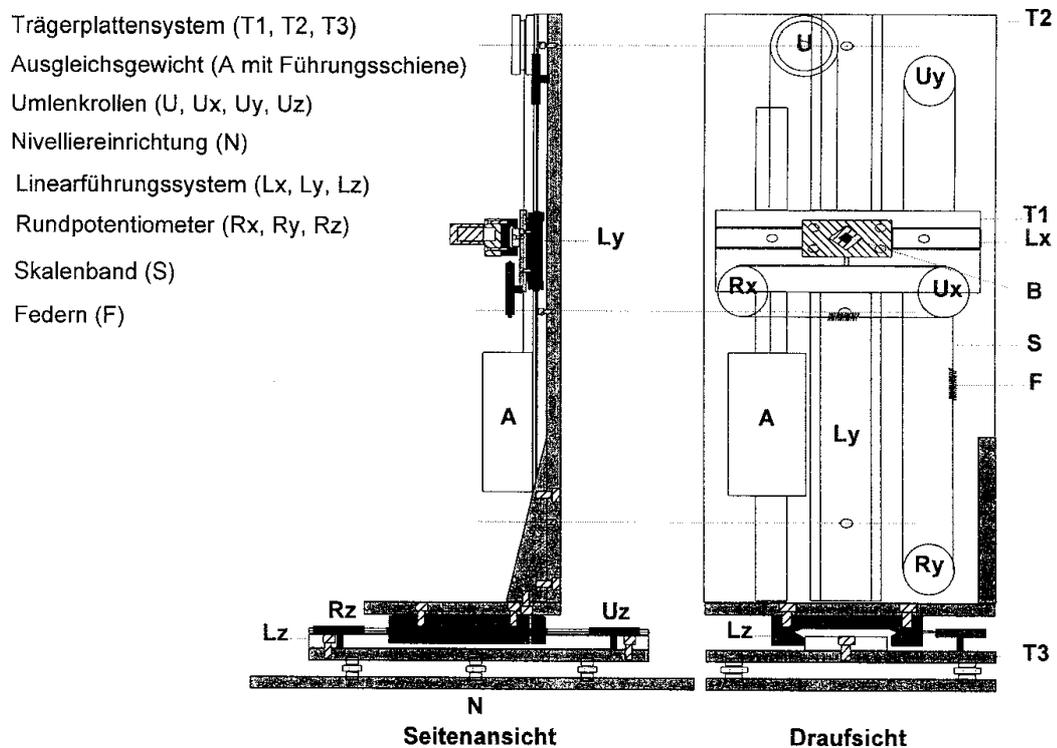


Abbildung 3-4 Ansicht (nicht maßstabsgetreu) vom Displacement Transducer System (DTS) (Kühner, 1997)

Neben der zukünftig verlaufenden Fahrspur wurde eine Grube ausgegraben mit der entsprechenden Größe für den Einbau der Messapparaturen SST und DTS. Um ein Einbrechen der Grube während der Überrollung zu verhindern, wurde die Grubewand mit einer 10mm starken Stahlplatte abgestützt. Hierin sind Bohrungen in den gewünschten Tiefen vorgesehen, durch die die SST Sensoren waagrecht in den Boden eingeführt wurden. Vorher wurden in den Boden waagrechte Kanäle geschlagen, um die SST-Sensoren einzuführen. Die letzten 15 cm vor Sensorlage wurden mit einem Bohrer vorsichtig ausgebohrt, wobei der Bohrkopf exakt die Form eines Sensorkopfes hat, so dass zwischen Boden und Dehnungsmessstreifen ein guter Kontakt besteht.

Das DTS wurde auf die im Boden fixierten Metallanker gestellt und anschließend auf eine waagrechte Position justiert. Der SST-Kopf mit der Stange wird über ein Hülsenadapter verbunden mit einem Kardangelenk (Kreuzgelenk) zum DTS geführt und befestigt. Das Kardangelenk dient hierbei zur Übertragung der Hebelbewegung vom SST auf das Linearführungssystem vom DTS. Um eine flexible Bewegung der SST- und DTS-Sensoren zu erreichen, wurde die SST-Stange in einem Kugellager eingeführt, welches an der Stahlplatte befestigt war (Abbildung 3-5). Die Registrierung der SST- sowie DTS-Werte erfolgte über einen Datenlogger samt Verstärkersystem. Die Spannungsversorgung des Verstärkers erfolgte über einen SST/DTS Controller, der die Messinformationen und die Messdaten weiterleitet. Das Messprogramm läuft unter Labview; die gemessenen Daten werden in situ auf dem Laptop gespeichert.

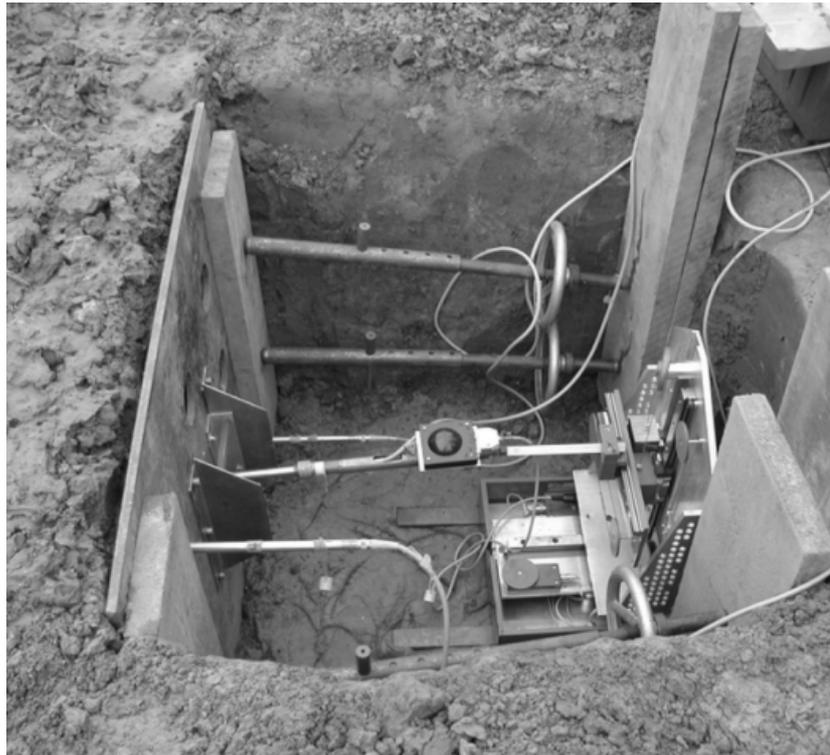


Abbildung 3-5 Messaufbau in der Grube mit den SSTs und einem DTS

Im November 2002 und 2003 wurden dynamische Belastungsversuche während der erst- und einmaligen Überrollung mit dem Holmer Terra Dos bei ausgewählten Parzellen der konventionellen und konservierenden Variante durchgeführt. Der Bodenwassergehalt lag nahe der Feldkapazität.

Die Einbautiefen der SST Sensoren lagen bei 20, 40 und 60cm unter der Geländeoberfläche. Die Bodenbewegungen anhand des DTS wurden in 20 bzw. 40cm aufgenommen. Die SST Sensoren waren so weit im Boden eingebaut, dass der SST-Kopf stets unter der Reifenmitte lag. Um die Auswirkung der räumlichen Druckausbreitung zu quantifizieren, wurden außerdem Befahrungen neben der ersten Fahrspur vorgenommen. Hierbei wurde eine Reifenbreite (ca. 110cm) neben den eingebauten SSTs gefahren.

3.3.3 Erfassung der Reifenkontaktfläche und des Kontaktflächendruckes

Die Reifenkontaktfläche wurde direkt bestimmt. Die auf dem Boden des Versuchsfeldes aufstehenden Reifen wurden mit Mehl umstäubt. Nach dem Entfernen der Erntemaschine wurde der markierte Reifenumriss auf eine Klarsichtfolie übertragen. Zusätzlich wurden auf der Folie die Stollen

aufgezeichnet. Die Kontaktflächen wurden sowohl bei der konventionellen als auch bei der konservierenden Variante aufgenommen. Um alle möglichen Kontaktflächendrücke zu berechnen, wurde die Kontaktfläche auch auf Asphalt als hartem Medium bestimmt.

3.3.4 Erfassung der Regenwurmgänge

Die Regenwurmangaufnahme erfolgte nach der Tiefenorientierung der Probenahme und wurde bei allen Varianten und Wiederholungen auf einer Fläche von 50x50cm durchgeführt.

Hierzu wurden die auszuzählenden Flächen wie folgt präpariert:

- a) Bis zur gewünschten Tiefe mit dem Spaten runtergraben
- b) Vorsichtiges Abstechen mit einer Maurerkelle
- c) Absaugen mit dem Staubsauger, um die von kleinen Bodenaggregaten verstopften Röhren freizulegen

Nach dieser Prozedur wurden die Regenwurmröhren, die größer als 1 mm waren, auf eine durchsichtige Folie aufgezeichnet. Anschließend wurden die Folien eingescannt und nach ihren Flächenanteilen ausgewertet. Bei diesem Verfahren konnte nicht zwischen Regenwurmängen und stark ausgeprägte Wurzelgänge unterschieden werden, weshalb als Kenngröße der Begriff Biomakroporen gewählt wurde.

3.4 Untersuchungsmethoden der Laborversuche

Aus dem Versuchsfeld wurden im November 2002 und 2003 aus allen 4 Wiederholungen, im April 2002 aus der 1. und 3. Wiederholung gestörte und ungestörte (Stechzylinderproben) Bodenproben zur Ermittlung bodenphysikalischer und -mechanischer Parameter entnommen. Die Beprobungstiefen und die -varianten sind im Kapitel 3.2 beschrieben. Pro Bewirtschaftungsvariante und Tiefe wurden vor und nach der Befahrung:

- Stechzylinder mit 236cm³ für Luftleitfähigkeitsmessungen, Drucksetzungs- und Scherversuche,
- Stechzylinder mit 100cm³ für die Bestimmung der Porengrößenverteilung, Luftleitfähigkeit, gesättigten Wasserleitfähigkeit und Lagerungsdichte entnommen.

Die Stechzylinderproben wurden immer in vertikaler¹ Richtung entnommen, zusätzlich wurde bei dem letzten Probenahmetermin (Nov. 2003) horizontal² gelegene Stechzylinder entnommen, um den Effekt der stark ausgeprägten, plattigen Bodenstruktur auf die physikalischen Kenngrößen zu erfassen.

3.4.1 Bestimmung der allgemeinen bodenphysikalischen Parameter

a) An gestörten Proben wurde die **Korngrößenanalyse** nach dem Sieb- und Pipettenverfahren und der organische Substanzgehalt nach der Anleitung von Hartge und Horn (1992) bestimmt. Deren Ergebnisse sind in der Tabelle 3-1 dargestellt.

b) Die **Lagerungsdichte** an natürlich gelagerten Boden wurde gravimetrisch nach 16 stündiger Trocknung der Stechzylinderproben bei 105 °C bestimmt. Die **Aggregatlagerungsdichte** wurde durch Ummantelung der Aggregate mit Paraffin und anschließend durch Tauchwägung bestimmt (Hartge und Horn, 1992).

c) Zur Bestimmung der **Porengrößenverteilung** wurden die Stechzylinderproben kapillar langsam aufgesättigt und danach schrittweise mit Saugspannungen von -10, -20, -30, -60, -150 und -300hPa entwässert. Die Entwässerung erfolgte bis -30hPa auf Sandbädern, von -60 bis -300hPa auf keramischen Platten (durchschnittlicher Porendurchmesser: 0,003mm). Zur Bestimmung der -1500hPa (pF_{4,2}) Entwässerungsstufe wurde feldfeuchtes,

¹ Die Stechzylinder wurden parallel zur Bodenoberfläche gelegt und die Proben genommen.

² Die Stechzylinder wurden im rechten Winkel zur Bodenoberfläche gelegt und die Proben genommen.

gestörtes Probenmaterial in kleine Metallringe ($\varnothing=2,5\text{cm}$, $h=1\text{cm}$) gefüllt und im Überdrucktopf entwässert. Nach jeweiliger Gleichgewichtseinstellung wurden die Proben bei 105°C getrocknet. Aus den **Wasserretentionskurven werden** die Gesamtporenvolumina (GPV), Porengrößenverteilung, sowie Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und der Totwassergehalt (TW) abgeleitet (Schlichting et al., 1995).

d) Die **gesättigte Wasserleitfähigkeit** wurde nach Hartge (1966) unter instationären Strömungsbedingungen mit einem Haubenpermeameter bestimmt. Zur Messung wurden die Stechzylinder langsam kapillar aufgesättigt und anschließend überstaut. Aus den erhaltenen Messdaten wurde anhand der folgenden Gleichung die gesättigte Wasserleitfähigkeit berechnet:

$$k_f = \frac{f \cdot l}{t \cdot F} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Hierbei ist f = Querschnitt des Standrohres, l = Länge der Fließstrecke (=Stechzylinderhöhe), F = Fläche des Zylinders, h_0 = Druckhöhe zu Beginn der Messung, h_1 = Druckhöhe am Ende der Messung und t = Zeit zwischen h_0 und h_1 . Aus den Messwerten der jeweiligen Horizonte wurde der geometrische Mittelwert errechnet.

e) Zur Vorhersage der hydraulischen Eigenschaften des Bodens (**modellmäßige Schätzung der gesättigten Wasserleitfähigkeit**) kann man auch Pedotransferfunktionen verwenden und sie mit den verfügbaren Bodendaten (Schaap and Leij, 1998) (Textur, Lagerungsdichte, usw.) schätzen. Die geschätzten Werte sind nicht so genau wie die real gemessenen Werte, aber sie ermöglichen es, den Boden auf eine andere Art und Weise hydraulisch zu charakterisieren, was sonst anderweitig nicht möglich wäre.

Die Software Rosetta (Rosetta Lite Version 1.0) führt mit Pedotransferfunktionen die Bestimmung der van Genuchten (1980) Wasser Retention Parameter und der gesättigten Wasserleitfähigkeit unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte und ein (-300hPa) oder zwei (-300 und -15000hPa) Wasserspannungspunkte der

pF-Kurve durch. Je mehr Inputdaten dem Softwareprogramm zugeführt werden können, desto besser wird eine Vorhersage der hydraulischen Eigenschaften (Schaap et al, 1998). Der zur Kalibrierung benötigte Datensatz beinhaltet 2134 Probenmessungen für die Wasserretention und 1306 Probenmessungen für die gesättigte Wasserleitfähigkeit (Schaap and Leij, 1998). Die Proben stammen aus einer Vielzahl von Datenquellen aus landwirtschaftlich und nichtlandwirtschaftlich genutzten Böden der gemäßigten Klimazone der Nordhalbkugel (Nordhemisphäre) (die meisten aus den USA und einige auch aus Europa).

f) Die Bestimmung der **Luftleitfähigkeit** wurde bei einer Entwässerungsstufe von -60hPa durchgeführt. Die Messapparatur ist bei (Peth, 2004) detailliert beschrieben. Die Untersuchungen wurden meistens mit einem konstanten Gradient von 1hPa Druckunterschied durchgeführt; bei stark undurchlässigen Proben wurde der Gradient soweit erhöht, bis eine messbare Luftdurchströmung stattfand. Die Berechnung der Luftleitfähigkeit erfolgte nach der Gleichung:

$$k_l = \rho_l \cdot g \cdot \left(\frac{\Delta V \cdot l}{\Delta t \cdot \Delta p \cdot A} \right) \quad \text{Gl. 3-2}$$

Hierbei ist k_l der Luftleitfähigkeitskoeffizient, ρ_l die Dichte der Luft, g die Erdbeschleunigung, ΔV das in der Zeit Δt durch die Probe geströmte Luftvolumen, l die Länge der durchströmten Probe, Δp der eingestellte Durchströmungsdruck und A die Querschnittsfläche der Bodenprobe.

3.4.2 Bestimmung der speziellen bodenmechanischen Parameter

Zur Ermittlung der speziellen bodenmechanischen Parameter wurden Stechzylinderproben (236cm^3) generell bei einer Vorentwässerung von -60hPa vorentwässert. Bei dem Probenahmetermin im April 2002 wurden die Stechzylinderproben neben -60hPa Entwässerungsstufe zusätzlich bei -300hPa entwässert, um die Änderung von Druck-, Zeitsetzungsverhalten und der

Scherparameter des Bodens als Funktion des Entwässerungsgrades zu untersuchen.

3.4.2.1 Druck- und Zeitsetzungsverhalten des Bodens, Ableitung der Vorbelastung (P_v)

Zur Ermittlung von Druck- und Zeitsetzungsverhalten des Bodens wurde ein modifiziertes, uniaxiales Ödometer, die Multistep-Drucksetzungsanlage, verwendet. Abbildung 3-6 zeigt den Aufbau dieses Gerätes.

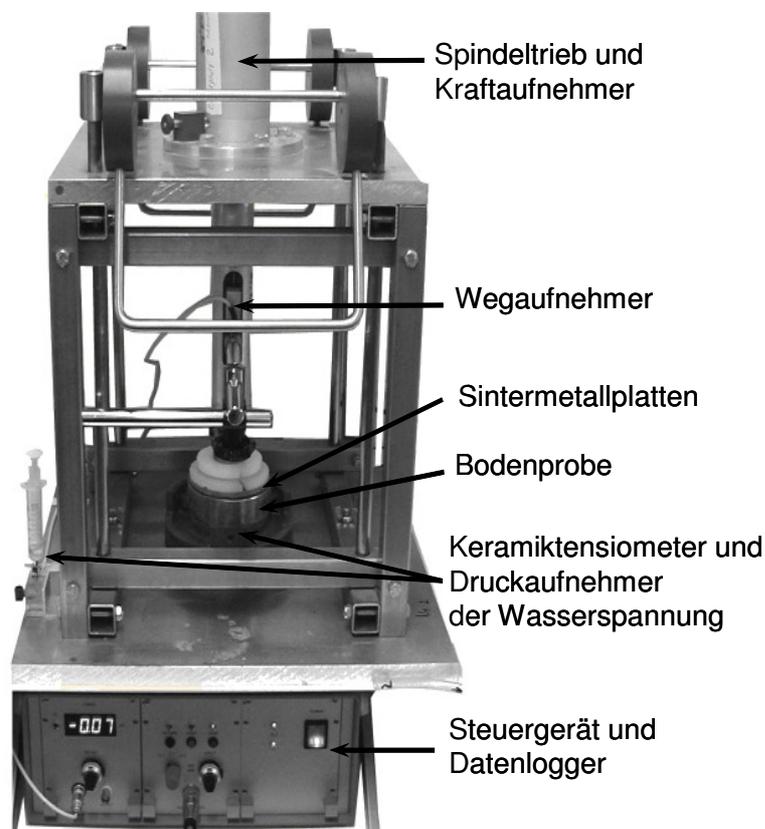


Abbildung 3-6 Aufbau der Multistep-Drucksetzungsanlage

Das Messgerät besteht aus einer zweigeteilten stabilen Stahlkonstruktion. Die untere Konstruktion beruht auf einer stabilen Bodenplatte aus Stahl. Hier befindet sich ein Probenteller, ein Druckaufnehmer und vier Stahlstäbe, die jeweils mit einer Stahlfeder versehen sind. Mit zwei Excenterhebeln kann man die auf die Stahlfedern gesetzte obere Konstruktion über die führenden Stahlstäbe auf- und absenken, was den Probeneinbau begünstigt, und vor einer

Messung fixieren. Zwei weitere Flügelschrauben sichern die Position der oberen Konstruktion mit der unteren.

Die Stechzylinderprobe befindet sich in Sintermetallplatten eingebettet auf einem Probenteller, in welchem zusätzlich ein Tensiometer aus Keramik eingeschraubt ist. Das Tensiometer ist über einen mit entgastem destilliertem Wasser gefüllten Schlauch mit einem Druckaufnehmer verbunden, welcher die Wasserspannungsänderung während einer Messung aufnimmt. Die Sintermetallplatten leiten aus der Bodenprobe dränierendes Porenwasser ab. Konisch gebohrte Löcher im Probenteller ermöglichen ein zusätzliches Ableiten von dränierendem Porenwasser. Auf den oberen Sintermetallplatten der Bodenprobe befindet sich ein Kunststoffaufsatz, auf welchem ein halbrund ausgedrehter Messingzylinder aufgesteckt ist. Der halbrund ausgedrehte Messingzylinder und der am Spindeltrieb montierte hohle Aufsatz mit dem halbkugelförmigen Ende stellen den Kontakt zwischen Bodenprobe und Spindeltrieb her.

Auf der oberen Konstruktion ist ein Spindeltrieb zentriert arretiert. Auf dem Ende des Spindeltriebs ist ein hohler Aufsatz, in dem ein Wegaufnehmer freischwebend, vertikal zum Spindeltrieb ausgerichtet, an einem Stahlarm befestigt ist. Die automatische Lastaufbringung der gewünschten Druckstufen erfolgt über den Spindeltrieb. Der Spindeltrieb trägt für die gewünschte Auflast die benötigte Kraft mit einer Vorschubgeschwindigkeit von ca. 0,5mm/min auf die Bodenprobe auf.

Der Wegaufnehmer, der Druckaufnehmer der Wasserspannung und der Kraftaufnehmer des Spindeltriebs mit der Steuerung werden linear in mV kalibriert (Abbildung 3-7).

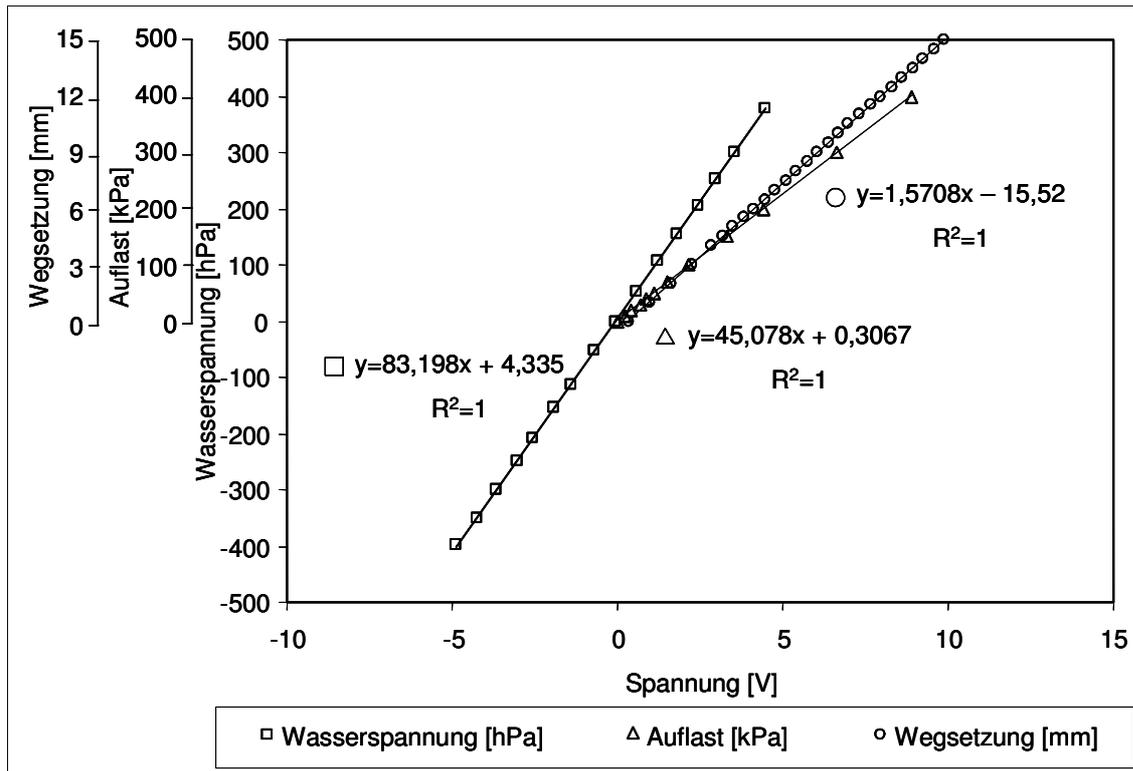


Abbildung 3-7 Kalibrierung der Meßsensoren (Kraft-, Wegaufnehmer und Tensiometer)

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden folgende Druckstufen gewählt: 20, 40, 60, 80, 100, 150, 250 und 400kPa. Zur Bestimmung der Vorbelastung, als bodenökologischer Kennwert zur Beurteilung der Bearbeitungssysteme wurden Stechzylinderproben mit 120min Auflastzeit je Auflaststufe belastet. Zur Untersuchung der hydraulisch und mechanisch gekoppelten Prozesse während der Komprimierung wurden homogenisierte Proben mit 10, 60, 120 und 240min und bei aggregierten Proben mit 10 und 120min Auflastzeit pro Auflaststufe belastet.

Die Vorbelastung wurde nach dem Verfahren von Casagrande (1936) bestimmt. Aus den Endsetzungen jeder Laststufe wurde die Porenziffer ausgerechnet und gegen die Auflaststufen halblogarithmisch aufgetragen. Eine solche Drucksetzungskurve stellt Abbildung 3-8 schematisch dar. Der Punkt A stellt den Punkt der größten Krümmung der Drucksetzungskurve dar. Durch diesen Punkt wird sowohl eine Parallele zur Abszisse, als auch eine Tangente an die Kurve gezogen. Der Winkel zwischen diesen beiden Geraden wird halbiert. Der untere Teil des Erstverdichtungsastes wird rückwärtig extrapoliert (Gerade BC). Der Schnittpunkt der beiden Geraden AB und BC ergibt die Vorbelastung.

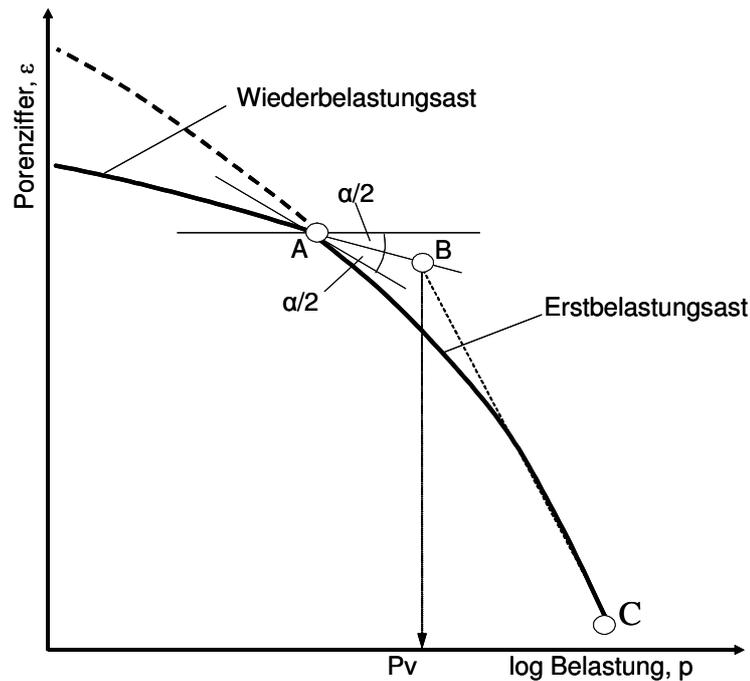


Abbildung 3-8 Bestimmung der Vorbelastung aus der Drucksetzungskurve nach der Methode nach Casagrande (1936)

Da der Übergang zwischen den zwei Teilästen (Punkt der größten Krümmung) nicht immer eindeutig erkennbar ist, wird neuerdings zur Bestimmung der größten Krümmung das Model von van Genuchten (1980) benutzt und mit Hilfe einer mathematischen Ableitung von Baumgartl (2002) für die Berechnung der Vorbelastung angewandt:

$$e = e_r + \frac{e_s - e_r}{[1 + (\alpha\sigma)^n]^m} \quad \text{Gl. 3-3}$$

Hierbei bedeutet e die aktuelle Porenziffer, e_s und e_r werden als Anfangs- und Endporenziffer bezeichnet, σ Normalspannung, n , m und α beschreiben als Konstanten den Deformationsverlauf.

3.4.2.1.1 Berücksichtigung der Wasserspannung

Im Rahmen des Druck- und Zeitsetzungsverhaltens des Bodens wurde die Wasserspannung in zwei Ansätzen an ungestörtem und gestörtem Boden untersucht:

3.4.2.1.1 Ungestörte Bodenproben

Natürlich gelagerte Stechzylinderproben (236cm^3) aus dem Probenahmetermin April 2002 wurden bei -60hPa und bei -300hPa vorentwässert. Die Auflastzeit pro Druckstufe betrug hierbei 120min. Die Stechzylinderproben aus November 2002 und 2003 wurden bei -60hPa entwässert. Außerdem wurden Stechzylinderproben vom Probenahmetermin November 2002 mit 10 und 120 min/Auflaststufe belastet, um die Wasserspannungsänderung als Funktion der Auflastzeit beobachten zu können; die Bodenproben vom Probenahmetermin November 2003 wurden lediglich mit 120min/Auflaststufe zur Bestimmung des Druck- und Zeitsetzungsverhalten des Bodens belastet.

3.4.2.1.2 Gestörte Bodenproben

Stechzylinder wurden mit gestörtem Boden aus der Probenahme vom November 2002 befüllt. Der Boden wurde hierfür zunächst luftgetrocknet und danach auf $<2\text{mm}$ gesiebt. Anschließend wurde der Boden vorsichtig durch wiederholte Anfeuchtung auf einen gravimetrischen Wassergehalt von $25\text{g}/100\text{g}$ eingestellt. Danach wurde der Boden mit einem standardisierten Verfahren in Stechzylinder (236cm^3) gefüllt. Die so künstlich hergestellten Stechzylinderproben wurden in der Multistep-Drucksetzungsanlage (Abbildung 3-6) mit den definierten Auflaststufen belastet. Die gewählten Auflastzeiten pro Laststufe lagen zwischen 10, 60, 120 und 240min. Hierbei wurde sowohl die Setzungs-, als auch die Wasserspannungsänderung während des Drucksetzungsvorganges analysiert.

3.4.2.2 Bestimmung der Scherwiderstandsparameter

Die Scherparameter wurden durch direkte Scherversuche (behinderte Seitenausdehnung) mit konstanter Scherverschiebung durchgeführt (ausführlich beschrieben in Kézdi (1964)). Ein konstanter Vorschub von $0,3\text{mm}/\text{min}$ wurde durch den Spindeltrieb erzeugt. Im Spindeltrieb ist eine Kraftmessdose integriert, die die aufzubringende Scherkraft ermittelt. Die Wasserspannung

wurde – wie bei der Multistep-Drucksetzungsanlage – durch ein Tensiometer erfasst.

Zur Bestimmung der Scherwiderstandsparameter wurden im Labor vorkomprimierte Proben verwendet. Die Belastung erfolgte jeweils 5 Stunden lang in einem uniaxialen Ödometer (Kézdi, 1964) bei verhinderter Seitenausdehnung. Hieran schloss sich jeweils 1 Stunde Entlastung an. Die Druckstufen variierten zwischen 20, (40), 70, 100, 200, 400kPa. Anschließend wurden die Bodenproben in die Scherapparatur in zwei übereinander stehende Scherzylinder ($h=15\text{mm}$) vorsichtig überführt und mit der Auflast des Drucksetzungsversuchs erneut belastet. Nach der Einstellung der Wasserspannung wurde der obere Scherzylinder mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in horizontaler Richtung bewegt. Zur Mohr-Coulomb'schen Bruchgeraden wurde mit Hilfe des Wasserspannungsverlaufes (Abbildung 3-9) der maximale Scherwiderstand bei einzelnen Auflasten ermittelt. Die so ausgewählten maximalen Scherwiderstände wurden gegen die Normalspannung aufgetragen und anschließend daraus die Kohäsion und der Winkel der inneren Reibung ausgerechnet.

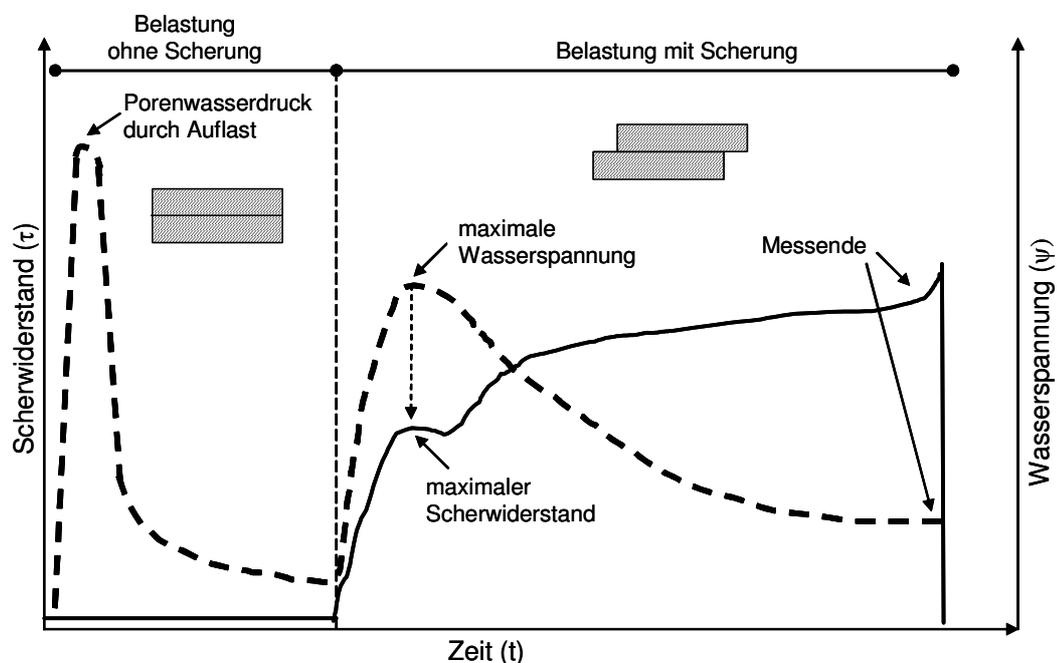


Abbildung 3-9 Bestimmung des maximalen Scherwiderstandes bei einer Scherkurve unter Berücksichtigung der Wasserspannung (schematische Darstellung)

3.5 Statistische Auswertung

Zur Charakterisierung der annähernd normal verteilten Ergebnisse wurden die statistischen Kennwerte wie Mittelwert und Standardabweichung verwendet. Bei nicht normal verteilten Ergebnissen –wie z.B. die Leitfähigkeiten- wurden sie erst logarithmisch transformiert und folgend der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Zur Prüfung einer Analyse auf statistische Signifikanz, wurde eine Einweg ANOVA mit randomisiertem Design durchgeführt und als multipler Vergleich der Mittelwerte der Tukey-Test verwendet. Bei allen Berechnungen galt ein Testniveau von $p < 5\%$ als Wiederlegung der Nullhypothese (Hartung, 2002). Bei den Berechnungen sind die signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen (z.B.: Pub, Pb, Mub, Mb in 35cm) innerhalb einer Tiefe mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; zwischen den Tiefen innerhalb einer Behandlung (z.B.: 12, 35 und 60cm bei Pub) sind sie mit großen Buchstaben gekennzeichnet. Bei Korrelationen wurde der quadrierte Korrelationskoeffizient R^2 als Bestimmtheitsmaß angegeben, der den Grad der Abhängigkeit zwischen beiden Variablen beschreibt. Alle Regressionsgleichungen sind in Anhang 15 zusammengefasst.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Bodenphysikalische und mechanische Belastung einer konventionell und konservierend bearbeiteten landwirtschaftlichen Fläche

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Änderung physikalisch-mechanischer Eigenschaften durch mechanische Belastung einer konventionell und konservierend bearbeiteten landwirtschaftlichen Fläche, in Harste, dargestellt.

Auf dem Versuchsfeld werden die Flächen, die mit dem Holmer Terra Dos Köpfrdebunker erst- und einmalig flächendeckend befahren wurden, als „befahrene“ Flächen (b) bezeichnet. Als „unbefahrene“ Flächen (ub) werden die Flächen ohne Überrollung mit Holmer Terra Dos benannt. Allerdings wurden alle Flächen im Zuge der jährlichen Bewirtschaftung mit den üblichen Landmaschinen belastet (mehr dazu im Kapitel Material und Methoden).

4.1.1 Freilandmessungen

Die Befahrungsversuche wurden im November 2002 und 2003 bei annähernd Feldkapazität durchgeführt. Der Wassergehalt des Bodens war bei der Befahrung 2002 und 2003 annähernd gleich (siehe auch Anhang 1), allerdings wies die Oberfläche in beiden Jahren einen höheren Wassergehalt auf als der Feldkapazität entspricht.

4.1.1.1 Kontaktflächen und Kontaktflächendruck bei den dynamischen Belastungen

Zur Beurteilung der Spannungsmessungen sind in Tabelle 4-1 die für die Berechnungen benötigten maschinenspezifischen Parameter aufgelistet. Die Parameter wurden vor Ort bestimmt.

Tabelle 4-1 Maschinenspezifische Parameter zu den Befahrungsversuchen

Parameter	Angaben
Erntemaschine	Holmer Terra Dos
Gewicht -gesamt gewogen	33256kg
-gesamt berechnet	34317kg
-Vorderrad links	8620kg
-Vorderrad rechts	8001kg
-Hinterrad links	9680kg
-Hinterrad rechts	8016kg
Achsabstand	5,1m
Vorderrad	Michelin
	800/65 R33xM28
-Reifengröße (B/d)	80/186cm
-Reifeninnendruck	2,7bar
Hinterrad	GoodYear
	VA73x44.00-32
-Reifengröße (B/d)	110/186cm
-Reifeninnendruck	2,2bar

Der Radlastunterschied zwischen Vorder- und Hinterrad, rechtem und linkem Rad ergab sich aus der Gewichtsverlagerung der Zuckerrübenerntemaschine und der Gewichtsverlagerung des teilgefüllten Bunkers. An der hinteren linken Seite ergab sich die größte Radlast mit 9,7Mg, während die Radlasten an der rechten Seite vorne und hinten mit je 8Mg gleich groß waren. Unterschiede ergaben sich zwischen den aufsummierten gewogenen Radlasten und dem gesamt gewogenem Gewicht durch die technische Umsetzung des Wiegens. Deswegen wird im Weiteren das Gewicht der Maschine mit ca. 35Mg beschrieben. Die Reifeninnendrucke waren zwischen den Vorder- und Hinterrädern unterschiedlich.

Bei dem Befahrungstermin November 2002 wurden die Parzellen bei der 2. Feldwiederholung Mulchvariante und 4. Feldwiederholung Pflugvariante mit der rechten Seite der Erntemaschine, bei Parzellen der 2. Feldwiederholung

Pflugvariante und 4. Feldwiederholung Mulchvariante mit der linken Seite überrollt.

Die Kontaktflächen wurden im November 2002 bei den aktuellen Bodenstabilitätsbedingungen detailliert für die Stollen und dem Stollenzwischenraum an der Pflug- und Mulchvariante von allen Rädern aufgenommen. Aus diesen Werten wurden die minimal möglichen mittleren Kontaktflächendrücke berechnet. Der maximale mittlere Kontaktflächendruck ergibt sich aus der Radlast bezogen auf die Kontaktfläche auf Asphalt als hartem Medium (Tabelle 4-2). Es ist anzumerken, dass die Kontaktflächenaufnahmen aus den Befahrungsversuchen von November 2002 auch für die Berechnungen bei den Befahrungen im November 2003 benutzt wurden.

Tabelle 4-2 Kontaktflächen [cm²] des Stollen- und Stollenzwischenraumes der Zuckerrübenerntemaschine auf der Pflug-, Mulchvariante und Asphalt (V-Vorderrad, H-Hinterrad, L-Links, R-Rechts)

Aufstandsgrund	Rad	Kontaktflächen [cm ²]		
		Stollen-zwischenraum	gesamt Stollen	gesamt Fläche
Pflug	VL	3650	2477	6127
	VR	4155	2066	6221
	HL	4689	4159	8848
	HR	3957	3467	7423
Mulch	VL	3606	2441	6047
	VR	3958	2252	6210
	HL	4312	3823	8135
	HR	3782	3362	7144
Asphalt	VL	k.A	k.A	2513
	VR	k.A	k.A	2462
	HL	k.A	k.A	2941
	HR	k.A	k.A	2715

Die Kontaktflächen der Stollen waren bei allen Varianten kleiner als die Flächen der Stollenzwischenräume; es war nicht möglich, diese Parameter auf dem Asphalt aufzunehmen; hier sind lediglich die Gesamtflächen berücksichtigt worden.

Die gesamten gemessenen Kontaktflächen zeigen, dass die Kontaktflächen der Hinterräder (110cm breit und 186cm Durchmesser) höhere Werte ergeben als die kleineren Vorderreifen (80cm breit und 186cm Durchmesser) (Abbildung 4-1).

Die Radlast und der Boden, bzw. die Bearbeitung beeinflussen dabei die Druckfortpflanzung wesentlich. Bei gleicher Radlast innerhalb einer Bearbeitungsvariante ist die Kontaktfläche von der Reifengröße abhängig (siehe Abbildung 4-1), Pflug und Mulch, rechte Seite, Vorder- und Hinterrad). Die Radlast an dem Hinterrad der linken Seite war 1,7Mg schwerer als auf der rechten Seite bei gleicher Reifengröße. Die Unterschiede zwischen der linken und rechten Seite waren bei den Hinterrädern der Mulchvariante sogar größer.

Beim Asphalt wurden unterschiedliche Kontaktflächen zwischen Reifenbreiten gefunden. Mit Erhöhung der Radlast bei gleicher Reifengröße stieg die Kontaktfläche.

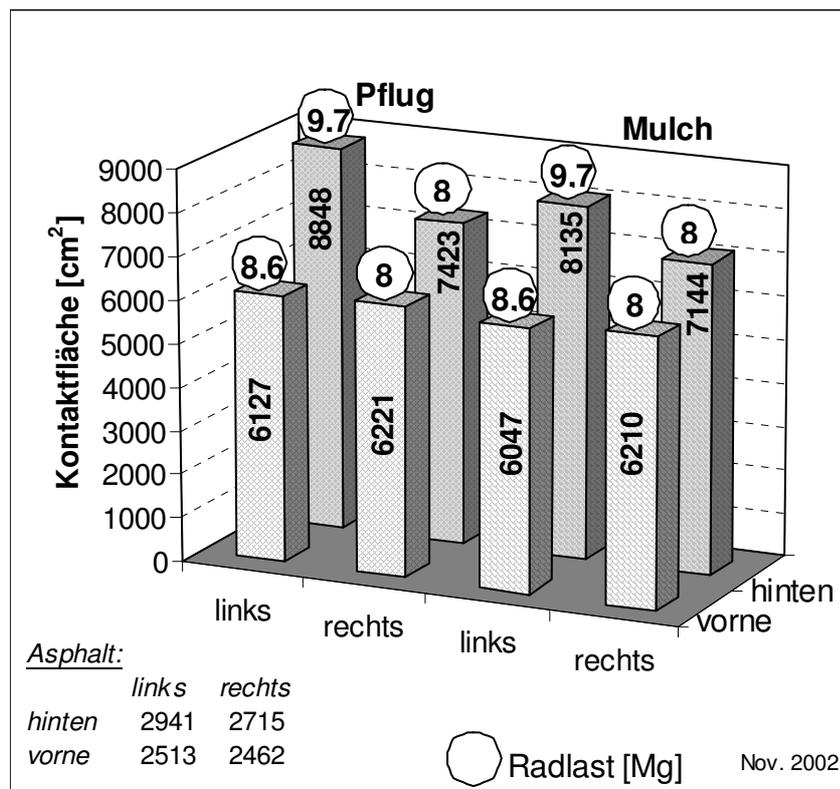


Abbildung 4-1 Gemessene gesamte Kontaktflächen unter allen Rädern bei der Pflug- und Mulchvariante und auf Asphalt

Die modellmäßige Schätzung der Kontaktflächen nach Koolen und Kuipers (1983) und nach Bolling und Söhne (1982) zeigten nur beim harten Medium (Asphalt) annähernd identische Werte zu den gemessenen Kontaktflächen (Tabelle 4-3). Aufgrund der nicht ausführbaren Messung der Stollenflächen und Stollenzwischenraumflächen auf dem Asphalt wurde hier die Aufstandsfläche als insgesamt gemessene Kontaktfläche angenommen.

Tabelle 4-3 Berechnete Kontaktflächen und Kontaktflächendrücke nach Koolen und Kuipers (1983) (1) und nach Bolling und Söhne (1982) (2) im Vergleich zu gemessenen Kontaktflächen auf Asphalt als hartem Medium bei unterschiedlichen Radlasten und Reifeninnendrücken (V-Vorderrad, H-Hinterrad, L-Links, R-Rechts)

Rad	Radlast N	Reifeninnendruck [kPa]	Kontaktfläche [cm ²] / Kontaktflächendruck [kPa]		
			gemessen	geschätzt ¹	geschätzt ²
VL	84562	270	2513 / 336	2506 / 338	2728 / 310
VR	78490	270	2462 / 319	2326 / 338	2532 / 310
HL	94961	220	2941 / 323	3453 / 275	3652 / 260
HR	78637	220	2715 / 290	2860 / 275	3024 / 260

Die Modellschätzungen (Tabelle 4-3) zeigen eine gute Anpassung an die gemessenen Kontaktflächen. Das Modell nach Koolen und Kuipers (1983) schätzt bei größeren Reifeninnendrücken den gemessenen Wert besser als bei kleineren Reifeninnendrücken. Das Modell nach Bolling und Söhne (1982) überschätzt die gemessenen Kontaktflächen.

Aus den berechneten und modellierten Kontaktflächen auf Asphalt sind die Kontaktflächendrücke für alle Räder berechnet. Die modellierten Kontaktflächen und deren Verwendung zur Berechnung der Kontaktflächendrücke zeigen, dass die berechneten Kontaktflächendrücke unter diese Bedingungen nur vom Reifeninnendruck abhängen. Deswegen sind die modellierten Werte bei gleichen Reifeninnendrücken gleich groß.

Wegen den Abweichungen zwischen den geschätzten Modellwerten und den gemessenen Kontaktflächen und Kontaktflächendrücken werden die gemessenen Werte aus dem Probenahmetermin November 2002 auch bei dem

Probenahmetermin November 2003 verwendet. (Im November 2003 stehen keine Kontaktflächendaten zur Verfügung).

Die möglichen minimalen Kontaktflächendrücke sind in Abbildung 4-2 für die Pflug- und Mulchvariante bei allen Radlasten und Reifenbreiten dargestellt.

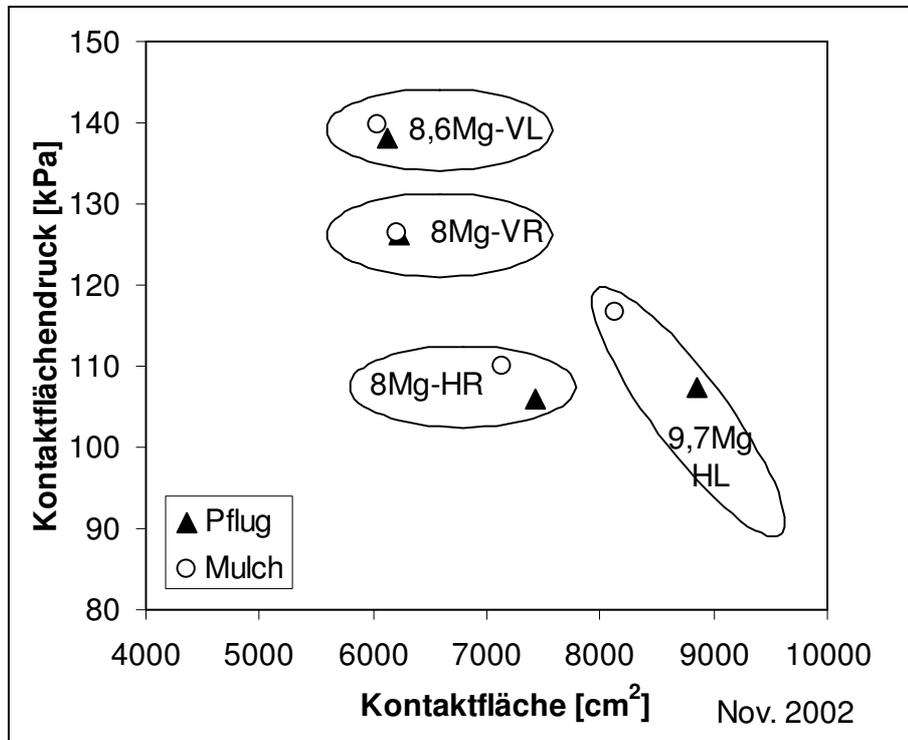


Abbildung 4-2 Zusammenhang zwischen Kontaktflächen und Kontaktflächendrücken bei unterschiedlichen Radlasten bei der Pflug- und Mulchvariante (die Abkürzungen sind dieselben wie in der Tabelle 4-3) (V-Vorderrad, H-Hinterrad, L-Links, R-Rechts)

Abbildung 4-2 zeigt, dass der Kontaktflächendruck bei annähernd gleichgroßen Kontaktflächen mit Erhöhung der Radlast zunimmt (siehe Vorderräder). Bei dem Hinterrad, mit einer Reifenbreite von 110cm, ergibt sich bei erhöhter Auflast (linkes Hinterrad) bei der Pflugvariante ein annähernd gleicher Kontaktflächendruck, wie es bei gleicher Reifenbreite, aber kleinerer Auflast war (rechtes Hinterrad). Hierbei zeigte die Mulchvariante einen höheren Kontaktflächendruck.

4.1.1.2 Bodendeformation (Spurtiefe, DTS-Sensor-Verschiebung)

Im Folgenden werden die Spurtiefen und die Bodenbewegungsmessungen dargestellt. Die Spurtiefen wurden beim Probenahmetermin November 2002 detailliert für die Stollen und den Stollenzwischenraum aufgenommen, während beim Probenahmetermin November 2003 nur die Stollentiefen aufgenommen wurden. Die Bodenbewegungsmessungen waren je Befahrungsversuch nur in einer Tiefe möglich, weswegen deren Ergebnisse bei der Darstellung mit den jeweiligen Feldwiederholungen gekennzeichnet sind. Auf Grund der geringen Anzahl vorhandener Messwiederholungen kann man aus den hier dargestellten Ergebnissen nur Tendenzen ableiten. Da die Befahrungen nicht immer mit derselben Fahrzeugseite durchgeführt werden konnten und folglich auch unterschiedliche Belastungssituationen auftraten, werden verschiedene Lastfälle betrachtet.

Durch die Befahrungen sind in den Fahrspuren je nach Bearbeitungsvariante unterschiedliche Spurtiefen entstanden, die in der Tabelle 4-4 nach den Spurtiefen unter den Stollen und den Stollenzwischenräumen dargestellt sind. Im Weiteren wird die Spurtiefe der Stollen als Maximalwerte aufgenommen und als Spurtiefe bezeichnet.

Tabelle 4-4 Spurtiefen bei Pflug- und Mulchvariante (im Nov. 2002 und 2003)

Variante	Spurtiefe [mm]		
	Nov. 2002		Nov. 2003
	Stollen	Stollen- zwischenraum	Stollen
Pflug	-59	-14	-66
Mulch	-42	-1	-48

Die Pflugvariante zeigte zu beiden Befahrungsterminen eine höhere Spurtiefe als die Mulchvariante. Im November 2003 entstanden durch eine Befahrung generell größere Spurtiefen.

Eine Oberflächendeformierung durch Verdichtung und Scherung induziert in tieferen Bodenhorizonten ebenfalls Bodenbewegungen, die in Abbildung 4-3 für eine typische Bodenbewegung exemplarisch dargestellt ist. Die erste

Bodenbewegung wurde vom Vorderrad induziert (die erste Aufwölbung). Danach folgte die Überrollung mit dem Hinterrad, welches eine weitere Bodenbewegung verursachte.

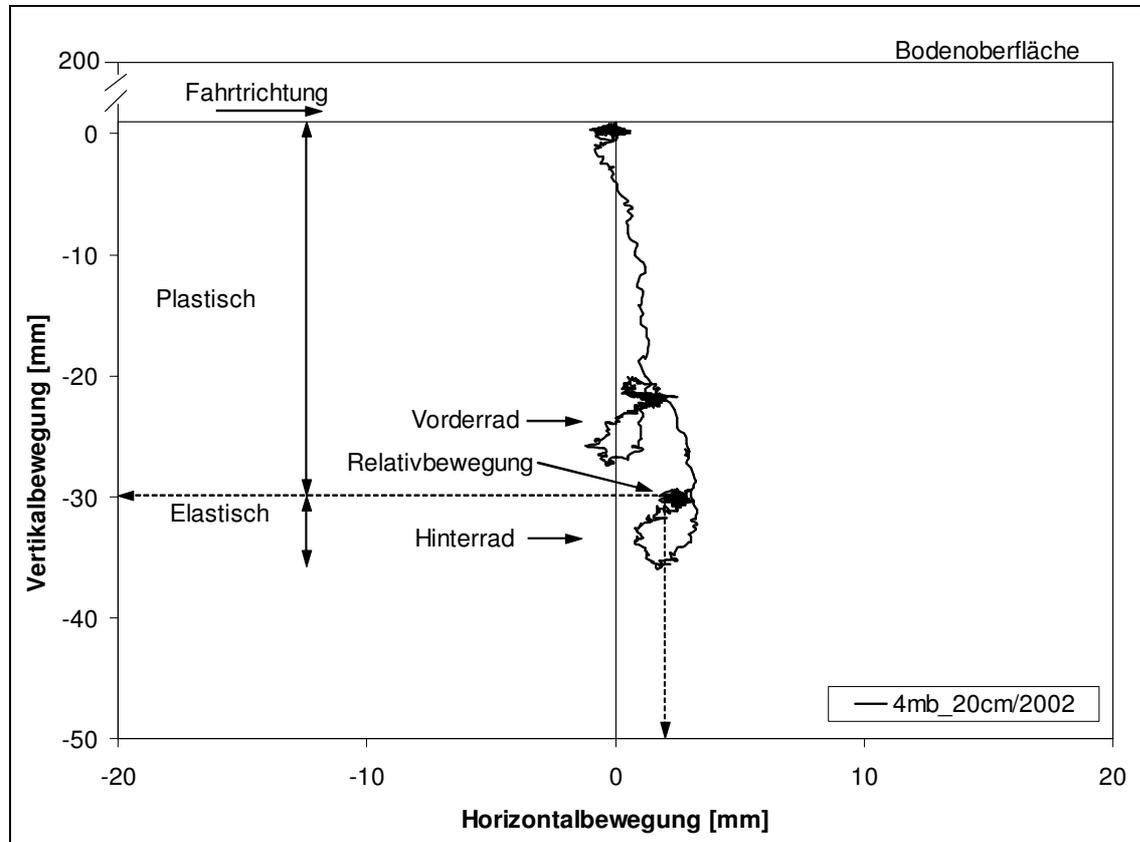


Abbildung 4-3 Beispiel für die vertikale und horizontale Bodenbewegung im Oberboden (20cm Tiefe) bei der Überfahrt mit Vorder- und Hinterrad (4. Wiederholung, Mulch, im Nov. 2002)

Die Bewegung des Bodens kann in einen plastischen und elastischen Anteil aufgeteilt werden. Hierbei zeigt sich, dass das Vorderrad und Hinterrad zusammen in dem zunächst lockeren Boden eine plastische Vertikalverformung hervorrufen, während beim Abrollvorgang des Hinterrades auf dem nun stärker verdichteten Boden eine elastische vertikale Verformung verursacht wird.

Die Relativbewegung ergibt sich aus dem Endwert der Messung relativ zur Ausgangslage (hier 20cm Tiefe). Die Relativbewegung zeigt die Verschiebung des Bodens durch eine Befahrung, die mit einer horizontalen und einer vertikalen Bewegungskordinate beschrieben werden kann. Die horizontale Relativbewegung des Bodens zeigt positive Werte, wenn die Verschiebung des Bodens in Fahrtrichtung erfolgt, negative Werte zeigen eine Verschiebung

gegen die Fahrtrichtung an. Die vertikale Relativbewegung des Bodens ist bei einer Verdichtung tiefenbezogen immer negativ. Geht die vertikale Bodenbewegung in positive Richtung (nähert sich der Bodenoberfläche), so beruht sie auf einem Schervorgang im Boden, der Material, der Rankine-Prandtl'schen Theorie folgend, bei einem abrollenden Rad vorwiegend nach hinten und oben verlagert.

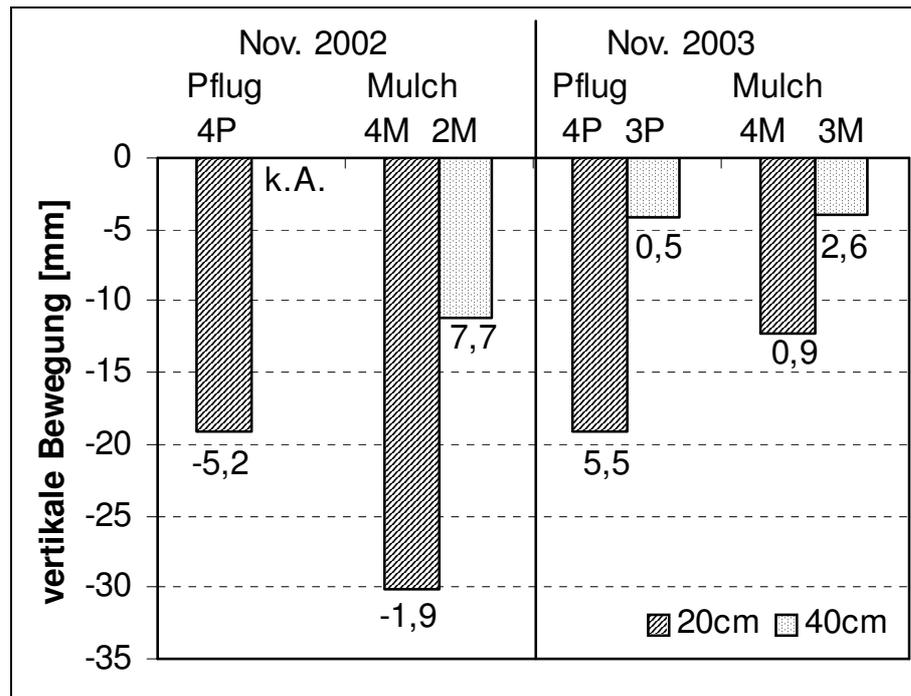


Abbildung 4-4 Relative Bodenbewegung in 20 und 40 cm Tiefe bei Pflug- und Mulchvarianten zu den Befahrungsterminen Nov. 2002 und Nov. 2003. Die Zahlen unter den Säulen stellen die relative horizontale Bodenbewegung in mm dar (Die Nummern der Bearbeitungsvarianten sind unterschiedliche Befahrungsf lächen)

Das Vorderrad verursachte stets eine größere vertikale Bewegung als das Hinterrad (siehe Anhang 2, Anhang 3), wobei das Hinterrad eine additive Wirkung hat. Die Einzelmessungen aus der Abbildung 4-4 zeigen, dass die vertikale Bodenbewegung bei beiden Bearbeitungssystemen in 20cm Tiefe stets größer als in 40cm war. Bei der Pflugvariante hat die horizontale Bodenbewegung mit der Tiefe abgenommen, da die stark verdichtete Pflugsohle eine horizontale Verschiebung der plattigen Bodenaggregate verhindert hat. Im Gegensatz dazu kann man bei der Mulchvariante in 40cm Tiefe eine ausgeprägtere horizontale Bodenbewegung finden als in 20cm Tiefe,

auf Grund der weniger starren Pflugsohle (inwiefern sich in der Zeit seit 1991 diese wieder zurückgebildet hat, wird an anderer Stelle noch diskutiert).

4.1.1.3 Spannungsmessungen

Nachfolgend werden die Spannungsmessungen aus zwei Befahrungsterminen (Nov. 2002 und 2003) in 3 Tiefen (20, 40, 60cm) dargestellt. Wegen den widrigen Wetterbedingungen am Messstandort wurden die Befahrungsversuche auf der Pflug- und Mulchvariante bei jeweils maximal 2 Feldwiederholungen durchgeführt. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind deshalb lediglich als Tendenzen anzusehen.

Abbildung 4-5 zeigt alle aus den Rohdaten berechneten Spannungszustände im Zeitverlauf der Messungen in allen Tiefen und Varianten für den Befahrungstermin November 2002. Die Spannungen zeigen hier –ohne auf die einzelnen Spannungen einzugehen- unterschiedliche Spannungsübertragungen in die tieferen Horizonte.

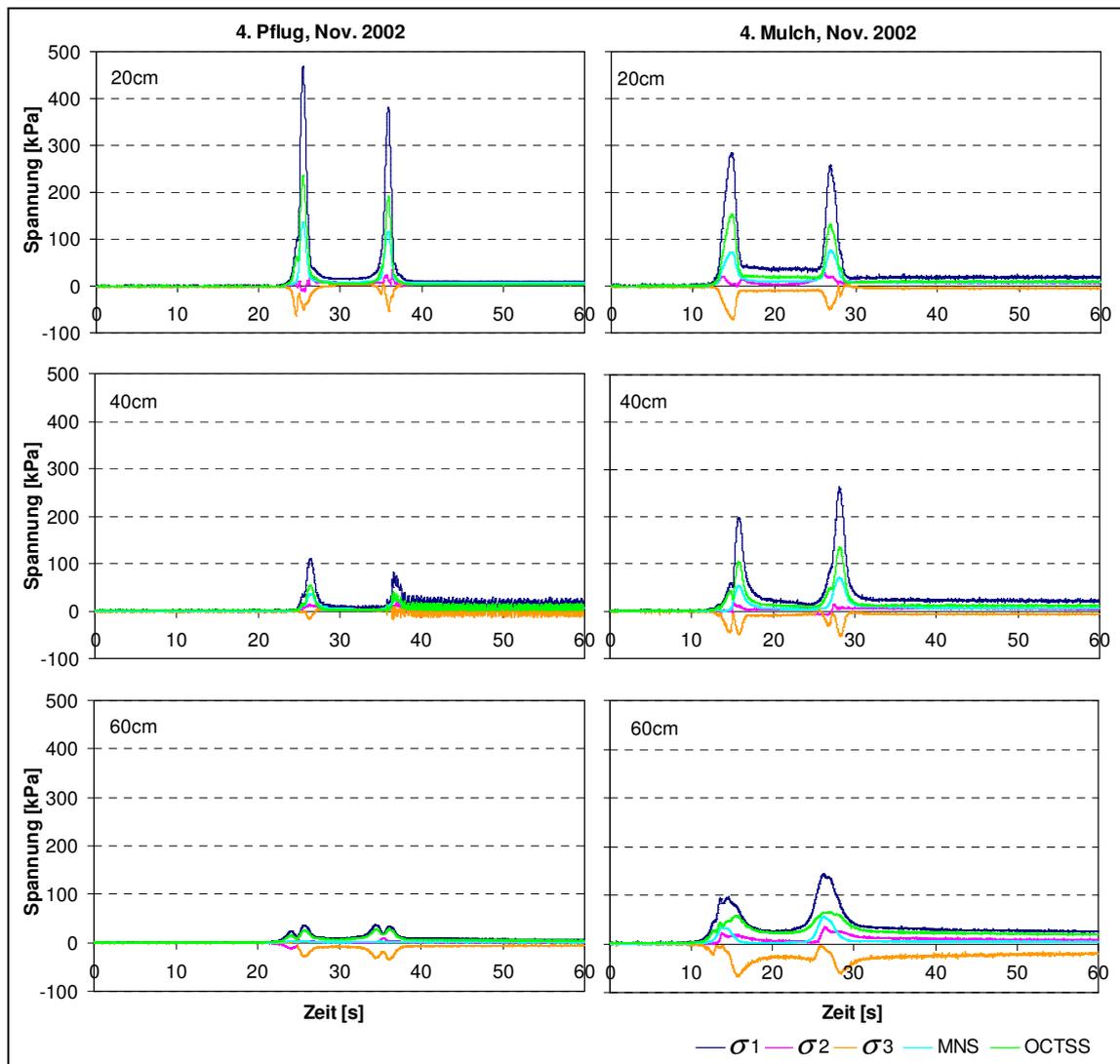


Abbildung 4-5 Typische Hauptspannungsverläufe (σ_1 , σ_2 , σ_3) und Invarianten (MNS, OCTSS) des Spannungstensors am Beispiel der beiden Varianten: Pflug und Mulch (4. Feldwiederholung, im Nov. 2002)

Die Spannungseinträge im Oberboden der Pflugvariante sind höher als bei der Mulchvariante. Bei der Pflugvariante in 40cm Tiefe reduzieren sich die Spannungseinträge stark, so dass der Unterboden lediglich einen geringen Spannungseintrag aufweist. Bei der Mulchvariante verlaufen die Spannungen kontinuierlich bis in den Unterboden, wobei sie mit der Tiefe abnehmen.

In Abbildung 4-6 sind die Spannungseinträge von σ_1 als die größte Hauptspannung, von der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) für drei Tiefen und für beide Bearbeitungssysteme als Ergebnis der 2. (mit Mulch) und 4. (mit Pflug und

Mulch) Feldwiederholung für den Befahrungstermin Nov. 2002 zusammengefasst. Die Balken stellen Resultate von unterschiedlichen Gruben mit drei Tiefen dar. Bei der 2. Feldwiederholung wurden die Messungen bei der Pflugvariante mit der linken Fahrzeugseite (Radlast vorne 8,6Mg; hinten 9,7Mg), bei der Mulchvariante mit der rechten Fahrzeugseite (Radlast vorne und hinten jeweils 8Mg) durchgeführt. Zur 4. Feldwiederholung wurden Messungen bei der Pflugvariante mit der rechten Fahrzeugseite (niedrigere Radlasten) und bei der Mulchvariante mit der linken Fahrzeugseite (schwerere Radlasten) durchgeführt.

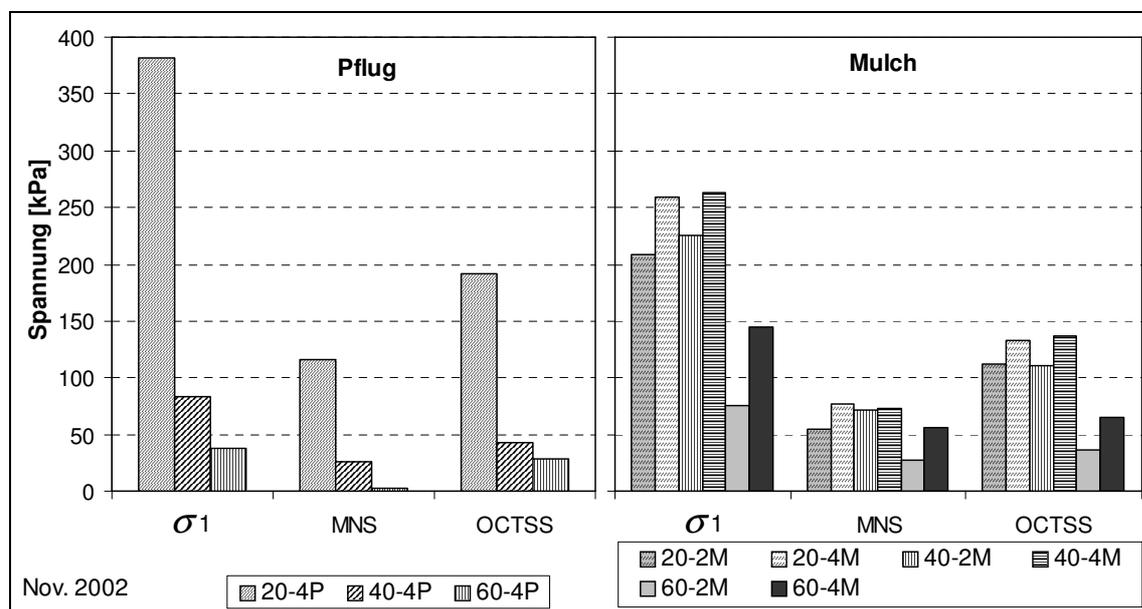


Abbildung 4-6 Spannungskomponenten bei Pflug- und Mulchvariante in unterschiedlichen Tiefen im Nov. 2002

Es ist deutlich zu erkennen, dass die berechneten Spannungskomponenten bei der Pflugvariante in 20cm Tiefe ca. doppelt so hoch waren wie bei der Mulchvariante. Im Gegensatz dazu sind in 40 und 60cm Tiefe die Spannungskomponenten bei der Mulchvariante größer als bei der Pflugvariante. Da bei der Pflugvariante eine stark ausgeprägte Pflugsohle vorhanden ist, hat diese den Spannungseintrag in tiefere Horizonte verhindert; während bei der Mulchvariante die ehemalige Pflugsohle weniger ausgeprägt ist. Bei der Pflugvariante nehmen die Spannungen mit der Tiefe stufenweise ab, wohingegen bei der Mulchvariante die Spannungen in 20 und 40cm Tiefe annähernd gleich groß sind und erst in 60cm Tiefe abnehmen (Abbildung 4-6).

Aus der Abbildung 4-6 kann man außerdem erkennen, dass bei der Mulchvariante die unter den schwereren Radlasten (linke Fahrzeugseite vorne 8,6Mg; hinten 9,7Mg; 4. Feldwiederholung) induzierten Spannungen größer sind als bei den 8Mg Radlasten der rechten Fahrzeugseite (2. Feldwiederholung). Diese Ursache ist in der Abbildung 4-7 deutlicher dargestellt; bei der mit steigender Radlast die größte Hauptspannung sogar in tieferen Bereichen steigt. Über lastabhängige Spannungseinträge bei der Pflugvariante kann auf Grund fehlender Messwerte keine Stellung bezogen werden.

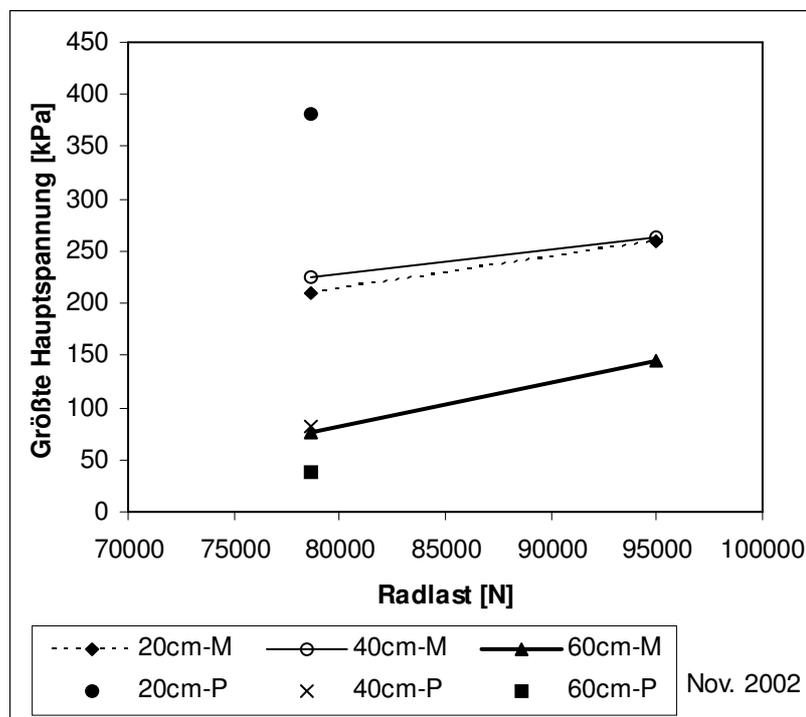


Abbildung 4-7 Lastabhängiger Spannungseintrag (σ_1) in unterschiedlichen Tiefen (keine Angaben für die Pflugvariante bei höherer Radlast)

In einem weiteren Versuch wurden die Spannungsmessungen spurversetzt durchgeführt (Abbildung 4-8), wobei die Befahrung um eine Reifenbreite zu den Sensoren versetzt erfolgte, d.h. die Sensoren waren von der Reifenmitte ca. 110cm entfernt. Über diese Messungen sind sowohl von der Pflug- als auch von der Mulchvariante 2 Messungen aus unterschiedlichen Gruben dargestellt. Die Spannungskomponenten zeigen die horizontale Weiterleitung der Spannungen im Boden bei unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten und in drei Tiefen. Bei der Pflugvariante konnten die Spannungen horizontal nur eingeschränkt

weitergeleitet werden und die Spannungseinträge erreichen als Maximumwert ca. 5kPa. Bei der Mulchvariante sind höhere Spannungskomponenten als bei der Pflugvariante festzustellen. Hierbei steigen die maximalen Hauptspannungen und die mittleren Normalspannungen mit der Tiefe an, während die octaedrischen Scherspannungen mit der Tiefe gleich klein bleiben.

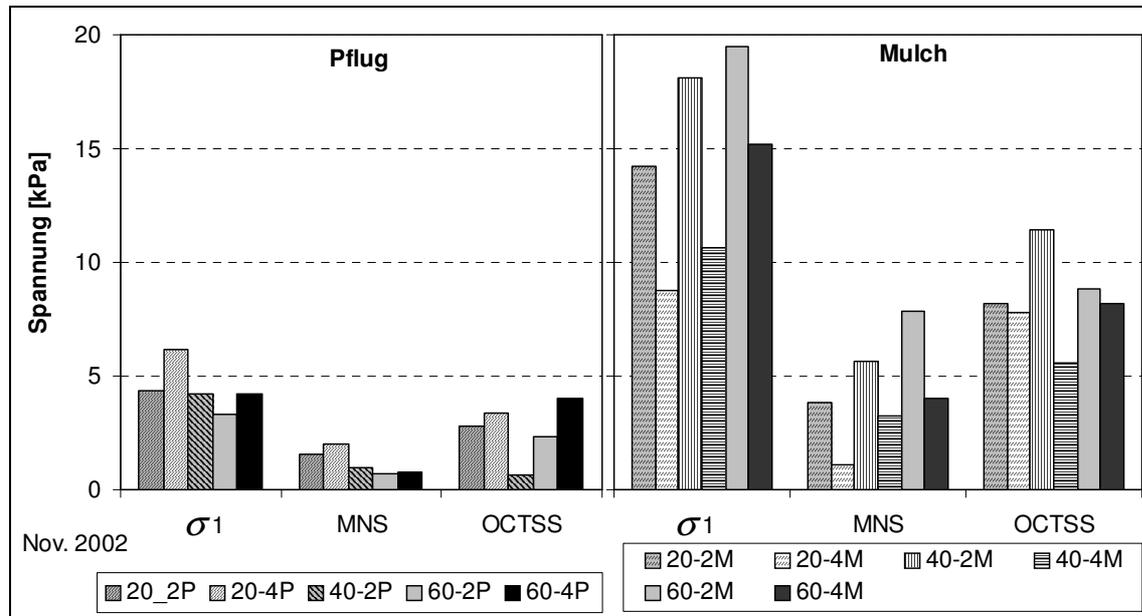


Abbildung 4-8 Spurversetzte Spannungskomponenten bei Pflug- und Mulchvariante in unterschiedlichen Tiefen im Nov. 2002

Die Spannungsmessungen aus dem Befahrungstermin November 2003 sind in der Abbildung 4-9 für die beiden Bearbeitungssysteme und drei Tiefen zusammengefasst. Bei der Pflugvariante stehen allerdings nur die Tiefen 20 und 40cm zur Verfügung. Die Spannungen wurden hierbei bei der 3. Feldwiederholung sowohl bei der Pflug- als auch bei der Mulchvariante mit den Rädern der linken Fahrzeugseite (höhere Radlasten) induziert, bei der 4. Feldwiederholung der Pflugvariante mit der linken Seite und bei der Mulchvariante mit der rechten Seite (niedrigere Radlasten) induziert. Kleinere Abweichungen sind auf die Befahrungen mit unterschiedlichen Fahrzeugseiten und auf Bodenheterogenitäten zurückzuführen.

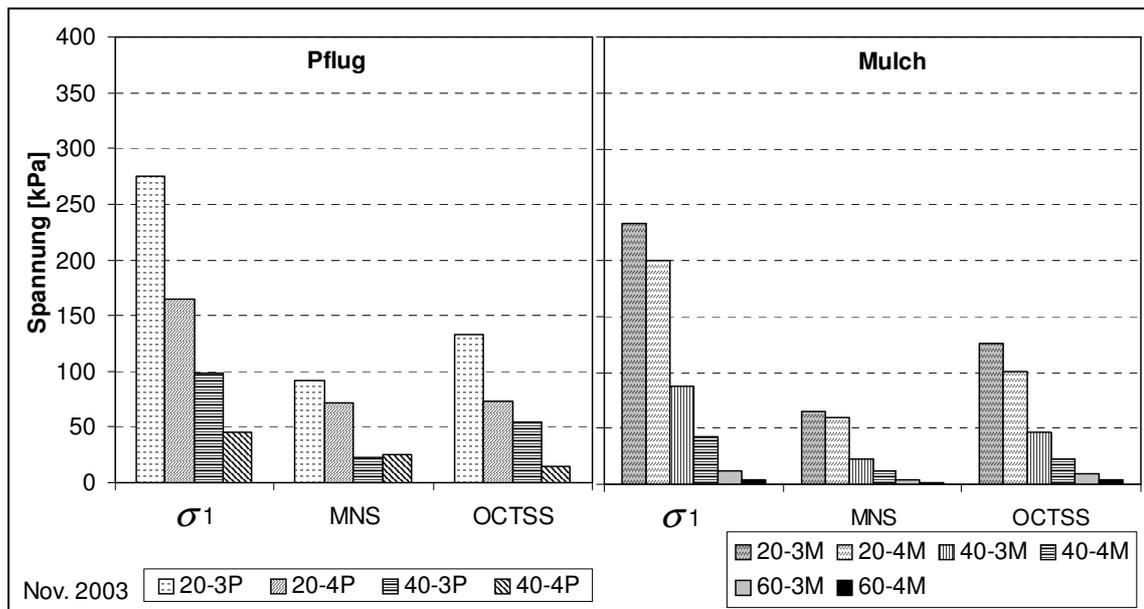


Abbildung 4-9 Spannungskomponenten bei Pflug- und Mulchvariante in unterschiedlichen Tiefen im Nov. 2003 (keine Angaben sind für Pflug 60cm Tiefe vorhanden)

Die Spannungskomponenten aus dem Befahrungstermin Nov. 2003 zeigen bei der Pflugvariante eine ähnliche Tendenz wie im Nov. 2002, im Gegensatz zur Mulchvariante. Dies kann auf eine räumliche Variabilität zurückgeführt werden. In 20cm Tiefe sind die größten Hauptspannungen annähernd gleich groß sowohl bei der Pflug- als auch bei der Mulchvariante. Die größte Hauptspannung nimmt bei beiden Varianten mit der Tiefe ab. Dasselbe gilt für die mittlere Normalspannung und für die octaedrische Scherspannung.

Die spurversetzte Befahrung (zwischen Reifenmitte und SST-Sensoren betrug der Abstand ca. 110cm) im Nov. 2003 zeigt andere Tendenzen als Nov. 2002 (Abbildung 4-10). Dies kann einerseits mit einer räumlichen Variabilität erklärt werden, andererseits handelt es sich hier um ganz kleine Werte, die die Erkennung der Unterschiede erschwert. In 2003 war die größte Hauptspannung bei der Pflugvariante in 20cm Tiefe höher als bei der Mulchvariante, wobei sie mit der Tiefe insgesamt abnimmt. Allerdings besteht kein Unterschied zwischen den Tiefen 40 und 60cm. Hierbei bleibt die größte Hauptspannung bei den beiden Varianten annähernd gleich, da es sich hier um ganz geringe Werte mit geringen Unterschieden handelt. Die mittlere Normalspannung zeigt in allen Tiefen und Varianten sehr niedrige Werte an. Die octaedrische Scherspannung ist bei der Pflugvariante in 20cm Tiefe höher als bei der Mulchvariante während

sie in 40 und 60cm Tiefe bei den beiden Varianten ähnlich kleine Werte zeigt, was wiederum in den kleinen Werten der kleinen Hauptspannungen (σ_2 und σ_3) begründet ist.

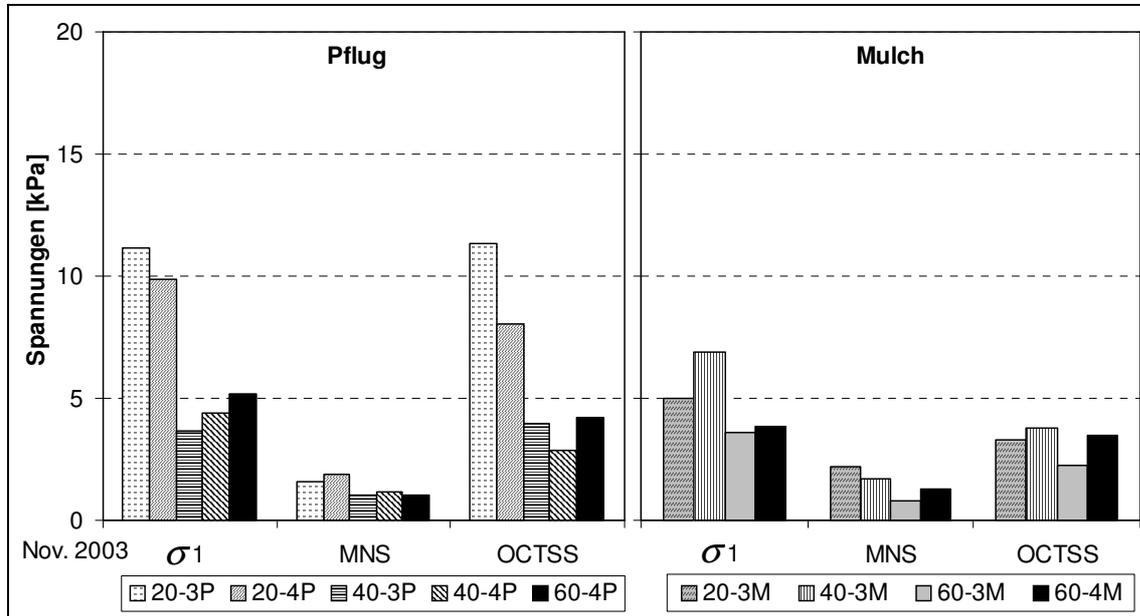


Abbildung 4-10 Spurversetzte Spannungskomponenten bei Pflug- und Mulchvariante in unterschiedlichen Tiefen im Nov. 2003

Um die Spannungsausbreitung im Bodenprofil bei einer direkten Befahrung bei unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten besser zu charakterisieren, ist in Tabelle 4-5 das Verhältnis zwischen den drei Hauptspannungen und der octaedrischen Spannungsziffer (OCTSS/MNS) dargestellt. Die Hauptspannungen nehmen mit der Tiefe ab. Abweichungen hiervon kann man in der Pflugsohle der Pflugvariante und in den Tiefen des ehemaligen Pflugsohlenbereichs der Mulchvariante feststellen. Vergleicht man nur 20 und 60cm, so zeigt die größte Hauptspannung in 20cm Tiefe den größten Wert und deren Verhältnis zu den kleinsten Hauptspannungen den kleinsten Wert, während in 60cm Tiefe die größte Hauptspannung kleiner als in 20cm Tiefe ist und deren Verhältnis zu den kleinsten Hauptspannungen größer werden.

In der Tabelle 4-5 kann man die Hauptspannungsverhältnisse zwischen σ_2 und σ_1 auch als Ruhedruckkoeffizient bezeichnen. Nähert sich dieser Koeffizient dem Wert 1, dann kann der Boden als überverdichtet charakterisiert werden. Bei solchen Zustand wurden die Bodenpartikel bzw. Aggregate durch eine

mechanischen Belastung die horizontale Hauptspannung größer ist als die vertikale. Auf Grund der fehlenden Anzahl von Messwiederholungen lassen sich nur sehr grobe Schätzungen machen. Allerdings zeigt die Pflugvariante stets größere Werte als in der entsprechenden Tiefe der Mulchvariante.

Das Verhältnis zwischen octaedrischer Scherspannung und mittlerer Normalspannung (OCTSS/MNS) stellt die Dynamik der Kraftübertragung vom Reifen in den Boden dar. Diese Spannungsziffer ist bei allen Varianten und Tiefen größer als 1 (Ausnahme 4. Pflug 40cm, Nov. 2003). Folglich kann damit auch eine Bodenstrukturzerstörung nachgewiesen werden.

Tabelle 4-5 Zusammenfassende Ergebnisse der direkten erst- und einmaligen Befahrungen: größte Hauptspannung (σ_1), Verhältnis zwischen den drei Hauptspannungen ($\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$) und die octaedrische Spannungsziffer (OCTSS/MNS) aus allen Feldmessungen und den beiden Befahrungsterminen

Variante/Tiefe		Kontaktflächen-	σ_1	$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$	OCTSS/MNS
Nov. 2002	[cm]	druck [kPa]	[kPa]		
2 Pflug	20	107,3	k.A.	k.A. : k.A. : k.A.	k.A.
4 Pflug	20	105,9	382,1	1 : 0,10 : -0,14	1,66
2 Pflug	40	107,3	k.A.	k.A. : k.A. : k.A.	k.A.
4 Pflug	40	105,9	82,8	1 : 0,24 : -0,23	1,65
2 Pflug	60	107,3	k.A.	k.A. : k.A. : k.A.	k.A.
4 Pflug	60	105,9	38,0	1 : 0,27 : -0,94	9,44
2 Mulch	20	110,1	209,1	1 : 0,13 : -0,27	2,03
4 Mulch	20	116,7	259,2	1 : 0,12 : -0,19	1,74
2 Mulch	40	110,1	225,5	1 : 0,15 : -0,11	1,55
4 Mulch	40	116,7	263,8	1 : 0,06 : -0,20	1,88
2 Mulch	60	110,1	75,4	1 : 0,23 : -0,13	1,31
4 Mulch	60	116,7	144,8	1 : 0,25 : -0,43	1,17
Nov. 2003					
3 Pflug	20	107,3	275	1 : 0,13 : -0,14	1,46
4 Pflug	20	107,3	165	1 : 0,33 : -0,37	1,02
3 Pflug	40	107,3	98	1 : 0,05 : -0,30	2,36
4 Pflug	40	107,3	45	1 : 0,49 : -0,01	0,62
3 Pflug	60	107,3	k.A.	k.A. : k.A. : k.A.	k.A.
4 Pflug	60	107,3	k.A.	k.A. : k.A. : k.A.	k.A.
3 Mulch	20	116,7	233	1 : 0,16 : 0,01	1,95
4 Mulch	20	110,1	200	1 : 0,10 : -0,17	1,69
3 Mulch	40	116,7	87	1 : 0,03 : -0,02	2,08
4 Mulch	40	110,1	43	1 : 0,15 : -0,22	1,83
3 Mulch	60	116,7	12	1 : 0,37 : -1,06	2,74
4 Mulch	60	110,1	4	1 : 0,56 : -1,31	2,68

Aufgrund der Vorgeschichte des Versuchsstandortes zeigen die Spannungsverhältnisse aus der Tabelle 4-5 bei der Pflug- und Mulchvariante in beiden Versuchsjahren ähnliche Tendenzen: In 20cm Tiefe zeigt der Ruhedruckkoeffizient, dass die vertikale Spannungskomponente viel größer als die horizontale Spannungskomponente war. Die Kraftübertragung dieser vertikalen Spannung stellt sich auch im Quotienten aus OCTSS/MNS dar und zeigt eine Verscherung durch eine dynamische Bodenbewegung. Folgt man dem Spannungsverlauf und betrachtet die Werte in 40cm Tiefe, so stellt man fest, dass die vertikale Spannungskomponente überwiegt und sich in der Dynamik ebenfalls in einer Verscherung auswirkt. Bei der Pflugvariante zeigen die nicht einheitlichen Werte ein unkontrolliertes Aufbrechen der Pflugsohle, während sich die Mulchvariante im ehemaligen Pflugsohlenbereich widerstandsfähiger zeigte, was sich durch einheitlichere Spannungseinträge belegen lässt. In 60cm Tiefe zeigt sich ebenfalls ein Übergewicht der vertikalen Spannungskomponente und diese wirkt sich in der Dynamik wiederum in einer Scherung aus. Bei der Pflugvariante zeigt sich jedoch eine erhöhte dynamische Auswirkung in Form von Scherung, was auch mit der erhöhten Zugspannung bestätigt wird. Dies kann jedoch durch fehlende Wiederholungen nicht eindeutig belegt werden.

4.1.2 Diskussion zum Thema Freilandmessungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der gemessenen Bodenbewegungen und Spannungsmessungen durch eine Überrollung bei der Pflug- und Mulchvariante diskutiert. Da zu diesem Thema eine höhere Anzahl von Wiederholungen fehlt, sind die Ergebnisse ausdrücklich als Tendenzen anzusehen. Um wirklich quantitative Angaben machen zu können, sollte man die Anzahl von Wiederholungen erhöhen, um statistisch sichere Ergebnisse zu bekommen. Neben wenigen Messwiederholungen ist die Aussage je nach Wetterverhältnissen, Wassergehalt des Bodens und kleineren Unterschieden zwischen Radlasten der linken und rechten Seite des Rübenrodgers stets nur als situationsbezogen zu werten.

Zum Befahrungstermin Nov. 2002 wurden die Kontaktflächen aufgenommen und davon die Kontaktflächendrücke unter Berücksichtigung der Radlasten berechnet. Söhne (1953) und Blackwell et al. (1986) zeigen, dass die wichtigsten Einflussfaktoren der Bodenstrukturveränderung nahe der Bodenoberfläche vor allem der Bodenzustand und der Kontaktflächendruck sind. Der Kontaktflächendruck entspricht dem Druck, der im Oberboden unter der Radfläche herrscht. In den Versuchen zeigte sich, dass die berechneten Kontaktflächendrücke hauptsächlich von der Reifengröße und Radlast bzw. von den Bodenbedingungen abhängen (vgl. Abbildung 4-2). Die Kontaktflächendrücke auf dem Boden waren stets kleiner als die auf dem Asphalt bestimmten maximal möglichen Kontaktflächendrücke.

Bolling und Söhne (1982) und Koolen und Kuipers (1983) ermittelten ein Schätzverfahren, um den Kontaktflächendruck mittels Reifeninnendruck zu berechnen. Wendet man dieses an, so erzielt man eine gute Übereinstimmung zwischen den geschätzten und den gemessenen Werten bei der Asphalt-Variante, während für die Feldbedingungen die Werte überschätzt wurden. Bolling und Söhne (1982) erzielten bei ihren Messungen eine Annäherung zwischen den geschätzten und gemessenen Werten nur für Traktoren, während die Berechnungen sehr undifferenzierte Ergebnisse für andere Landmaschinen und außerdem große Abweichungen ergaben. Horn et al. (1987) konnten in ihren Messungen keine Übereinstimmung feststellen und auch Burt et al. (1987a) haben auf die Problematik der großen Abweichungen der Berechnungen hingewiesen und haben vorgeschlagen, ein Messgerät direkt auf der Reifenoberfläche zu installieren, womit es möglich ist, direkte Messungen über Druck- und Spannungsverhältnisse an der Reifenaufstandsfläche zu erhalten.

Aus der oben genannten Literatur und nach den Ergebnissen von Burger et al. (1988) wird deutlich, dass das Kompensationsverhalten des Bodens gegenüber jeglichen Lasteinträgen durch Maschinen mit den Kontaktflächendrücken nicht allein erklärt werden kann. Außerdem wird deutlich, dass bei steigenden Radlasten mit zunehmender Reifenbreite die Kontaktfläche größer wird; dadurch sinkt zwar der Kontaktflächendruck, aber eine tieferreichende

Bodenverdichtung ist so nicht vermeidbar (Keller und Arvidsson, 2004). In der vorliegenden Arbeit hatten die Hinterräder (mit breiteren Reifen) eine größere Kontaktfläche, womit der Kontaktflächendruck reduziert wurde. Hierbei konnte in der Druckfortpflanzung keine Veränderung festgestellt werden, die einen Hinweis auf eine effektivere Bodenschonung ergibt (vgl. Abbildung 4-5).

Durch eine dynamische Belastung wurden im Unterboden vertikale und horizontale Bodenbewegungen induziert, wobei die vertikale Bodenbewegung überall ausgeprägter als die horizontale war. Die Bodenbewegung bedeutet eine Umlagerung der Partikel oder sogar eine Umlagerung der Aggregate. Dexter (1988) hat diesen Vorgang im Folgenden beschrieben: zu Beginn werden die Struktureinheiten auf ein kleines Gesamtvolumen zusammengedrückt, ohne die Eigenschaften der Aggregate zu verändern. Danach werden die Struktureinheiten in kleinere Bruchstücke zerschert, die sich in das Interaggregatporensystem einlagern; erst danach findet eine vollständige Zerstörung der Struktureinheiten statt.

Da die Befahrung mit dem Vorderrad beginnt, wirkt die Befahrung mit dem Hinterrad als zweite Kurzzeitbefahrung, deshalb treten auch additive Effekte bei der Bodenbewegung bzw. Bodenverdichtung auf. Hierbei induziert das Vorderrad eine größere vertikale Bodenbewegung, während durch die „zweite Überrollung“ mit dem Hinterrad das Bodenelement noch tiefer versetzt wird (vgl. Anhang 2, Anhang 3).

Bei der Auswertung der Spannungsmessungen wurde der Schwerpunkt auf die Beziehung des Verhältnisses der Hauptspannungen und der octaedrischen Spannungsziffer (Bailey et al., 1988) gelegt. Damit ist es möglich, die vorher erwähnten Prozesse der Strukturzerstörung besser darzustellen, da sich eine ausgeprägte Bodenbewegung auch in der octaedrischen Spannungsziffer widerspiegelt.

Die Spannungsausbreitung variiert je nach Stabilitätszustand im ganzen Bodenprofil. Generell unterscheidet sich die Spannungsausbreitung bei der Pflug- und Mulchvariante. Bei der Pflugvariante werden in dem homogenisierten instabilen Oberboden größere Spannungen induziert als bei der Mulchvariante.

Die stark ausgeprägte Pflugsohle kompensiert scheinbar einen Teil der Spannungen, jedoch wurden die Sensoren ohne großen Widerstand aus unteren Bereichen tiefer gedrückt, was in den Spannungsmessungen mit kleineren Werten zu sehen ist. Die eingetragenen Spannungen müssten demzufolge tiefer als 60cm herauskommen (vgl. Abbildung 4-5). Der Energieeintrag bleibt in der Pflugsohle nicht folgenlos, was Tabelle 4-5 durch große Unterschiede der octaedrischen Spannungsziffer in 40 und 60cm Tiefe zeigt. Taylor et al. (1980), Koolen und Kuipers (1983) und Becher (2004) haben auch darauf hingewiesen, dass ein tragfähiger, stabiler Horizont den Unterboden vor Belastung schützen kann, wenn die Eigenstabilität des Horizontes nicht überschritten wird. Dem gegenüber steht die Mulchvariante, wo die Spannungen kontinuierlich tiefer in den Boden eingetragen werden, was auf eine weniger starre Pflugsohle hinweist, die gleichmäßiger belastbar ist und die durch eine Auflast tiefer gedrückt werden kann. Hierbei ist die ehemalige Pflugsohle (nach 12 Jahren ohne Pflügen) noch immer ausgeprägt, jedoch hat sie sich nicht weiter ausgebildet, wie es bei der Pflugvariante der Fall ist.

Generell kann man davon ausgehen, dass σ_1 sowie die beiden horizontalen Hauptspannungen σ_2 und σ_3 solange proportional steigen, wie der Boden stabil bleibt. Wenn hingegen die Eigenfestigkeit z.B. der Pflugsohle überschritten wird, steigt σ_1 überproportional an. Dies deutet auf ein bevorzugtes vertikales Druckfortpflanzungsverhalten. Außerdem führt es zu einer dichteren Lagerung der Bodenmatrix (Semmel, 1993). In der Pflugsohle der Pflugvariante bzw. in der ehemaligen Pflugsohle der Mulchvariante weichen die Hauptspannungswerte voneinander stark ab (vgl. Tabelle 4-5), was mit Unterschieden in der Bodenstruktur erklärt werden kann. Eine Überrollung kann in der stabilen Pflugsohle eine starke Strukturänderung hervorrufen und damit zu Unregelmäßigkeiten in den gemessenen Spannungen je nach Sensorlage im Boden führen. Liegt der Sensor z.B. unmittelbar unter einer stark ausgebildeten, hoch verdichteten Platte, wird die vertikale Spannungsausbreitung durch die plattige Pflugsohle gebremst. Die Folge ist eine Druckkompensation wie sie bei der Pflugvariante auftritt. Wenn aber in der Pflugsohle während einer Überrollung eine starke Strukturänderung stattfindet (z.B. Aufbrechen der

Pflugsohle), kann die vertikale Spannungsausbreitung bei späteren Befahrungen ausgeprägter sein.

Die Beziehung zwischen $\sigma_2:\sigma_1$ wird als Ruhedruckkoeffizient bezeichnet, dessen Wert in der Regel zwischen 0,2-0,7 liegt (Hartge und Horn, 1999). Den Ruhedruckkoeffizient kann man auch als einen Gradmesser der plastischen Verformung sehen. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit (siehe Tabelle 4-5) stimmen teilweise mit den Regelwerten überein. Die Werte des Ruhedruckkoeffizienten sind bei einigen Stellen kleiner als 0,2, was bedeuten würde, dass der Boden durch eine Befahrung tiefer gedrückt wurde, ohne nennenswerte Scherung. Übersteigt der Ruhedruckkoeffizient den Wert 1, so bedeutet dies, dass die Spannungen in der horizontalen Richtung größer als in vertikaler Richtung sind. In solchem Fall wird die horizontale Spannung als größte Hauptspannung bezeichnet. Dieser Fall des Richtungswechsels der größten Hauptspannung ist bei der Mulchvariante der 3. und 4. Feldwiederholung in 60cm Tiefe im Nov. 2003 vorgekommen. Dies ist so zu erklären, dass mit vertikalem Spannungseintrag eine höhere horizontale Zugspannung hervorgerufen wurde.

Bei der Pflugvariante und Mulchvariante wurden dieselben herkömmlichen landwirtschaftlichen Maschinen eingesetzt, die verdichtungswirksam sind. Allerdings ist die Verbindung zwischen Ober- und Unterboden bei der Mulchvariante trotz der nach wie vor verbliebenen Pflugsohle weniger unterbrochen als es für die Pflugsohle bei der Pflugvariante der Fall ist, die jährlich wiederkehrend weiter „stabilisiert“ wird.

Bei der Mulchvariante weisen die erzielten Ergebnisse (Abbildung 4-5, Abbildung 4-6, Abbildung 4-9) in der ehemaligen, aber noch verbliebenen Pflugsohle auf eine Regenerierung hin und führt zu einer gleichmäßigeren Tiefverlagerung der Drücke. Damit sind zwar die Spannungen tiefer im Unterboden wirksam und führen zu einer Erhöhung der Unterbodenverdichtung, wohingegen das Bodenprofil insgesamt etwas weniger intensiv kompensiert. Hierzu werden aber erst die Messergebnisse der mechanischen Stabilität im Vergleich mit den Spannungsmessungen Aufschluss ergeben. Wenn aber die Pflugsohle der Pflugvariante nicht stabil genug ist, um eine Überrollung mit

einer schweren Maschine aushalten zu können, wird eine starke Strukturänderung in der Pflugsohle hervorgerufen: es kann zu einem unkontrollierten Aufbrechen der Pflugsohle kommen, was zu einer instabilen Bodenmatrix führt und dadurch der Weg frei ist für eine starke Verdichtung im ganzen Bodenprofil (siehe Tabelle 4-5, Verhältnis der Hauptspannungen und OCTSS/MNS).

4.1.3 Regenwurmgängeaufnahme

Die Biomakroporen, die hauptsächlich durch die Aktivität von Regenwürmern (*Lumbricus terrestris*) entstammen, wurden bei den Probenahmeterminen November 2002 und 2003 in den für die Probenahme relevanten Tiefen auf horizontalen Bodenflächen aufgenommen.

In der Abbildung 4-11 sind die Flächenanteile der Regenwurmröhren zum Probenahmetermin November 2002 dargestellt. Die Anzahl an Regenwurmgingen ist bei den unbefahrenen Flächen im Oberboden der Pflugvariante geringer als bei der Mulchvariante ebenso wie eine Abnahme nach einer Befahrung durch Scher- und Kneteffekte deutlich zu erkennen ist. Als Anmerkung ist zu erwähnen, daß die Regenwurmgingeaufnahme in 12cm Tiefe bei der Pflugvariante im Bearbeitungshorizont und bei der Mulchvariante unterhalb des Bearbeitungshorizonts erfolgte. In tieferen Horizonten war der Flächenanteil der Regenwurmginge bei beiden Varianten höher als im Oberboden, wobei aber stets die Mulchvariante höhere Flächenanteile aufwies. Es scheint hierbei so, dass die Flächenanteile der Regenwurmginge nach einer Befahrung abgenommen haben.

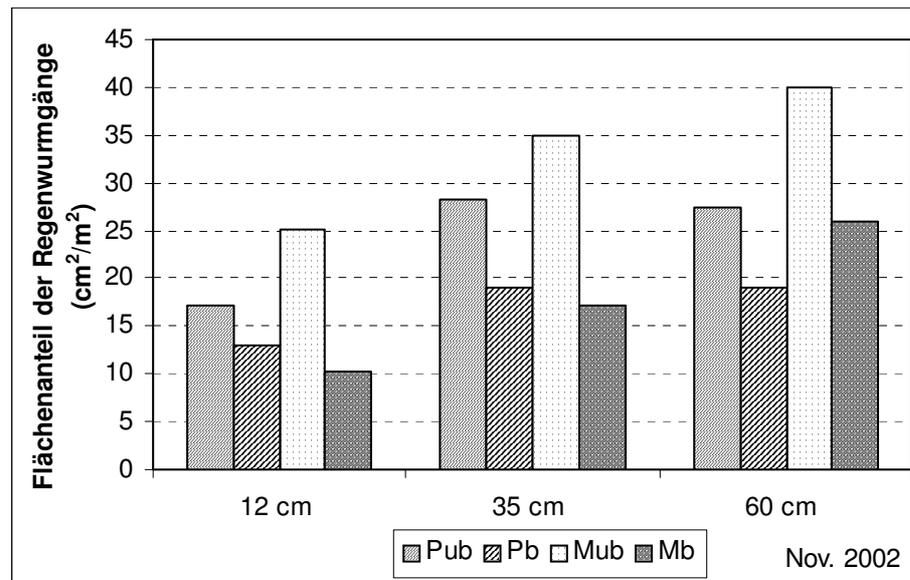


Abbildung 4-11 Flächenanteil der Biomakroporen bzw. Regenwurmgänge in drei Tiefen und unterschiedlichen Bearbeitungen im Nov. 2002

Die Regenwurmängeaufnahmen im November 2003 nach der Befahrung zeigen im Oberboden eine Abnahme der Flächenanteile der Regenwurmänge, wobei keine Unterschiede zwischen Pflug- und Mulchvariante festgestellt werden konnten (Abbildung 4-12). Nach einer Befahrung reduziert sich der Flächenanteil bei der Pflugvariante stärker, da bei der Mulchvariante die Flächenaufnahme wiederum unterhalb der Bearbeitungsvariante durchgeführt wurde, wo die Regenwurmröhren nicht so stark zerschert wurden wie es bei der Pflugvariante der Fall war. In tieferen Horizonten kann man keine Beziehung zwischen Bearbeitungssystemen und Befahrung feststellen. Daraus kann man ableiten, dass es in dieser Tiefe unmittelbar nach einer Befahrung zu keiner Zerstörung der Regenwurmänge gekommen ist.

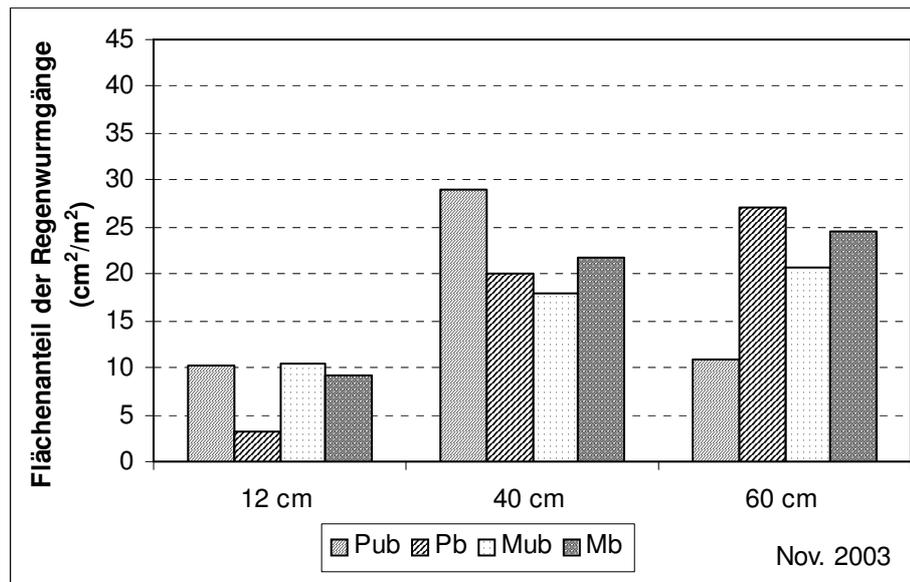


Abbildung 4-12 Flächenanteil der Biomakroporen bzw. Regenwurmgänge in drei Tiefen und unterschiedlichen Bearbeitungen im Nov. 2003

Auf dem Versuchsstandort wurde auch der vertikale Verlauf von Regenwurmängen visuell beobachtet, aber nicht aufgenommen. Abbildung 4-13 zeigt aber exemplarisch den Verlauf eines Regenwurmanges beim Erreichen der stark verdichteten Pflugsohle. Oberhalb und unterhalb der Pflugsohle verläuft der Regenwurmgang vertikal, während die Röhre unmittelbar vor der Pflugsohle, bei höherem Widerstand horizontal abknickt und dann tortuos die Pflugsohle durchdringt.

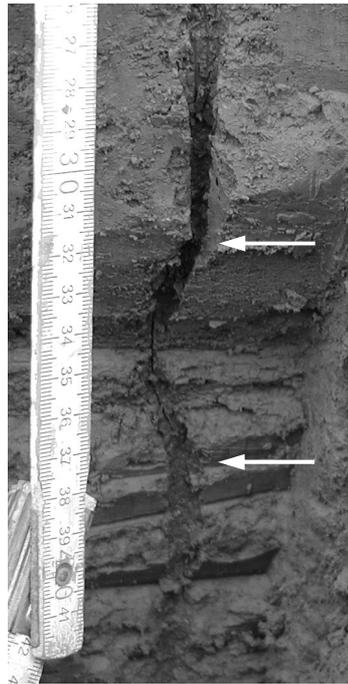


Abbildung 4-13 Richtungswechsel eines Regenwurmgangs in der Pflugsohle

4.1.4 Diskussion zum Thema Regenwurmgängeaufnahme

Mechanische Belastungen führen, wie z.B. Joschko et al. (1989) nachgewiesen haben, zu einer Abnahme der Flächenanteile der Regenwurmgänge. Im Nov. 2002 nahm der Regenwurmgebäudebestand unmittelbar nach einer Überrollung durch die Deformation im Boden ab, während im Nov. 2003 keine Effekte auftraten. Folglich kann ausschließlich postuliert werden, dass eine Überrollung besonders im Oberboden eine Auswirkung haben kann. Nach Ehrmann (1996) ist die Anzahl der Röhren von vielen Faktoren abhängig:

- je nach Regenwurmart kann die durchschnittliche tägliche Grableistung zwischen 2,7cm bis 6,9cm liegen
- Anzahl und Biomasse der Regenwürmer
- Regenwurmaktivität, die abhängig von Temperatur und Feuchte ist
- Dichte des Bodens

Joschko et al. (1989) fanden außerdem eine geringere Regenwurmängeproduktion bei verdichtetem Boden. Ähnliche Ergebnisse

haben Logsdon et al. (1992) beschrieben, als sie 7 Jahre später nach der Verdichtung eines Bodens die Regenwurmröhren aufgenommen haben; allerdings konnten sie nicht immer signifikante Unterschiede feststellen.

Wenn die Regenwürmer einen Gang bohren, müssen sie entweder den Boden seitlich komprimieren oder das Material wegfressen und nach oben ausscheiden. Bei größerem Widerstand –wie z.B. bei einer stark verdichteten Pflugsohle– sind die Möglichkeiten einer seitlichen Verdrängung geringer (vgl. Abbildung 4-13), da besonders diese Horizonte überverdichtet sind. Somit ändert sich auch die Spannungsverteilung und das seitliche Ausweichen kann auch über ein günstigeres Verhältnis zur vertikalen Komponente der Spannungsgleichung erklärt werden. Hier ändert sich die Richtung von vertikal zu horizontal so lange, bis der Widerstand überwunden ist. Ehlers et al. (2000) hat in seiner Arbeit die Aufmerksamkeit besonders auf die Regenwurmgeometrie gerichtet, die je nach Verdichtungsgrad des Bodens in horizontaler Richtung abknicken können. Hartge und Bohne (1983) haben gezeigt, dass horizontal liegende Gänge instabil sind, während die vertikale Ausrichtung der Gänge ein stabileres System zeigt. Ein horizontal liegender Gang (vgl. Abbildung 4-13) könnte also die stabile Bodenstruktur gefährden und dementsprechend würde sich der Verdichtungsgrad des Bodens ändern. Lee (1985) hat anhand mehrerer Untersuchungen gezeigt, dass im Unterboden trotz geringerer Aktivität von Regenwürmern mehr Röhren gefunden werden. Ehlers (1975) fand nach 4 Jahren Versuchsdauer im Oberboden mehr Röhren bei Direktsaat als bei konventioneller Bodenbearbeitung (Pflug), aber es waren kaum Unterschiede in 60cm Tiefe vorhanden, was mit zahlreichen alten Röhren erklärt wurde.

Bei der vorliegenden Arbeit ergaben sich Nov. 2002 im Oberboden bei der unbefahrenen Mulchvariante mehr Röhren, während dieser Unterschied im Nov. 2003 nicht mehr existierte. Dies weist auf eine zufällige flächenmäßige Verteilung der Regenwurmgänge hin.

Unabhängig von der Bewirtschaftung wurden nach einer Befahrung im Oberboden die Röhren stets verschmiert, wodurch auch die Anzahl an Röhren abnahm. Im Oberboden bei der Mulchvariante sind vermutlich die Röhren erst

nach 1991 entstanden, als das Bodenbearbeitungssystem umgestellt wurde. Bei der Pflugvariante sind die Röhren im Bearbeitungshorizont jünger, da sie in jedem Jahr durch die Bodenbearbeitung zerstört werden. In unteren Horizonten vermehrt sich der Flächenanteil der Regenwurmgänge -wie es auch in der oben genannten Literatur bemerkt wurde- und man kann unmittelbar nach einer Befahrung keine Unterschiede weder durch Bearbeitungssystem noch Belastung feststellen. Jedoch kann die Wegsamkeit der Röhren durch eine hohe Belastung zerstört werden (Ehlers et al., 2000). Aus den zahlreichen Regenwurmängen kann man auch keine Hinweise auf den Bodenstrukturzustand bzw. Degradierungsgrad des Bodens ableiten, da Ehrmann (1996) bewiesen hat, dass es aus der Anzahl der vorhandenen Röhren unmöglich ist, auf die Anzahl der Regenwürmer zu schließen, da ein Regenwurmengang auch mehrmals besiedelt wird.

4.2 Labormessungen

Vorbemerkungen:

Die Laborergebnisse aus den Feldproben werden stets in folgender Reihenfolge dargestellt: zu den jeweiligen Ergebnisteilen werden zuerst die Ergebnisse der Probenahmeterminen von November 2002 und November 2003 vorgestellt, gefolgt von April 2002. Bei den Herbstprobenahmeterminen erfolgte die Probenahme unmittelbar vor und nach der erst- und einmaligen Befahrung mit Holmer Terra Dos Köpfrödebunker, während die Probenahme im April 2002 nicht unmittelbar vor und nach der Befahrung erfolgte, sondern zwischen der erst- und einmaligen Befahrung und der Probenahme ca. ein halbes Jahr lag. Dementsprechend handelt es sich hier um eine andere Situation, weil das Probenahmefeld nach der Überrollung im Herbst 2001 mit Winterweizen bestellt wurde, d.h. es ist eine entsprechende Saatbettvorbereitung durchgeführt worden und bis zum Probenahmetermin April 2002 konnte der Winterweizen eine Durchwurzelung des Oberbodens erreichen. Die Herbstprobenahme erfolgte sowohl bei der Pflug- als auch bei der Mulchvariante in den Tiefen: 12cm (Oberboden), 35cm (Pflugsohlenbereich) und 60cm (Unterboden), wobei 12cm bei der Pflugvariante den Bearbeitungshorizont kennzeichnet, während bei der Mulchvariante in dieser Tiefe keine aktuellen Bearbeitungseffekte auftreten. Die Probenahme erfolgte im April 2002 in 5cm, 35cm und 60cm Tiefe.

4.2.1 Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung

Die Lagerungsdichten sind bei den unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten und Tiefen aus allen drei Probenahmeterminen in Tabelle 4-6 dargestellt. Die Lagerungsdichtewerte werden nach der Einstufung mit der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Bodenkunde, 1994) als mittel eingestuft. Die Werte bleiben in den Bodenprofilen annähernd konstant, signifikante Unterschiede wurden nicht gefunden. Als Anmerkung zur Lagerungsdichtebestimmung ist zu ergänzen, dass es sich hierbei um einen stark mit Biomakroporen durchsetzten Boden handelt.

Bei den Probenahmen Nov. 2002 und 2003 kann man im Oberboden eine Lagerungsdichteerhöhung unmittelbar nach einer Befahrung erkennen. Bei dem Probenahmetermin April 2002 weisen die Werte im Oberboden der Mulchvariante eine kleinere Lagerungsdichte auf, die wahrscheinlich mit einer Auflockerung durch Durchwurzelung erklärt werden kann. Bei dieser Probenahme stand Winterweizen auf dem Versuchsfeld (siehe Vorbemerkungen).

Unterhalb der Pflugsohle kann man keine tendenziellen Unterschiede zwischen den Varianten feststellen. Beim Vergleich der Herbst (Nov. 2002 und 2003) und Frühjahr (April 2002) Probenahmen kommt deutlich heraus, dass ein halbes Jahr nach Überrollung nicht ausreicht für eine Regeneration in der stark verdichteten Pflugsohle auf die ursprünglichen Werte.

Im Unterboden herrschen ähnliche Verhältnisse wie unterhalb der Pflugsohle. Unterschiede zwischen Bearbeitungsvarianten konnten nicht festgestellt werden. Nur die mit Holmer Terra Dos befahrene Mulchvariante der Probenahme April 2002 weist eine signifikante Erhöhung in 60cm Tiefe im Vergleich zu 12cm auf (Anhang 5).

Tabelle 4-6 Lagerungsdichte bei allen Probenahmeterminen (St.Zyl.: 100cm³)

Tiefe [cm]/ Variante	Lagerungsdichte [g/cm ³]		
	Nov. 2002	Nov. 2003	Apr. 2002
12-16 Pub (im April: Pb 5-9) Mub Mb	1,52	1,54	1,43
	1,55	1,56	1,47
	1,51	1,55	1,52
	1,55	1,56	1,44
35-39 Pub Pb Mub Mb	1,50	1,50	1,50
	1,55	1,51	1,49
	1,47	1,52	1,52
	1,50	1,53	1,48
60-64 Pub Pb Mub Mb	1,55	1,54	1,53
	1,55	1,56	1,45
	1,46	1,53	1,53
	1,51	1,56	1,54

Die Aggregatlagerungsdichte wurde aus dem Probenahmetermin Nov. 2003 an zwei Feldwiederholungen bestimmt und ist in der Abbildung 4-14 dargestellt.

Hieraus ergibt sich, dass die Aggregatlagerungsdichte im Vergleich zu den Stechzylinderproben deutlich höhere Werte aufweist, obwohl auf Grund der Sensibilität der Bestimmung der Aggregatgröße die Streuung sehr groß ist. Zur Bestimmung der Aggregatlagerungsdichte war die Größe der Aggregate untereinander vergleichbar, es wurden annähernd gleich große Aggregate von ca. 2-3cm³ benutzt, um die Streuung zu reduzieren. Die Tendenz zeigt, dass die Mulchvariante kleinere Aggregatlagerungsdichten aufweist als die Pflugvariante. Dies kann statistisch aber nicht belegt werden (Anhang 6).

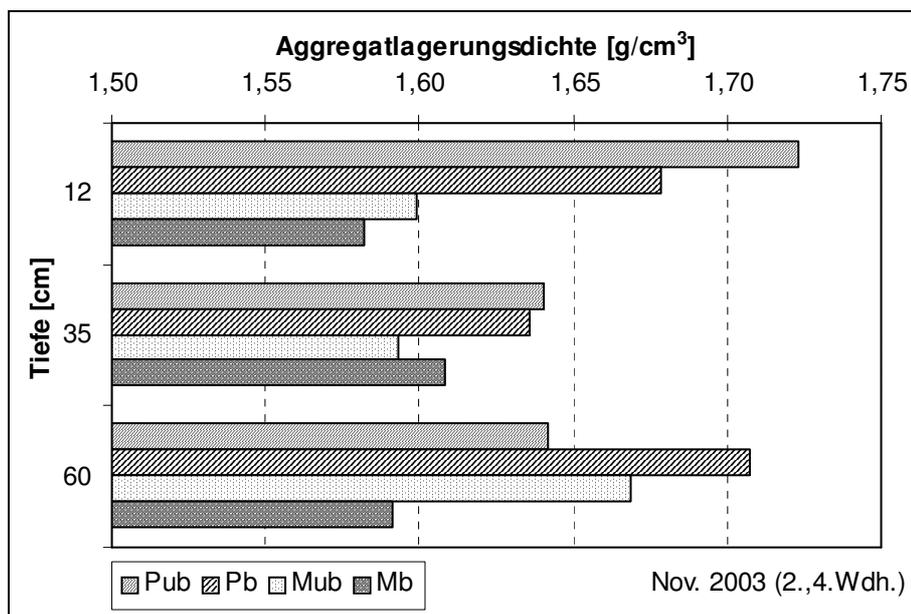


Abbildung 4-14 Aggregatlagerungsdichte im Nov. 2003 (2. und 4. Feldwiederholung)

Zwischen Aggregatlagerungsdichte und Lagerungsdichte bei ungestörten Stechzylinderproben kann auf Grund der vielen Biomakroporen keine Korrelation berechnet werden (Abbildung 4-15).

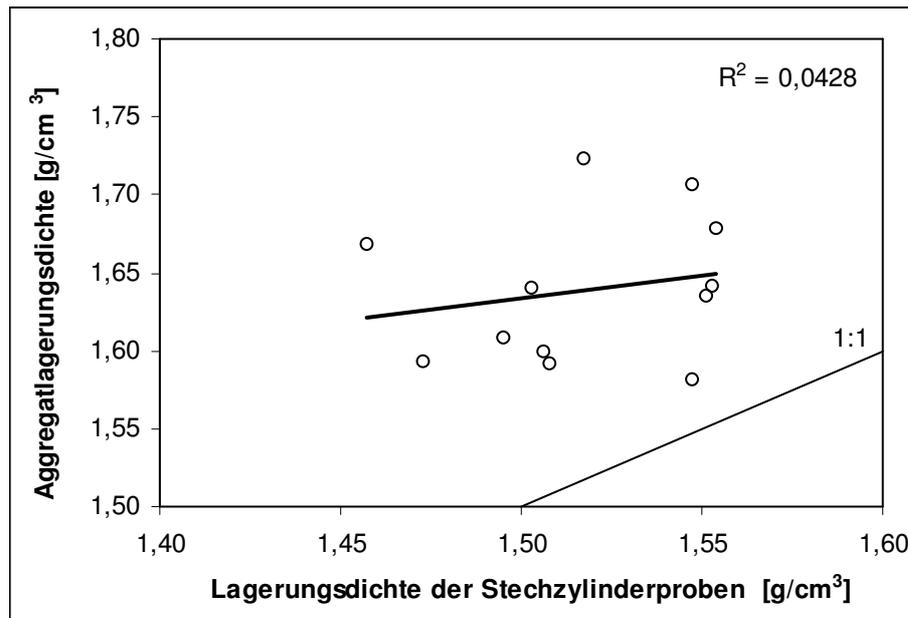


Abbildung 4-15 Zusammenhang zwischen Aggregatlagerungsdichte und Lagerungsdichte von ungestörten Proben (2. und 4. Feldwiederholung, im Nov. 2003)

Die Ableitung der Porengrößenverteilung erfolgte anhand der pF-Kurve. Bei den Herbstprobenahmen nimmt das Gesamtporenvolumen bei allen Bodenprofilen und Varianten Werte zwischen 40-44Vol% an (Anhang 7); im April 2002 ergaben sich größere Werte nur im Oberboden, was mit einer Durchwurzelung zu erklären ist.

Um zwei wichtige Porenanteile des Gesamtporenraumes besser darzustellen, sind in der Abbildung 4-16, die Luftkapazität und die nutzbare Feldkapazität dargestellt. Außerdem ist die detaillierte Porenraumverteilung in den Gesamtproben im Anhang 7 und die Porenverteilung im Gesamtporenraum im Anhang 8 zusammengefasst. Bei den Herbstprobenahmen (Nov. 2002 und 2003) kann man unmittelbar nach der Befahrung eine Tendenz im Oberboden auf Porenverlust sowohl bei der Pflug- als auch bei der Mulchvariante erkennen. Dieser Porenraumverlust zeigt sich am deutlichsten beim luftgefüllten Porenraum (LK), während die nutzbare Feldkapazität (nFK) nur geringfügig zunimmt. Im Pflugsohlenbereich ist stets der luftgefüllte Porenraum bei den unbefahrenen Flächen beider Varianten größer als bei den befahrenen Flächen, was sich auch in einer Abnahme der nutzbaren Feldkapazität widerspiegelt. Im Unterboden sinkt die Luftkapazität, während die nutzbare Feldkapazität im Vergleich zum Pflugsohlenbereich zunimmt.

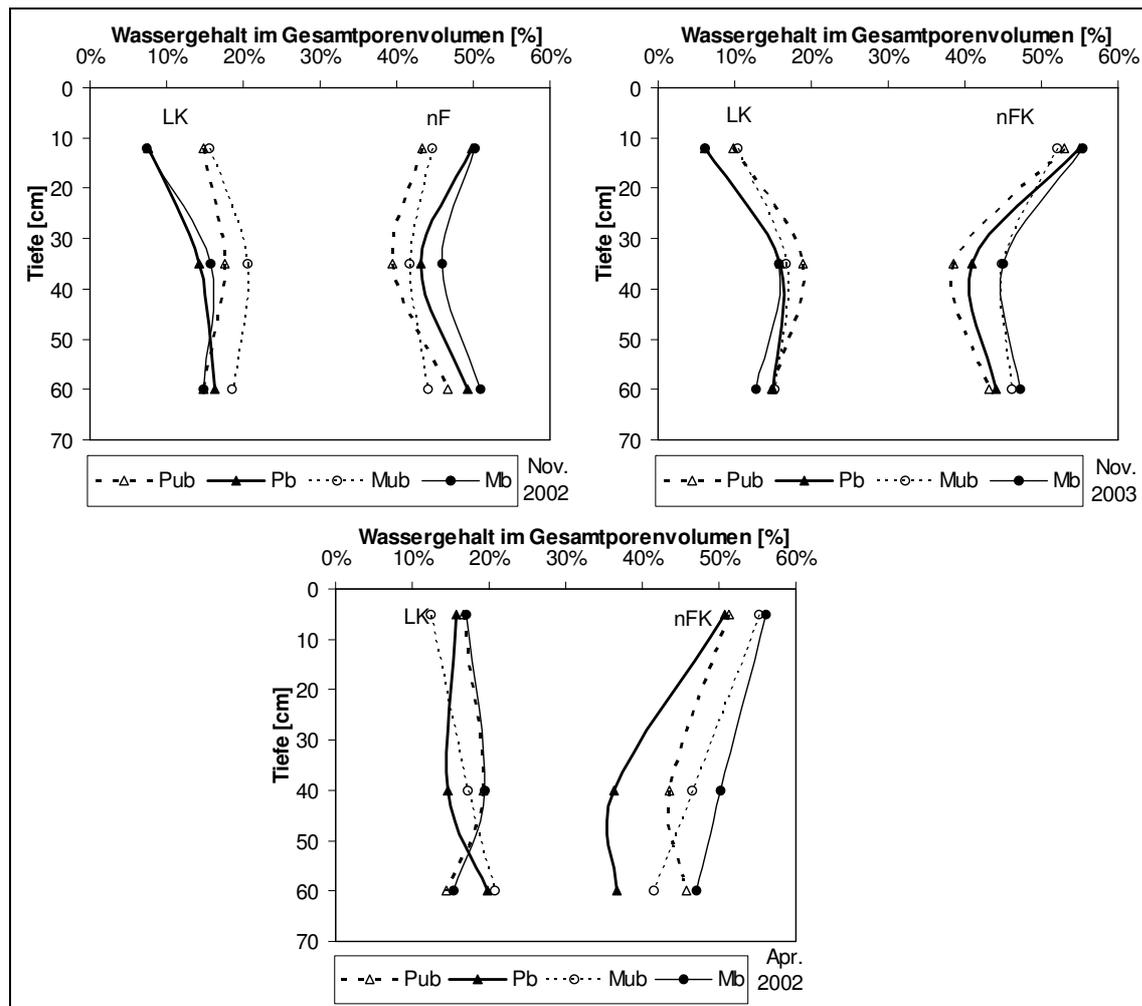


Abbildung 4-16 Luftkapazität und nutzbare Feldkapazität bei allen Probenahmeterminen (St. Zyl.: 100cm^3)

Bei dem Probenahmetermin April 2002, wo der Boden durchwurzelt war, kann man im Oberboden die Auswirkung einer Befahrung auf den Gesamtporenraum nicht mehr erkennen (Abbildung 4-16, Anhang 7, Anhang 8). Auch im Pflugsohlenbereich und im Unterboden kann man keine signifikanten Unterschiede erkennen. Es lässt sich lediglich feststellen, dass im gesamten Bodenprofil die nutzbare Feldkapazität bei der befahrenen Pflugvariante im Vergleich zu Pflug unbefahren gleichmäßig geringere Werte aufweist. Bei der befahrenen Mulchvariante ist der Wert der Luftkapazität stets größer als derjenige in der Variante Mulch unbefahren. Signifikante Unterschiede bei den Feldwiederholungen der Mulchvariante gibt es jedoch nicht.

Generell gilt, dass zwischen den jeweiligen Varianten nur Tendenzen abgeleitet werden können, statistisch abgesicherte Unterschiede sind lediglich innerhalb

einer Variante in unterschiedlichen Tiefen vorhanden. Diese Unterschiede lassen sich damit begründen, dass eine Strukturänderung je nach Bearbeitungs- und Befahrungsvariante erfolgt.

4.2.2 Diskussion zum Thema Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung

In der vorliegenden Arbeit zeigt die Lagerungsdichte im Bodenprofil ein einheitliches Bild, wobei man nur schwache Tendenzen auf die Erhöhung der Lagerungsdichte durch eine Befahrung ableiten kann. Bei einer hohen Ausgangslagerungsdichte wird eine mechanische Belastung nur geringfügige Änderungen induzieren, während ein lockerer Boden mit niedriger Lagerungsdichte stärker auf eine Belastung reagiert. Zahlreiche Literatur (Alakukku, 1997; Douglas et al., 1986; Logsdon et al., 1999, Farkas et al. 2000) berichten für verschiedene Standorte und Böden im Bearbeitungshorizont über eine niedrigere und in tieferen Bereichen, insbesondere bei der Pflugsohle über eine erhöhte Lagerungsdichte (Alakukku, 1997; Hammel, 1994). Nach einer Überfahrt mit schweren Maschinen können jedoch durch diese intensive Deformation selbst die starren Platten kollabieren und durch Tieferlegung im Verlauf dieser hohen Belastung entsprechend partiell lockerer werden.

Nach Hartge und Horn (1999) führt jede Bodenbearbeitung je nach Umgebungsbedingung zu einer künstlichen Heterogenisierung des Gefüges. Im Oberboden werden gröbere Brocken geschaffen, was ein künstlich höheres Grobporensystem entstehen lässt. Unterhalb des Bearbeitungshorizontes wird der Boden gleichzeitig auch verdichtet.

Trotzdem ist der Vergleich der Lagerungsdichte zwischen den verschiedenen Varianten allein nicht ausreichend zur Beurteilung des Verdichtungszustandes des Bodens (Hartge und Horn, 1999). Die Verdichtungsempfindlichkeit ist von weiteren Faktoren, wie z.B. Vorbelastung, Wassergehalt, organische Substanz und Aggregation abhängig (Horn, 1986). Deswegen hat Hartge (1986) eine Beurteilung des Verdichtungszustandes eines Bodens im Vergleich zur Normalverdichtung vorgeschlagen. Als Normalverdichtung wird dabei eine

Lagerung definiert, bei der der Boden noch nie einer höheren Last ausgesetzt war als seinem Eigengewicht entspricht (Hartge und Horn, 1999).

Aufgrund der Vorgeschichte des Versuchsfeldes Harste –die gesamte Fläche wurde bis 1991 gleichmäßig gepflügt und erst danach wurde ein Teil des Feldes von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung umgestellt-, werden bis heute die herkömmlichen Land- und Erntemaschinen auch nach der Umstellung auf Mulchsaat bei beiden Bodenbearbeitungssystemen eingesetzt. So kann man den Überlagerungsdruck, d.h. den Normalverdichtungszustand dieses Bodens in 60cm Tiefe mit annähernd 10kPa berechnen, der nach oben hin gleichmäßig abnimmt.

Mit erhöhtem Makroporenanteil verkleinert sich das auf eine Volumeneinheit bezogene Bodengewicht. Berücksichtigt man nicht die aktuell vorliegenden Regenwurmgänge in den Stichproben, würde die Lagerungsdichte ca. 1,6-1,7g/cm³ ergeben, wie es dem geschätzten Wert auf dem Versuchsfeld nahe kommt. Hierauf weisen auch die extrapolierten Regressionslinien in Abbildung 4-17 hin. Einen Rückschluss auf Bearbeitungseffekte geben diese Ergebnisse aber nicht. Die gemessene einzelne Aggregatlagerungsdichte lag in den untersuchten Profilen stets höher als die gemessene Lagerungsdichte aus den ungestörten Stechzylinderproben, was in einer Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Horn (1981) steht.

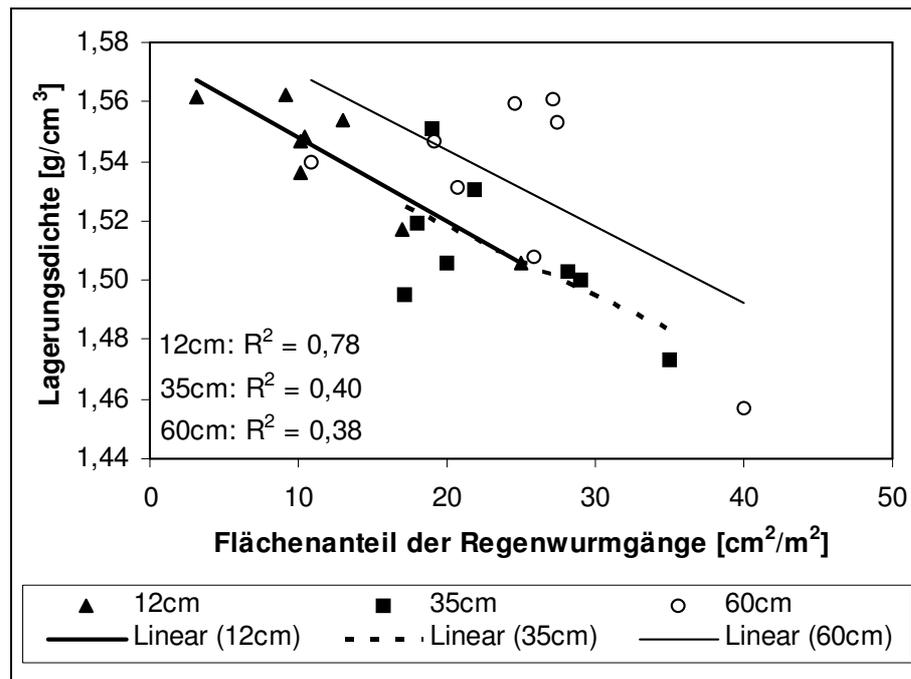


Abbildung 4-17 Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Flächenanteil der Regenwurmgänge (im Nov. 2002 und 2003)

Eine Änderung der Lagerungsdichte (Tabelle 4-6) und damit eine Änderung der Aggregate (Abbildung 4-14) resultiert in unterschiedlichen Interaggregatporenvolumina. Ebenso wie im Pflugsohlenbereich der Pflugvariante nimmt das Interaggregatporenvolumen deutlich ab, während es im Unterboden entgegengesetzt zunimmt. Dahingegen ist die Abnahme bei der Mulchvariante in den ersten beiden Tiefen weniger deutlich ausgeprägt, während die eine mehr als 50% Halbierung im Unterboden nach sich zieht. Die größeren Werte bei der Pflugvariante im Unterboden können auf das Zerbrechen der Platten zurückgeführt werden (Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7 Interaggregatporenvolumina im November 2003

Tiefe [cm]/ Variante		PV _{interaggr.} [%]
12-16	Pub	12,0
	Pb	7,4
	Mub	5,8
	Mb	2,2
35-39	Pub	8,4
	Pb	5,2
	Mub	7,5
	Mb	7,0
60-64	Pub	5,4
	Pb	9,4
	Mub	12,7
	Mb	5,2

Die Lagerungsdichte beeinflusst auch den Porenraum im Boden. In dem bearbeiteten Bodenhorizont ist durch eine regelmäßige Auflockerung kaum eine Aggregation möglich, was dazu führt, dass der durch eine Bearbeitung geschaffene Grobporenanteil in sich selbst instabil ist und schnell kollabiert. Dieses wird in der Abnahme des luftgefüllten Porenraumes nach einer Befahrung (vgl. Abbildung 4-16) deutlich. Hierbei wurden die Poren zusammengedrückt bzw. umverteilt. In unteren Bodenhorizonten hat eine Befahrung weniger Auswirkung auf Grund des geringeren Porenanteils und der starken Aggregation (Plattengefüge). Unterhalb der Pflugsohle und im Unterboden ist bei den beiden Bearbeitungsvarianten eine daher als bereits alt einzustufende stark verdichtete, ausgeprägte Plattenstruktur vorhanden; deswegen ändert sich der Porenanteil im Vergleich zum Oberboden auch nur geringfügig.

Die große Streuung der Porenvolumina (vgl. Anhang 8) verhindert einerseits eine statistisch abgesicherte Analyse einer Befahrung bzw. Bodenbearbeitung, andererseits könnte man daraus auch eine Bodenhomogenität ableiten, was in diesem Fall als negativ anzusehen wäre (tiefwirkende Bodenverdichtung). Van Ouwkerk und Boone (1970) (zitiert in Ehlers, 1973) haben bei einem Tonboden mit sinkenden Gesamtporenvolumen eine abnehmende Streuung gefunden, die mit einer Homogenität des Bodens erklärt wurde. Damit haben

sie gezeigt, dass beim Verdichten des Bodens die vorher bereits verdichteten Teile kaum weiter verdichtet wurden, sondern dass die sehr lockeren Gefügebereiche lediglich verschwanden. Ehlers (1973) hat eine ähnliche Untersuchung an einem Lössstandort durchgeführt, wo er festgestellt hat, dass die Homogenität mit abnehmendem Gesamtporenvolumen nicht zunimmt. Zudem ist es wahrscheinlich, dass durch eine vorhandene Regenwurmaktivität eine Zunahme der Gefügehomo­genität nicht erreicht wird. Dieses ist identisch mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit (siehe Abbildung 4-18), da alle Varianten und Tiefen keine Beziehung zwischen unbefahrenen und befahrenen Flächen zeigen. Die Homogenität oder Heterogenität eines Bodens kann also nicht ausschließlich aus der Streuung des Gesamtporenvolumens abgeleitet werden.

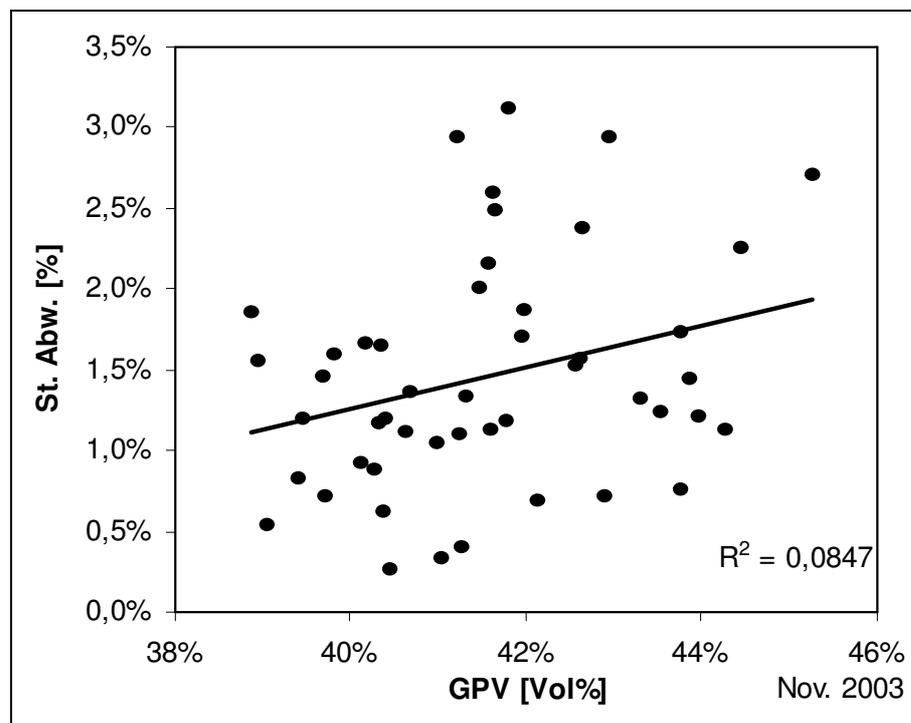


Abbildung 4-18 Mittelwerte von jeweils 6 Stechzylindern der Gesamtporenvolumina (GPV) der jeweiligen Varianten und deren Standardabweichung (St. Zyl.: 100cm³)

4.2.3 Luftleitfähigkeit

Im Anhang 9 sind die Luftleitfähigkeitswerte bei -60hPa Entwässerungsstufe dargestellt. Wegen des hohen Biomakroporenanteils, die hauptsächlich durch

Regenwürmer verursacht wurden, streuen die Werte sehr. Deswegen ist es bei den vertikal entnommenen Proben nicht möglich, konkrete Aussagen über die bewirtschaftungsbedingte Änderung der Luftleitfähigkeit zu machen.

Da die an den Stechzylinderproben gemessenen Luftleitfähigkeitswerte durch die Existenz und Kontinuität der Biomakroporen beeinflusst sind, wurden Koeffizienten zwischen vor und nach unterschiedlichen einaxialen statischen Auflaststufen gebildet, die in der Abbildung 4-19 als Beispiel aus dem Probenahmetermin Nov. 2003 dargestellt sind. Der Koeffizient 1 bedeutet identische Werte vor und nach der Belastung, Werte kleiner als 1 bedeuten kleinere Werte nach Belastung. Anzumerken ist, dass unterschiedliche Stechzylinderproben mit unterschiedlichem zufälligen Biomakroporenanteil zur Bestimmung der Luftleitfähigkeit bei unterschiedlichen Auflaststufen benutzt wurden.

Man erkennt, dass bei einer Belastung von 20kPa keine Änderungen auftreten. Mit Zunahme der Auflast wird der Unterschied immer größer. Da aber viele Regenwurmgänge vorhanden sind und außerdem bei dieser Untersuchung einzelne Stechzylinder verwendet wurden, kann man bei der statistischen Analyse keine Aussagen über die Porenfunktionen im Zusammenhang mit den Bearbeitungs- und Befahrungsvarianten machen. Die Grafiken zeigen lediglich, dass die Leitfähigkeiten trotz hohem Bioporenanteil mit zunehmender Auflast abnehmen.

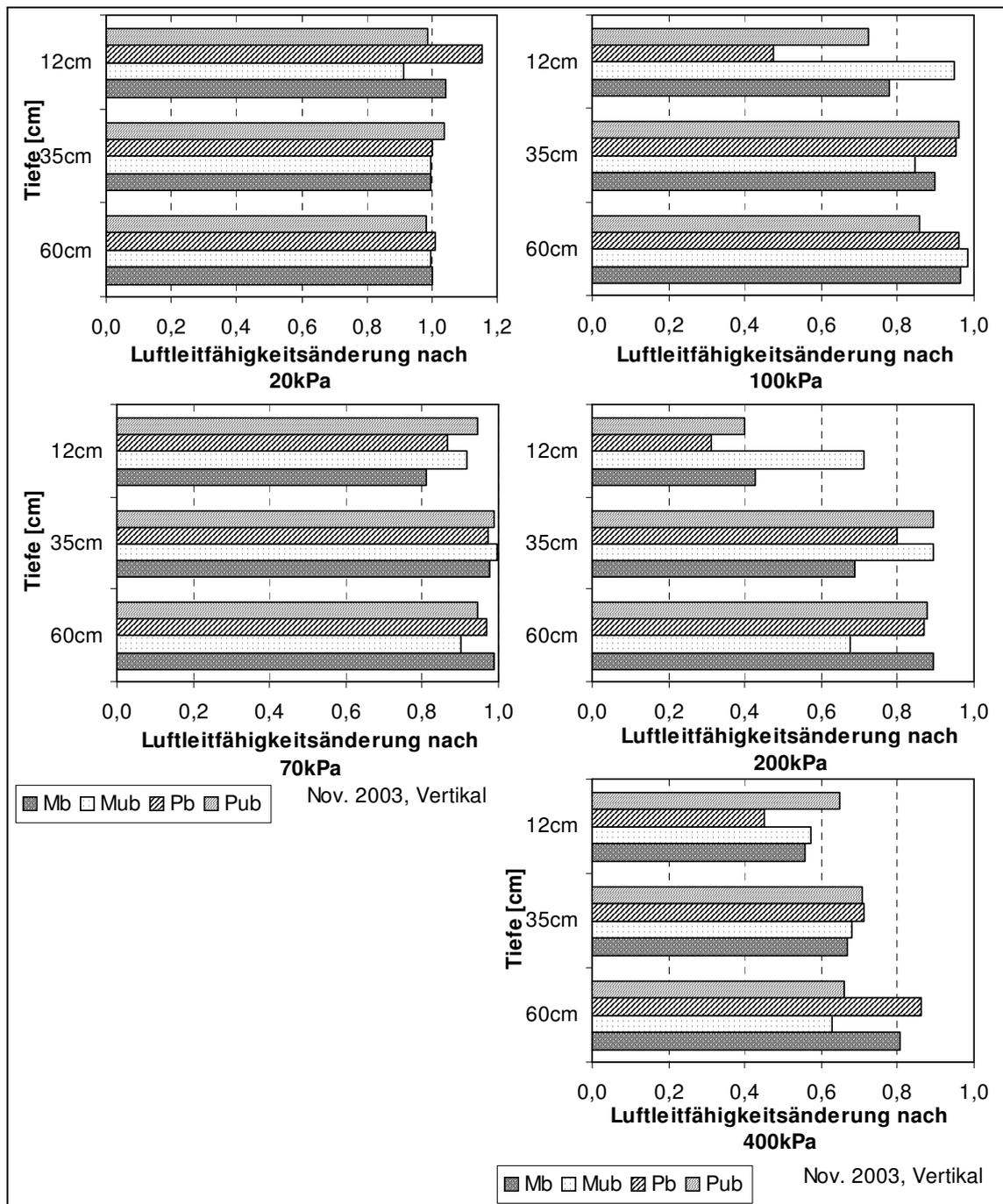


Abbildung 4-19 Luftleitfähigkeitsquotient (nach/vor Belastung) nach unterschiedlichen Auflasten bei allen Varianten und Tiefen, berechnet aus kl [$\log \text{ cm/d}$] (St.Zyl: 236 cm^3) im Nov. 2003

Bei einem hohen Biomakroporenanteil scheint die Luftleitfähigkeit als limitierende Größe für den Gasaustausch von horizontal entnommenen Proben aussagekräftiger zu sein. Daher erfolgte eine horizontale Probenahme im November 2003. Die Abbildung 4-20 zeigt den Zusammenhang der Luftleitfähigkeit zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben. Da der

vertikale Biomakroporenanteil sehr stark ausgeprägt ist, gibt es keine Beziehung zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben.

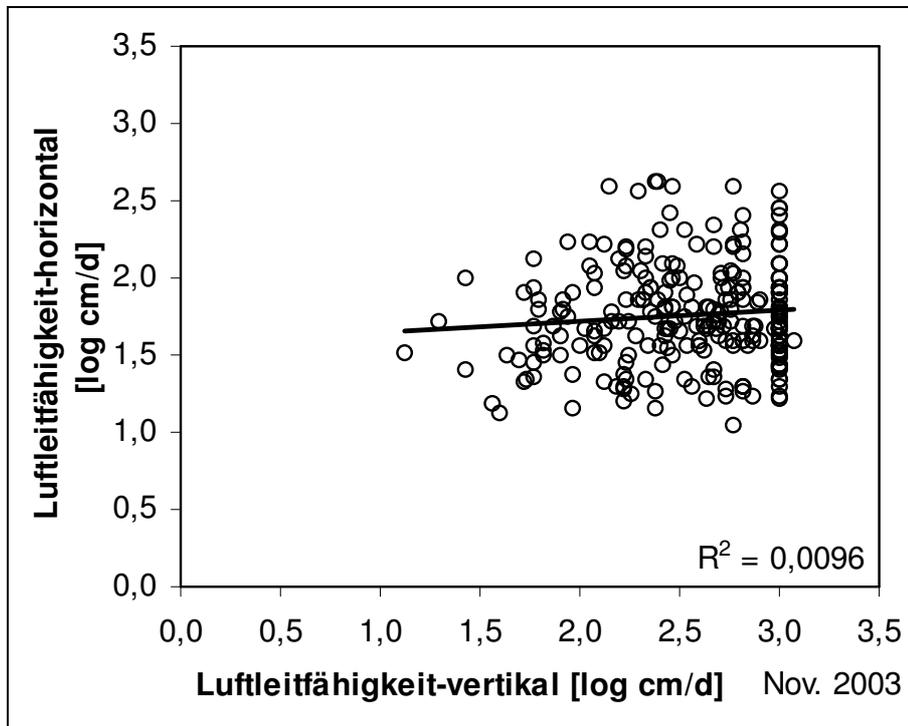


Abbildung 4-20 Zusammenhang zwischen der Luftleitfähigkeit vertikal und horizontal entnommener Proben (St.Zyl.: 236cm³), im Nov. 2003

Der Luftleitfähigkeitskoeffizient an horizontal entnommenen Proben nach und vor den unterschiedlichen Auflaststufen bei unterschiedlichen Tiefen zeigt einen mit zunehmender Auflast kleiner werdenden Koeffizienten (Abbildung 4-21). Signifikante Unterschiede konnten innerhalb einer Tiefe und einer Auflaststufe zwischen den Bearbeitungsvarianten nicht gefunden werden (vgl. Anhang 10). Signifikante Unterschiede sind jedoch innerhalb einer Tiefe und einer Behandlung zwischen den unterschiedlichen Auflasten vorhanden. Da die Abnahme nicht gleichmäßig erfolgt, kann davon ausgegangen werden, dass bei überproportionaler Abnahme (im Vergleich zum vorherigen Wert) auch eine deutliche Porenfunktionsreduktion auftritt, was wiederum dokumentiert, dass die aktuelle Auflaststufe nahe an dem Vorbelastungswert liegt (vgl. Abbildung 4-28).

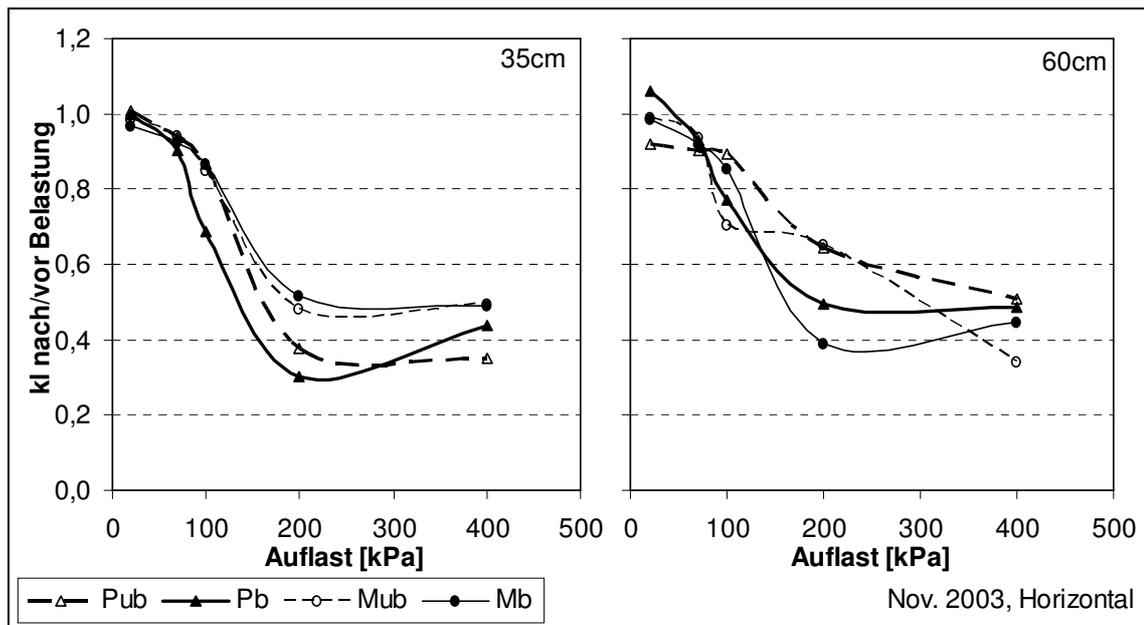


Abbildung 4-21 Koeffizient der Luftleitfähigkeit an horizontal entnommenen Proben in zwei Tiefen nach unterschiedlichen Auflasten (jeder Kurvenpunkt stellt eine einzelne Probe dar), berechnet aus kl [$\log \text{ cm/d}$] (St.Zyl.: 236 cm^3), im Nov. 2003

Der Luftleitfähigkeitskoeffizient ist bei 20 und 70kPa Belastung in beiden Tiefen und Behandlungs- und Bearbeitungsvarianten statistisch gesehen gleich (vgl. Anhang 10). Ab 100kPa Auflast steigen die Koeffizientunterschiede an und die Böden reagieren nun gleichmäßig auf eine Lastzunahme, somit müssen Drücke die größer als 200kPa sind, als auf jeden Fall zu hoch eingestuft werden. Dies bedeutet, dass Auflasten ab 200kPa für den Boden zu hoch sind, um die Porenfunktionen zu erhalten. Eine genauere Einschätzung der kritischen Auflasten kann nicht gegeben werden, da zwischen 70kPa und 200kPa nur eine weitere Laststufe (100kPa) gewählt worden war und für jede Laststufe eine einzige Stechzylinderprobe je Feldwiederholung belastet wurde und somit die Heterogenität hoch ist.

4.2.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Im Anhang 11 sind die detaillierten Ergebnisse der gesättigten Wasserleitfähigkeit aller Probenahmeterminen und deren statistische Auswertung der vertikal und horizontal entnommenen Proben dargestellt.

Exemplarisch wird hier die gesättigte Wasserleitfähigkeit von Nov. 2003 beschrieben.

Bei der Probenahme im November 2003 wurden zur Bestimmung der gemessenen gesättigten Wasserleitfähigkeit die in beiden Richtungen (vertikal und horizontal) entnommenen Proben berücksichtigt, deren Beziehung in Abbildung 4-22 zusammengefasst ist. Bei den horizontalen Proben wurden zwischen den Varianten in den beiden Tiefen keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Die gemessene gesättigte Wasserleitfähigkeit zeigt eine ähnlich beziehungslose Datenwolke zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben wie die Luftleitfähigkeit. Der Grund dafür ist wiederum der hohe Biomakroporenanteil, der sich bei den vertikalen Proben erheblich bemerkbar macht und damit sehr entscheidend für die Funktionalität des Standortes trotz Belastung zu sein scheint.

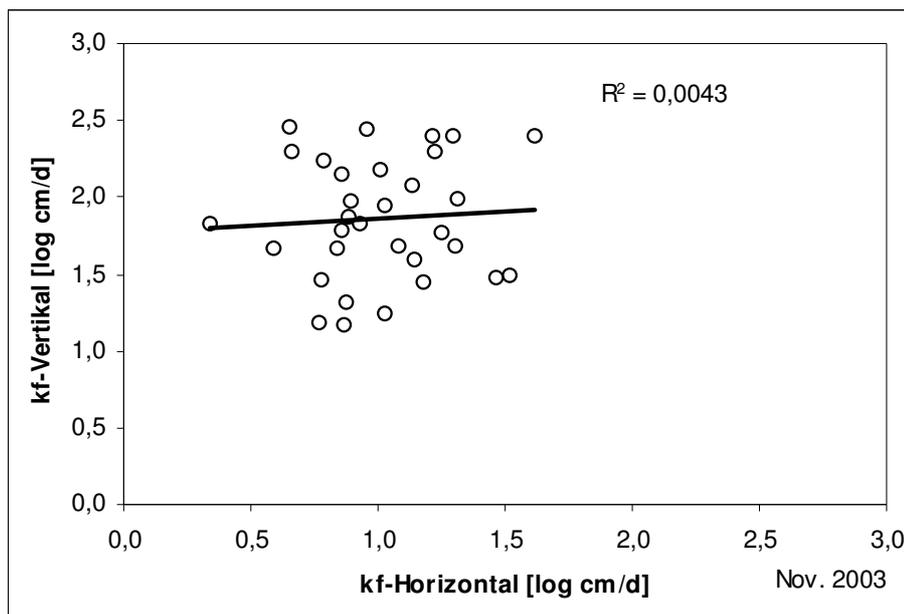


Abbildung 4-22 Zusammenhang der gemessenen gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) zwischen vertikal und horizontal entnommenen Stechzylinderproben (St.Zyl.: 100cm³), im Nov. 2003

Die Koeffizienten zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben sind sowohl bei gesättigter Wasserleitfähigkeit als auch Luftleitfähigkeit aus den gleichen Stechzylindern der jeweiligen Probenahmerichtung an der Abbildung

4-23 dargestellt. Hierbei kann man sehen, dass die Koeffizienten bei Wasserleitfähigkeit kleiner sind als bei Luftleitfähigkeit. Je kleiner der Koeffizient ist, desto höher ist die Anisotropie im Boden, die die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften im Boden beschreibt. Auf Grund der großen Streuung bei der Luft- als auch bei der Wasserleitfähigkeit, die hauptsächlich durch den hohen Biomakroporenanteil begründet ist, ist es allerdings nicht möglich, einen Effekt der Bodenbearbeitung und Befahrung abzuleiten. Trotzdem kann man eine Tendenz auf stärker ausgeprägte Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit, besonders bei der befahrenen Pflugvariante in 60cm Tiefe, erkennen.

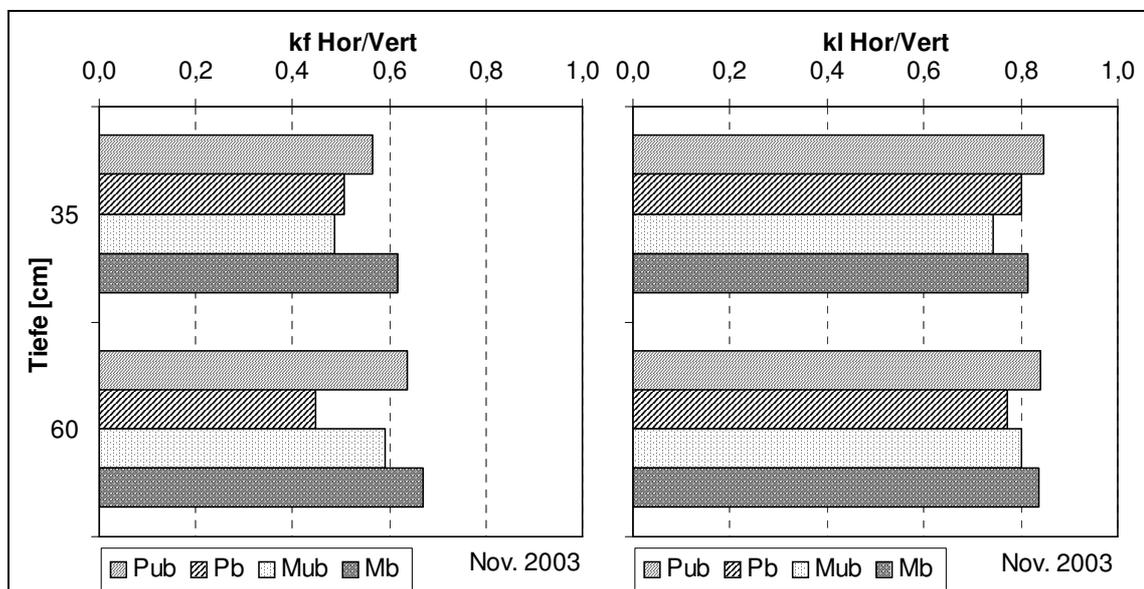


Abbildung 4-23 Koeffizient zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben bei gemessener Wasser- (kf) und Luftleitfähigkeit (kl) berechnet aus $\log \text{ cm/d}$ (St. Zyl: 100cm^3), im Nov. 2003

Da die gesättigte Wasserleitfähigkeit durch einen großen Anteil von Biomakroporen eine hohe Streuung aufweist –ähnlich zur Luftleitfähigkeit– und es damit schwierig ist, die Porenfunktionen zu beurteilen, wurde sie neben der Messung zusätzlich auch aus den Gleichungen von van Genuchten (1980) und Schaap und Leij (1998) geschätzt.

Das Ziel war es, die Auswirkung der Biomakroporen auf Leitfähigkeit auszuschließen um damit Porenfunktionsänderungen durch Belastung und Befahrung besser ableiten zu können. Zum modellmäßigen Schätzverfahren

der gesättigten Wasserleitfähigkeit wurde die Software Rosetta (Schaap und Leij, 1998) verwendet. Das Modell berücksichtigt hierbei die Lagerungsdichte und den volumetrischen Wassergehalt bei -300hPa Wasserspannung. Da die Lagerungsdichte stark von Regenwurmröhren beeinflusst ist (vgl. 4.2.1), ergeben sich niedrigere Lagerungsdichten und man kann annehmen, dass das Modell die gesättigte Wasserleitfähigkeit somit überschätzt. Trotzdem zeigen die geschätzten Werte tendenziell ein deutlicheres Bild zur Beurteilung der Bearbeitungssysteme als die gemessenen Werte (Anhang 11).

Bei den geschätzten Werten der gesättigten Wasserleitfähigkeit aus den Herbstprobenahmen ist eine Abnahme im Oberboden nach einer Befahrung bei den beiden Varianten zu sehen (Abbildung 4-24, Anhang 11). Im Pflugsohlenbereich ist bei der Pflug- und Mulchvariante eine geringfügige tendenzielle Abnahme nach einer Befahrung zu erkennen. Im Unterboden ändert sich bei der Pflugvariante die gesättigte Wasserleitfähigkeit nach einer Befahrung geringfügig, während sie bei der Mulchvariante nach einer Befahrung deutlich abnimmt. Bei der geschätzten gesättigten Wasserleitfähigkeit aus April 2002, die im Anhang 11 dargestellt ist, ist sie wegen einer Durchwurzelung im Oberboden bei allen Varianten ähnlich. In den tieferen Horizonten verläuft die geschätzte gesättigte Wasserleitfähigkeit ähnlich wie bei den Werten der Herbstprobenahmeterminen.

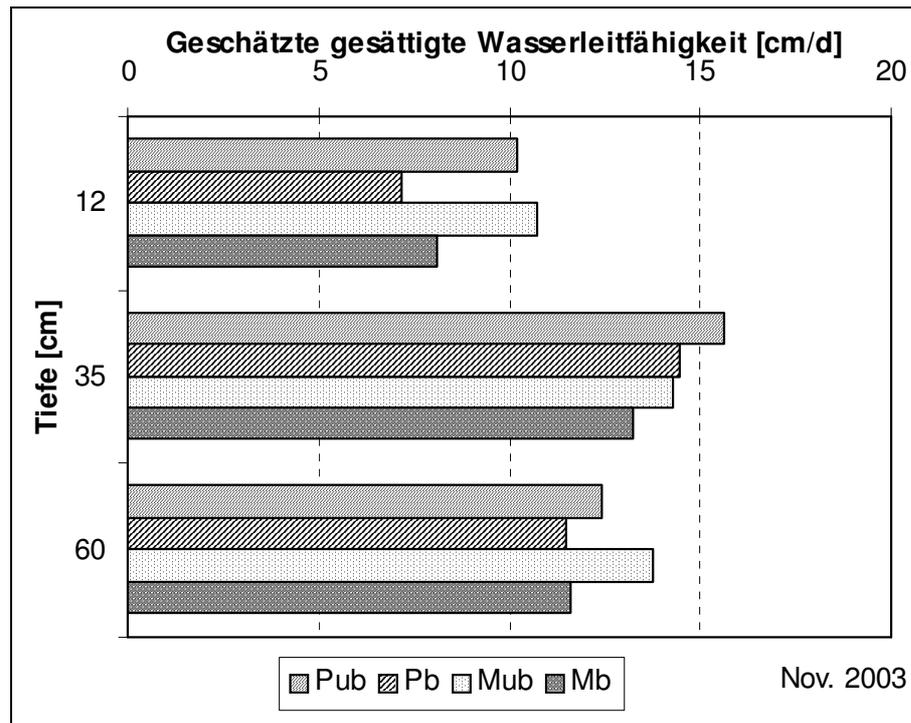


Abbildung 4-24 Geschätzte gesättigte Wasserleitfähigkeit im Nov. 2003 (nach Schaap und Leij, 1998)

4.2.4.1 Zusammenhang zwischen Permeabilität bei Luft und Wasser im Boden

Zum Probenahmetermin November 2003 wurde an denselben Stechzylindern (100cm^3) bei -60hPa Entwässerungsstufe die Luftleitfähigkeit (k_l) und anschließend nach der erneuten Aufsättigung auch die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) bei vertikal und bei horizontal entnommenen Proben gemessen. Damit war es möglich, die tatsächliche Beziehung zwischen k_l und k_f zu untersuchen. Da Luft und Wasser unterschiedliches Fließverhalten haben, wurden die Leitfähigkeitswerte, unter Berücksichtigung der Viskosität, in die von den Eigenschaften des Perkolationsmediums unabhängige Form, umgerechnet. Damit konnten die Messwerte miteinander verglichen werden.

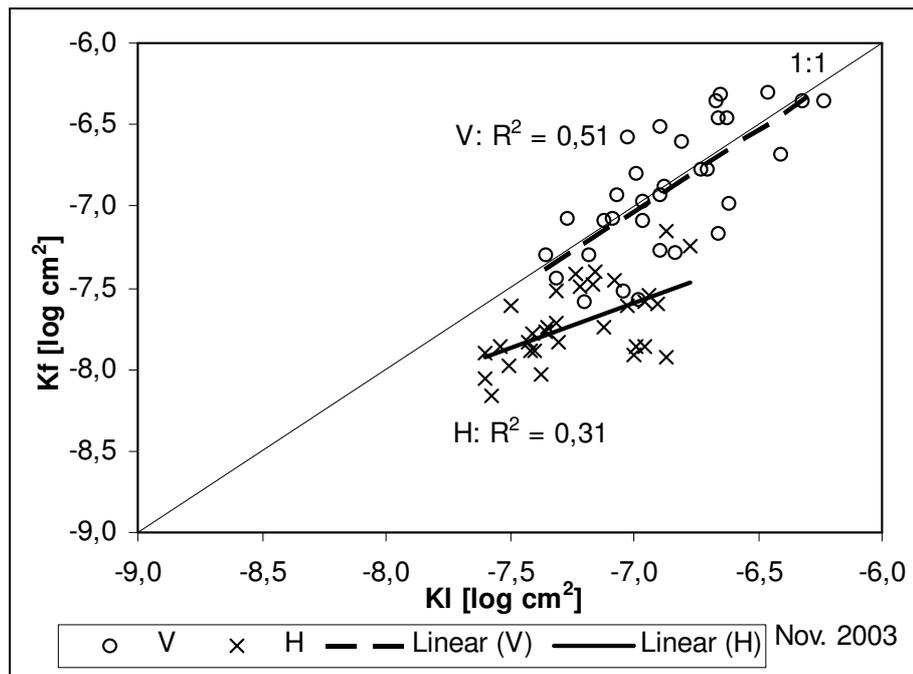


Abbildung 4-25 Zusammenhang zwischen Luftpermeabilität (KI) und gesättigte Wasserpermeabilität (Kf) von allen vertikal (V) und horizontal (H) entnommenen Stechzylinderproben (St. Zyl.: 100cm³), im Nov. 2003

Aus Abbildung 4-25 wird deutlich, dass die Werte von Luft- und Wasserpermeabilität nicht identisch sind je nach der Probenahmerichtung. Die in der vertikalen Richtung entnommenen Proben zeigen eine bessere Korrelation zwischen Luft- und Wasserpermeabilität als die horizontalen Proben, die die Biomakroporen als gleichmäßige Zylinder den Gas- und Wassertransport stets gleichermaßen beeinflussen. Die Regressionslinie der vertikal entnommenen Proben verläuft parallel zur 1:1 Geraden.

Aussagekräftiger ist jedoch im Hinblick der Porenfunktionen die Beziehung der Luft- und Wasserpermeabilität bei den horizontalen Proben. Hier kann man davon ausgehen, dass die Messergebnisse weniger von Biomakroporen beeinflusst wurden und die Funktion der Interaggregatporen eine größere Rolle spielen. Die Luftpermeabilität ist hierbei stets größer als die Wasserpermeabilität.

Um mehr über die beprobten Bodenhorizonte zu erfahren (ohne Berücksichtigung der Bearbeitungs- bzw. Befahrungsvarianten) sind in der Abbildung 4-26 die Beziehungen zwischen Permeabilitäten mit Luft und Wasser

bei vertikal und horizontal entnommenen Proben aus den unterschiedlichen Tiefen dargestellt. Bei den vertikal entnommenen Proben wird deutlich, dass die Permeabilitätswerte bei 35 und 60cm unterschiedlich groß sind und die Richtungen der Regressionsgeraden umgekehrt sind. Diese Tatsache deutet darauf hin, dass die gemessenen vertikalen Permeabilitätswerte grundlegend unterschiedliche Verläufe zeigen können als die horizontalen Permeabilitätswerte je nach Einfluss der Biomakroporen.

Die horizontal entnommenen Proben zeigen einheitliche Ergebnisse unabhängig vom Fließmedium. Die Regressionsgeraden zwischen Permeabilität mit Luft und Wasser sind in 35 und 60cm Tiefe parallel, die auf eine einheitliche Porenfunktion in diesen beiden Tiefen (35, 60cm) hinweist. Die unterschiedlichen Richtungen der Regressionslinien bei 35 und 60cm Tiefe der vertikal und horizontal entnommenen Proben deuten auf eine Anisotropie hin.

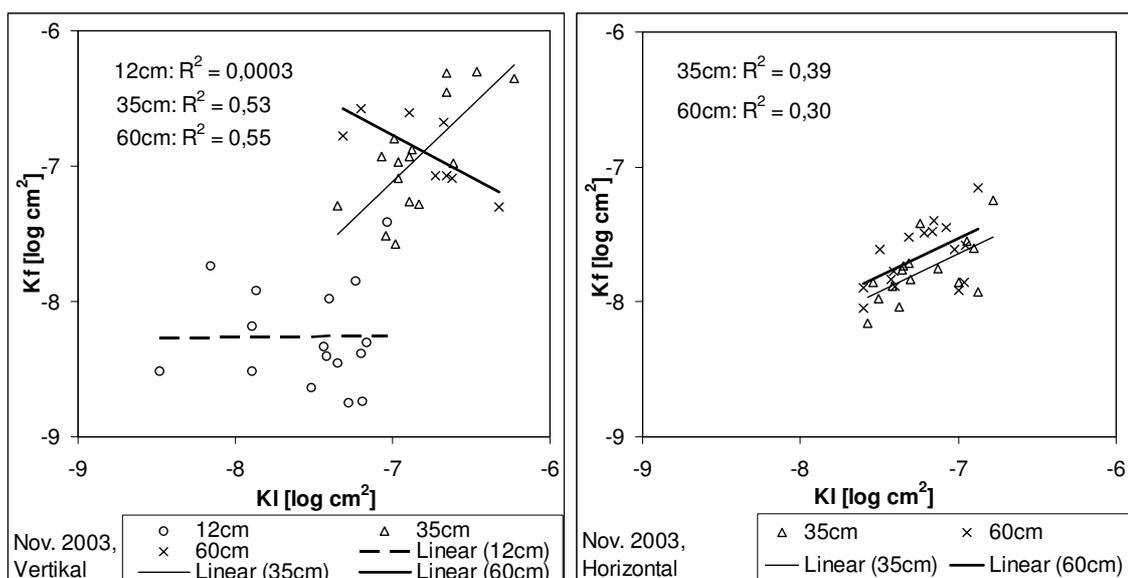


Abbildung 4-26 Zusammenhang zwischen Luft- und Wasserpermeabilität an vertikal und horizontal entnommenen Stechzylinderproben (100cm^3) hinsichtlich auf die Tiefen, im Nov. 2003

4.2.4.2 Zusammenhang zwischen Porengrößenverteilung und Luftleitfähigkeit bzw. gesättigte Wasserleitfähigkeit

Hierbei wurden dieselben Stechzylinderproben (100cm^3) sowohl zur Bestimmung der Porengrößenverteilung als auch der vertikalen Luftleitfähigkeit

(bei -60hPa Entwässerungsstufe) verwendet, um eine direkte Beziehung ableiten zu können. Die Beziehung zwischen vertikaler Leitfähigkeit und Porenvolumenanteil der unterschiedlichen Porengrößenklassen ist in Abbildung 4-27 dargestellt. Generell konnte eine bessere lineare Anpassung zwischen Porenanteil und Leitfähigkeit immer für die gesättigte Wasserleitfähigkeit errechnet werden. Diese Darstellung ist aufgrund unterschiedlicher Fließmedien nicht geeignet, sie als solche miteinander zu vergleichen.

Das Gesamtporenvolumen hat eine geringere Auswirkung auf die Leitfähigkeiten, maßgebend sind die unterschiedlich großen Porenanteile. Nimmt der weite kontinuierliche Grobporenanteil im Boden zu, steigt sowohl die gesättigte Wasserleitfähigkeit als auch die Luftleitfähigkeit. Mit Erhöhung der mittleren Poren sinken die beiden Leitfähigkeiten. Die engen Grobporen in Betrachtung des gesamten Porenvolumens scheinen weder die Luft- noch die Wasserleitfähigkeit zu beeinflussen.

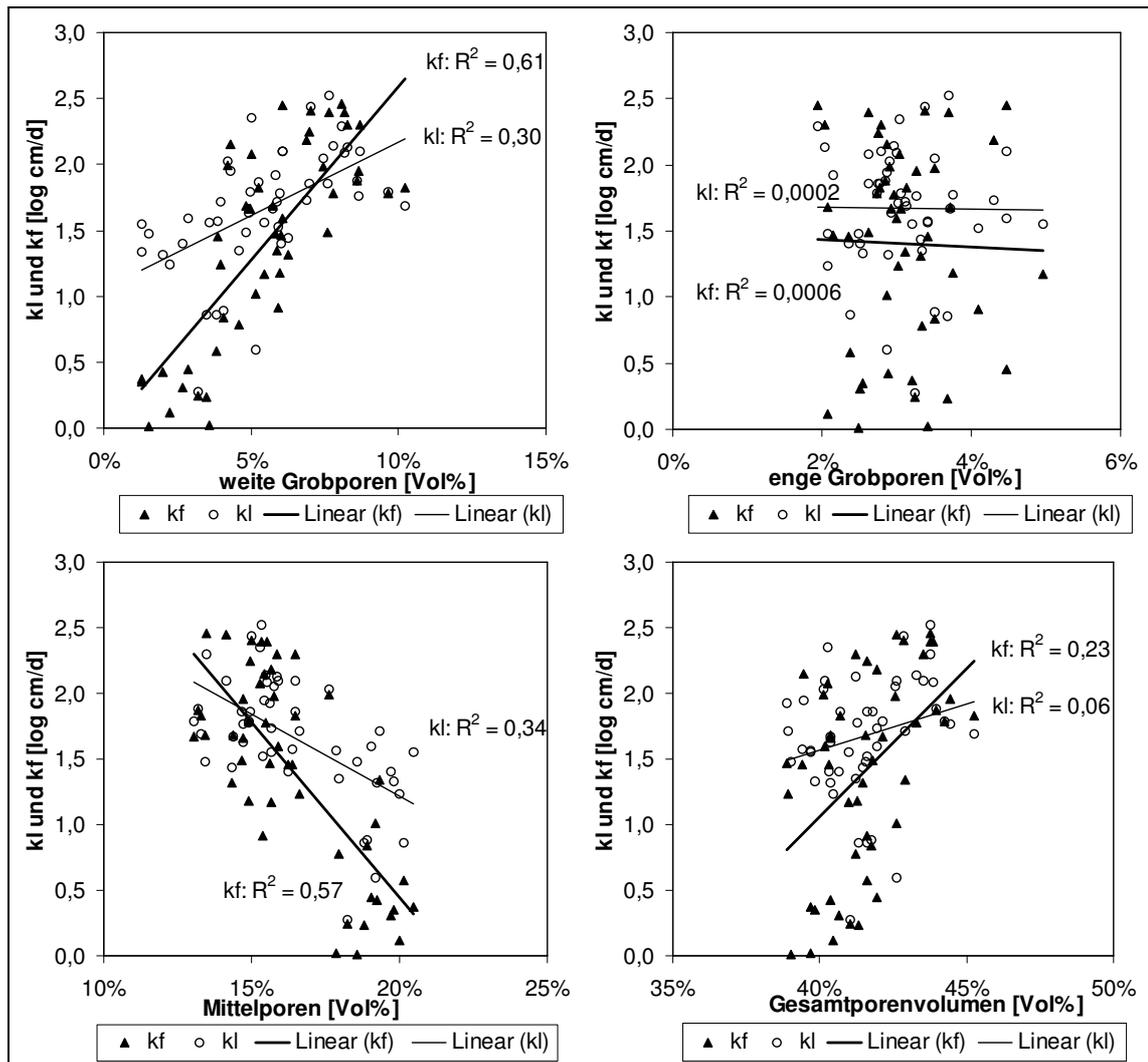


Abbildung 4-27 Zusammenhang zwischen der Porengrößenverteilung und den Leitfähigkeiten, ermittelt an vertikal entnommenen Proben (alle gemessenen 100cm^3 Stechzylinderproben), im Nov. 2003

4.2.5 Diskussion zum Thema Luftleitfähigkeit und gesättigte

Wasserleitfähigkeit und deren Zusammenhang zur Porengrößenverteilung

Luftleitfähigkeit und gesättigte Wasserleitfähigkeit werden allgemein von der Porengrößenverteilung und von der Porenkontinuität beeinflusst. Die in vertikaler Richtung entnommenen Proben verhalten sich ähnlich bei den beiden Leitfähigkeiten. Sowohl Luftleitfähigkeitswerte als auch gesättigte Wasserleitfähigkeitswerte liegen dabei in den sehr hohen Leitfähigkeitsbereichen (Kmoch und Hanus, 1965). In diesem Fall der Ergebnisse werden die Flüsse weniger von den Porengrößenverteilungen,

sondern mehr von dem hohen Biomakroporenanteil des Bodens beeinflusst. Im Oberboden sind niedrigere Leitfähigkeitswerte, mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Leitfähigkeit des Bodens, und korreliert mit einem zunehmenden Bioporenanteil.

Im Oberboden ist durch eine regelmäßige Bodenbearbeitung und damit Homogenisierung dieser Horizont der Pflugvariante und durch einen „Ruhezustand“ bei der Mulchvariante ein höherer Grobporenanteil geschaffen worden als im Unterboden. Dadurch zeigt der Oberboden eine gute Leitfähigkeit, die bei der Pflugvariante höher ist als bei der Mulchvariante. Eine Durchwurzelung des Bodens im Frühjahr begünstigt sekundär die gute Leitfähigkeit; wobei diese allerdings auf den Oberboden beschränkt bleibt. Zahlreiche Autoren haben darauf hingewiesen, dass mit einer höheren Lagerungsdichte weniger Grobporen entstehen werden, welche zu niedrigeren Leitfähigkeitswerten führen (Ball, 1981; Douglas, 1986; Kevin und McCarthy Kirk Brown, 1992; Roseberg und McCoy, 1992). Horn und Rostek (2000) und Kirby (1991) haben außerdem nachgewiesen, dass durch Reifenschlupf bei einer Bodenbefahrung neben einer vertikalen Kompression auch die Poren zerschert werden, verbunden mit einer Leitfähigkeitsreduktion. In der vorliegenden Arbeit stimmen die Ergebnisse im Oberboden mit der Literatur überein.

In unteren Horizonten sind die Leitfähigkeitswerte bei den vertikal entnommenen Proben trotz eines stark ausgeprägten Pflugsohlenbereichs bei der Pflugvariante und des verbliebenen Pflugsohlenbereichs bei der Mulchvariante deutlich höher als im Oberboden. Die Ursache dafür ist der hohe Biomakroporenanteil. Trotz eines als gering berechneten prozentualen Bioporenanteils hat dieser eine große Bedeutung im Stofftransport. Edwards et al. (1988) und Ehlers (1975) fanden auch weniger als 2% Bioporenanteil in ihren Untersuchungen, trotzdem erlangen diese Poren besonders bei Wasserinfiltration nach einem starken Regen große Bedeutung. In diversen Veröffentlichungen (Ehlers, 1975; Joschko et al., 1989) wird gezeigt, dass das Wasser durch Sekundärporen, die durch Regenwürmer entstanden sind, sehr schnell in die Tiefe abgeleitet werden kann. Der präferentielle Fluss während

eines Regenereignisses ist vom Wassergehalt des Bodens und von Oberflächeneigenschaften bzw. Aggregation beeinflusst (Ahuja et. al., 1995).

Eine Durchnässung der benachbarten Bodenmatrix ist also vom Porenanteil und damit vom Verdichtungszustand abhängig. Erst im gesättigten Zustand der Makroporen findet eine intensivere Befeuchtung der benachbarten Bodenmatrix statt (Allaire et. al., 2002), was an einigen Stechzylinderproben aus den tieferen Bereichen bestätigt wird, wo die Leitfähigkeitswerte nach Kmoch und Hanus (1965) in die ganz geringe Kategorie fallen. (Einige Einzelwerte der Wasserleitfähigkeit bestätigen dies: 2,8cm/d-Pub35cm; 1,33cm/d-Mub35cm; 0,91cm/d-Pub60cm; 0,98cm/d-Mub60cm). Wenn die Sekundärporen das Wasser nach einem großen Regenereignis nicht mehr schnell genug tiefer leiten können, wird sich Stauwasser im Bereich der Pflugsohle bilden und zu einer inneren Erosion führen (Hartge und Horn, 1999).

Die Regenwurmröhren gelten durch die an den Wänden haftenden Ausscheidungssekrete als ein sehr stabiles System (Lee, 1985). Gegen eine vertikale, mechanische Belastung bleiben die Regenwurmröhren weitgehend stabil (Ehlers et al., 2000), während sie bei einer horizontal angreifenden, mechanischen Belastung schnell ihre Stabilität verlieren (Hartge und Bohne, 1983). In der vorliegenden Arbeit hat eine vertikale, einaxiale Belastung erst ab einer Auflast von 200 bzw. 400kPa die Luftleitfähigkeit deutlich reduziert (vgl. Abbildung 4-19), obwohl die Regenwurmröhren noch immer vorhanden waren. Die Streuung der Leitfähigkeit ist jedoch zu hoch, um eine exakte Aussage zu treffen. Dies zeigt auch, dass es sinnvoller erscheint, bei solchen Böden mit hohem Biomakroporenanteil die Leitfähigkeiten an den in horizontaler Richtung entnommenen Proben zu bestimmen, um die räumlich wirkenden Leitfähigkeitsfunktionen des Bodens bei unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten und Befahrungen miteinander vergleichen zu können.

Die Luftleitfähigkeit nimmt bei den horizontal entnommenen Proben ab einer bestimmten Auflaststufe statistisch abgesichert ab (vgl. Anhang 9). Bei diesem Lössboden lag dieser Auflastwert immer bei ca. 70, 100 oder teilweise auch bei 150kPa, so dass dieser Lastbereich gleichbedeutend mit einer Überschreitung der Eigenfestigkeit ist (siehe Kapitel 4.2.6). Kirby (1991) und Kirby und Blunden

(1991) haben auch Stechzylinderproben mit unterschiedlichen Auflasten im Ödometer belastet und die Leitfähigkeitsfunktion analysiert. Ihre Ergebnisse stimmen mit den eigenen Daten überein, wobei in der Literatur nur vertikal entnommene Proben verwendet wurden. In der hier vorliegenden Arbeit ist jedoch eine Änderung der Leitfähigkeit als Funktion der Auflast auch an horizontal entnommenen Proben bewiesen worden, wodurch der Bioporeneffekt minimiert und die Auswirkung von Bewirtschaftung und Belastung besser nachgewiesen werden konnte.

Die Beziehung zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben sowohl bei der gemessenen Wasser- als auch der Luftleitfähigkeit weisen im untersuchten Boden keine Korrelation auf (siehe Abbildung 4-20, Abbildung 4-22). Dies kann als Merkmal für die Anisotropie gewertet werden (Rogers und Selim, 1989; Tigges, 2000, Dörner und Horn, 2005).

Obwohl die Permeabilitätswerte in der vorliegenden Arbeit eine große Streuung aufweisen (vgl. Abbildung 4-26), kann man eine Strukturänderung im Boden erkennen. Bei den vertikal entnommenen Proben im Oberboden ergibt sich bei konstanter Wasserpermeabilität eine höhere Luftpermeabilität. Unterhalb der Pflugsohle und im Unterboden ergaben die Permeabilitäten mit Wasser und Luft unterschiedliche Tendenzen für beide Tiefen, die aber auch von den Biomakroporen beeinflusst sein können. Da bei den horizontal entnommenen Stechzylinderproben der Bioporeneinfluss weitgehend ausgeschlossen werden kann, sind die Werte von Wasser- und Luftpermeabilität realistischer und es kann festgestellt werden, dass mit zunehmender Luftpermeabilität die Wasserpermeabilität in der gleichen Tendenz zunimmt, was auch mit der oben erwähnten Literatur übereinstimmt. Hieraus kann auch abgeleitet werden, dass der stark verdichtete Pflugsohlenbereich auch bereits im Unterboden ausgeprägt ist und somit als Merkmal anthropogener Tätigkeit gedeutet werden muß. Außerdem kann der Unterschied bei den Leitfähigkeitswerten in diesen beiden Tiefen zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben auf eine Anisotropie hinweisen (siehe Abbildung 4-26).

Mit Blick auf die Luft-/Wasserleitfähigkeit im Porenraum hängt die gesättigte Wasserleitfähigkeit stärker vom Gesamtporenvolumen und hier insbesondere

vom weiten Grobporenanteil ab. Schjonning (1989) hat über die Korrelation zwischen Grobporenanteil und Gastransport berichtet, während Beven und Germann (1982) zum selben Fazit gekommen sind, im Zusammenhang mit dem Wassertransport.

Die Permeabilität ist ein Fließmedium unabhängiger Parameter, der dimensionsmäßig einer Fläche entspricht. So ist es möglich, die Permeabilität von Luft und Wasser miteinander zu vergleichen (Hartge, 1984). Diese Permeabilität bei Luft und Wasser zeigt bei den vertikal und horizontal entnommenen Proben einen deutlichen Unterschied (Abbildung 4-25). Hierbei ergab sich bei den vertikalen Proben kein Unterschied zwischen Luft- und Wasserpermeabilität, während bei den horizontalen Proben die Luftpermeabilität höher ist als die Wasserpermeabilität. Über eine erhöhte Luftpermeabilität verglichen zur Wasserpermeabilität haben Hartge (1984) und Iversen et al. (2001) auch berichtet. Bei horizontal entnommenen Proben war ein Einfluss von den in Fließrichtung orientierten Bioporen ausgeschlossen. So war es möglich, eine tatsächliche Beziehung zwischen den beiden Permeabilitäten festzustellen. Der Unterschied kann mit dem Klinkenberg-Effekt (Klinkenberg, 1941, zitiert in Bear, 1988) erklärt werden.

Das Wesentliche des Klinkenberg-Effekts besteht darin, dass als ein durch die Poren als Fließkanal strömendes Fließmedium aufgrund der Reibung zwischen der Flüssigkeit und der Porenwandung ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil (Laminarfluss) quer zur Strömungsrichtung ausgebildet wird. Die Geschwindigkeit der Wassermoleküle, die direkten Kontakt mit der Wand haben, geht praktisch gegen Null und somit sind die Wassermoleküle im zentralen Bereich des Fließkanals am schnellsten. Die Gasmoleküle gleiten jedoch quasi ohne Reibungsverluste an der Porenwand entlang, so dass keine nennenswerte Geschwindigkeitsreduktion durch die an der Wand entlang gleitenden Gasmoleküle erfolgt. Das Geschwindigkeitsprofil des Gases nähert sich daher einer rechtwinklig zur Fließrichtung orientierten Geraden.

4.2.6 Analyse des Drucksetzungsverhaltens des Bodens, Vorbelastung

Aus dem Drucksetzungsverhalten des Bodens kann man den Übergang vom Wiederverdichtungsast (elastischer Bereich) in den Erstverdichtungsast (plastischer Bereich) ableiten, der als Vorbelastung definiert ist. Die Vorbelastung zeigt die bisher erfolgte maximale mechanische oder aber auch der physikalischen, hydraulischen, biologischen bzw. chemischen Belastung und ist somit ein wichtiger Parameter bei der Beurteilung der Belastbarkeit des Bodens. Diese Analytik erfolgte mit einer Multistep-Drucksetzungsanlage mit aufsteigenden Auflasten von 0 bis 400kPa bei pF1,8 Vorentwässerung.

Wegen der Vergleichbarkeit mit anderen Ergebnissen aus der Literatur sind die berechneten Vorbelastungen sowohl mit Normalspannung (σ) als auch mit effektiver Spannung (σ') in der Abbildung 4-28 dargestellt.

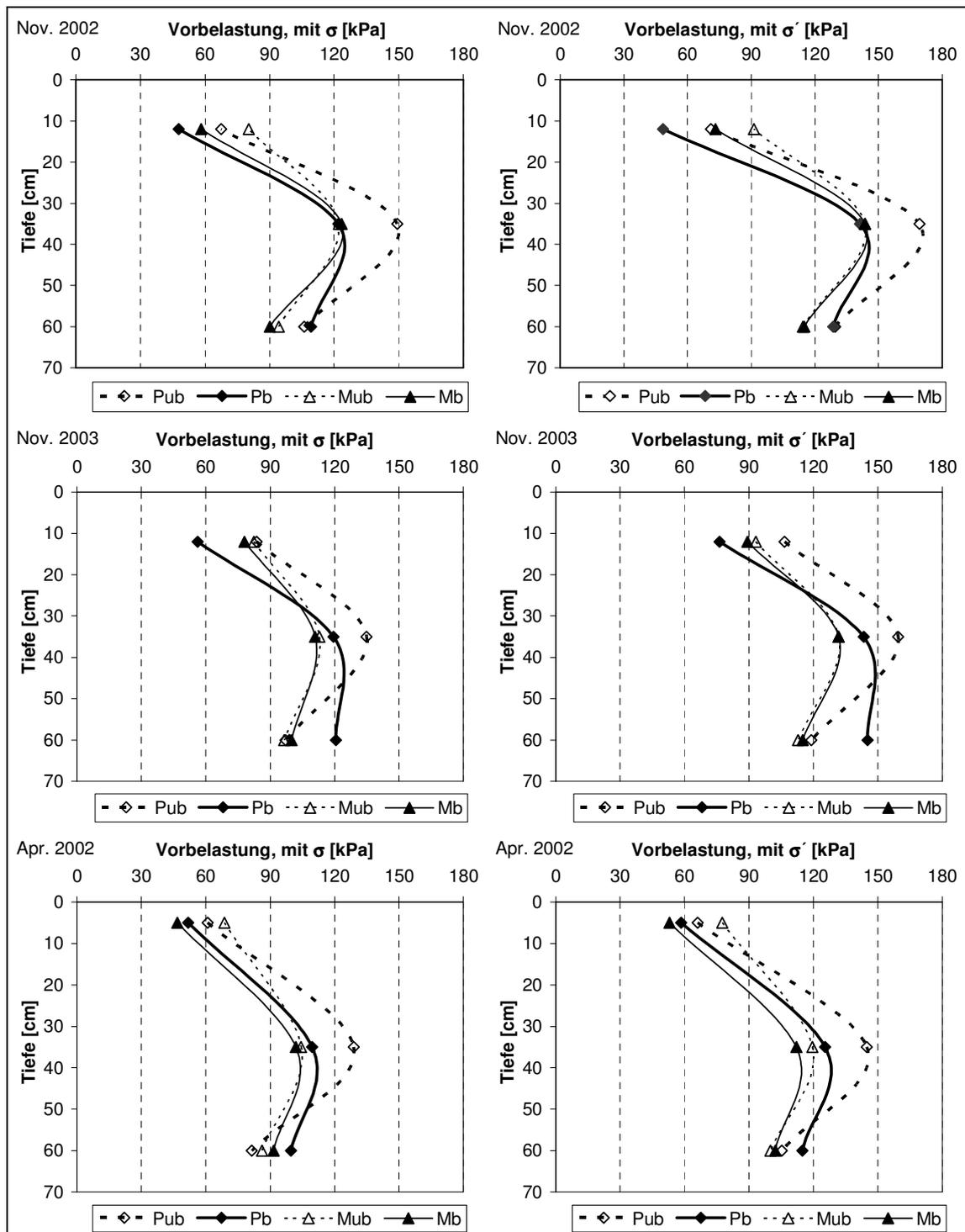


Abbildung 4-28 Vorbelastung bestimmt unter Berücksichtigung von σ und σ' bei allen Varianten bei pF1,8 Vorentwässerung

Die unter Berücksichtigung der effektiven Spannung ausgerechneten Vorbelastungen (mit Berücksichtigung der gemessenen Wasserspannung) zeigen dieselbe Tendenz wie die mit der Normalspannung berechneten Vorbelastungen (ohne Berücksichtigung der gemessenen Wasserspannung);

allerdings sind die Werte größer (mehr über die effektiven Spannungen im Kapitel 4.3.2.3). Aus den Grafiken erkennt man, dass unabhängig von der Bearbeitungsvariante, ein Pflugsohlenbereich nach mehr als 10 Jahren seit der Umstellung der Bodenbearbeitung und Verzicht auf Pflugeinsatz die Pflugsohle noch immer detektiert werden kann. Die Werte der Vorbelastungen liegen im Pflugsohlenbereich und im Unterboden zwischen 90 und 120kPa, manchmal sogar höher und kennzeichnen einen hoch verdichteten oder sehr hoch verdichteten Boden.

Alle Varianten weisen im lockeren Oberboden geringere Vorbelastungen auf als in höher verdichteten unteren Horizonten. Die Auswirkung einer Befahrung ist im Oberboden in den kleineren Vorbelastungswerten veranschaulicht, da der Boden hier durch die rollenden Räder der Erntemaschine zerknetet und zerschert wurde, was mit einem Stabilitätsverlust einhergeht. Signifikante Unterschiede der Vorbelastung vor und nach einer Befahrung wurden nur bei den Herbst Probenahmeterminen gefunden (Anhang 13).

Im Pflugsohlenbereich erhöhen sich die Vorbelastungen bei allen Varianten im Vergleich zum Oberboden. Bei der Mulchvariante gibt es tendenziell keinen Unterschied zwischen unbefahrenen und befahrenen Flächen. Außerdem ist die Vorbelastung bei der Mulchvariante kleiner als bei der Pflugvariante. Die unter Pflug unbefahrene Fläche weist in 35-40cm Tiefe eine stark ausgeprägte Pflugsohle auf. Allerdings zeigten die in situ Befahrungsversuche gerade in dieser Tiefe eine Besonderheit, die in Kapitel 4.2.8 behandelt wird, was in diesem Horizont bei der Pflugvariante durch die Befahrung geschehen ist. Nach einer Befahrung sind nämlich die Werte der Vorbelastung kleiner geworden.

Im Unterboden nehmen die Vorbelastungen im Vergleich zum Pflugsohlenbereich bei den unbefahrenen Mulch- und Pflugvarianten ab. Die Abnahmen der befahrenen Pflugvarianten sind kleiner als bei den anderen Varianten (Nov. 2002, Nov. 2003). Somit zeigen die befahrenen Pflugvarianten in 60cm Tiefe die größten Vorbelastungen im Vergleich zu den anderen Varianten.

Um sich der Betrachtung zu nähern, was im Boden bei der Pflugvariante nach einer Befahrung im Pflugsohlenbereich und im Unterboden passiert, wurden im November 2003 zu den aus drei Tiefen in vertikaler Richtung entnommenen Proben zusätzlich aus zwei Tiefen Proben in horizontaler Richtung entnommen und die Vorbelastungen ausgerechnet (Abbildung 4-29). Bei der Mulchvariante haben die horizontalen Proben aus beiden Tiefen tendenziell höhere Vorbelastungswerte als die vertikalen Proben. Die Vorbelastungswerte der horizontalen Proben haben einen ähnlichen Verlauf wie die vertikal entnommenen Proben. Die Vorbelastungen der horizontalen Proben bei den unbefahrenen Flächen der Pflugvariante sind in beiden Tiefen höher als die der vertikalen Proben, wobei der tendenzielle Verlauf in die Tiefe ähnlich ist. Von den vorher genannten drei Varianten unterscheidet sich jedoch die befahrene Pflugvariante. Hier weisen die horizontal entnommenen Proben eine kleinere Vorbelastung als die vertikalen Proben auf. Der Unterschied zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben ist im Pflugsohlenbereich kleiner als in 60cm Tiefe, wo die Vorbelastung der horizontalen Proben nur halb so groß ist wie bei den vertikalen Proben.

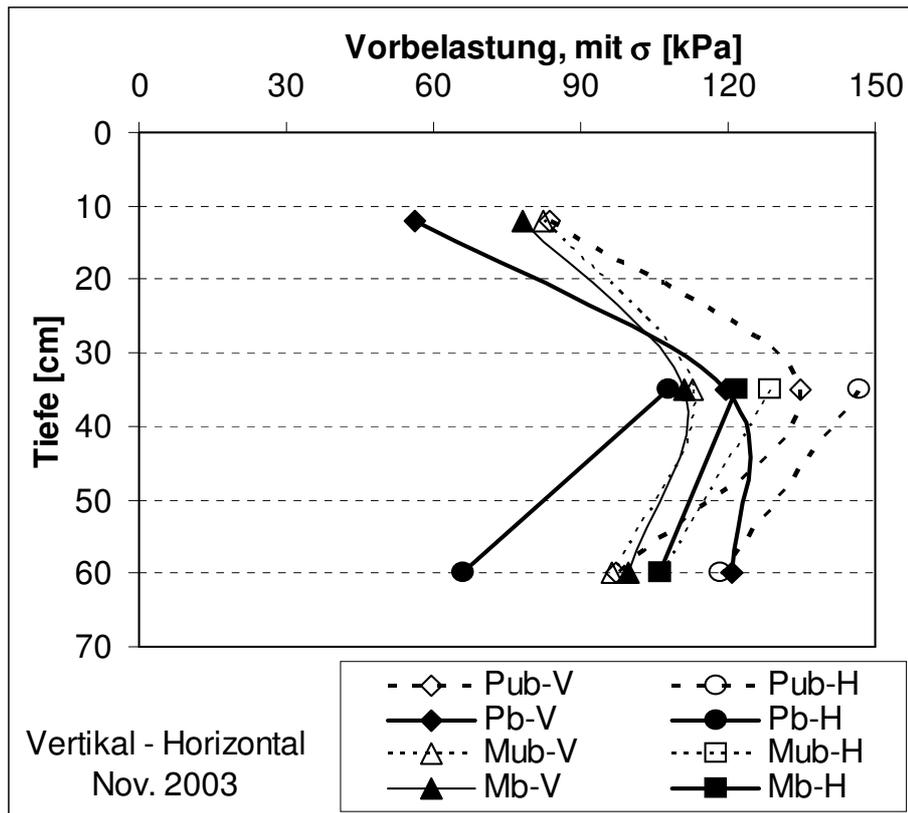


Abbildung 4-29 Vorbereitung vertikaler (V) und horizontaler (H) Richtung bei $p_{F1,8}$ Vorentwässerung, im Nov. 2003

Die Porenzifferänderung nach 400kPa Belastung und nach der anschließenden Entlastung ist nochmals in der Tabelle 4-8 dargestellt. Die Porenziffer sinkt nach einer 400kPa Belastung um ca. 30%, nach der Entlastung beträgt der elastische Anteil ca. 10%, wobei die horizontalen Proben weniger elastisch zu sein scheinen. Außerdem zeigt die Tabelle ähnliche Tendenzen hinsichtlich der Porenzifferänderung wie die Vorbereitungswerte in der Abbildung 4-28. Besonders interessant ist der Vergleich der Porenzifferänderung bei den vertikal und horizontal entnommenen Proben aus der befahrenen Pflugvariante (Nov. 2003). Hier ändert sich die Porenziffer nach der 400kPa Belastung bei vertikalen Proben weniger als bei horizontalen Proben. Dieser Gegensatz zeigt sich deutlich gegenüber allen anderen Varianten, da die Porenzifferänderung bei den anderen Varianten der vertikalen und horizontalen Proben annähernd gleich ist.

Tabelle 4-8 Porenzifferänderung (ε) nach 400kPa Belastung und nach Entlastung bei vertikal (V) und bei horizontal (H) entnommenen Proben, bei pF1,8

Tiefe		Variante	ε_0 [-]	$\Delta\varepsilon_{400kPa}$ [%]	$\Delta\varepsilon_{Entlastung}$ [%]	Orientierung V / H
Nov. 2002	12 cm	Pub	0,766	32,1	23,0	V
		Pb	0,721	31,1	19,9	V
		Mub	0,728	28,5	21,3	V
		Mb	0,729	28,6	18,5	V
	40cm	Pub	0,766	30,1	21,2	V
		Pb	0,747	26,8	18,9	V
		Mub	0,831	33,6	26,2	V
		Mb	0,794	31,1	22,6	V
	60cm	Pub	0,722	31,9	21,9	V
		Pb	0,756	29,9	21,5	V
		Mub	0,816	36,7	27,7	V
		Mb	0,754	30,6	21,4	V
Nov. 2003	12cm	Pub	0,732	28,2	18,5	V
		Pb	0,697	27,6	17,1	V
		Mub	0,762	26,8	17,4	V
		Mb	0,726	23,9	15,0	V
	35cm	Pub	0,819	29,3	18,6	V
		Pb	0,790	29,5	20,0	V
		Mub	0,766	27,5	18,7	V
		Mb	0,769	28,8	19,8	V
		Pub	0,845	29,7	21,4	H
		Pb	0,821	34,6	25,6	H
		Mub	0,786	29,4	20,9	H
		Mb	0,772	29,1	20,5	H
	60cm	Pub	0,786	29,5	21,4	V
		Pb	0,724	22,9	14,6	V
		Mub	0,744	31,1	21,8	V
		Mb	0,750	27,2	18,4	V
Pub		0,729	27,2	17,7	H	
Pb		0,690	28,4	18,9	H	
Mub		0,752	27,2	18,9	H	
Mb		0,760	29,7	20,7	H	
April 2002	5cm	Pub	0,833	28,7	23,3	V
		Pb	0,796	35,2	31,2	V
		Mub	0,737	34,5	25,3	V
		Mb	0,833	38,8	30,2	V
	40cm	Pub	0,790	34,9	36,3	V
		Pb	0,766	31,2	23,0	V
		Mub	0,731	38,6	28,6	V
		Mb	0,783	40,8	31,8	V
	60cm	Pub	0,767	31,7	27,5	V
		Pb	0,816	37,4	28,1	V
		Mub	0,714	25,6	18,3	V
		Mb	0,697	33,0	26,4	V

Die Quotienten zwischen den Vorbelastungen der horizontal und vertikal entnommenen Proben sind in der Tabelle 4-9 zusammengefasst. Wenn sich die Werte der Zahl 1 nähern, ist die Vorbelastung der vertikal und horizontal entnommenen Proben gleich groß. Außer bei der befahrenen Pflugvariante sind die Quotienten stets größer als 1, was auf eine höhere horizontale Vorbelastung hinweist. Im Bereich der Pflugsohle sind ähnliche Strukturverhältnisse bei allen Varianten außer bei der befahrenen Pflugvariante zu sehen. In 60cm Tiefe zeigt sich kein einheitliches Bild.

Tabelle 4-9 Quotient der Vorbelastung aus horizontal und vertikal entnommenen Proben (die kleinen Buchstaben bedeuten die signifikante Differenz zwischen Behandlungen innerhalb einer Tiefe, die großen Buchstaben charakterisieren die Signifikanzunterschiede zwischen den Tiefen innerhalb einer Variante bei einem Signifikantniveau von 0,05)

$K = \frac{P_{V_{horizontal}}}{P_{V_{vertikal}}}$	Pub	Pb	Mub	Mb
35 cm	1,09 a A	0,90 a B	1,14 a A	1,10 a A
60 cm	1,22 b A	0,55 a A	1,10 b A	1,06 b A

Die Quotienten sind bei den Mulchvarianten in beiden Tiefen annähernd gleich groß, was auf eine ähnliche Bodenstruktur im Pflugsohlenbereich und im Unterboden hindeutet. Bei der unbefahrenen Pflugvariante weisen unterschiedlich große Quotienten in 35 und 60cm Tiefe auf eine Strukturänderung hin; in 60cm Tiefe ist eine stark ausgeprägte Plattenstruktur vorhanden. Außerdem zeigt die befahrene Pflugvariante einen Stabilitätsverlust, der mit der Tiefe deutlich zunimmt.

4.2.7 Scherwiderstand

Mechanische Belastungen können nur dann zur Veränderung von Bodeneigenschaften führen, wenn die maximal mobilisierbaren Widerstände überschritten werden. Zur Bestimmung der Kraft, die an der Berührungsstelle zweier fester Körper mobilisiert wird, wenn diese gegeneinander bewegt werden, wird der Scherwiderstand verwendet. Der Scherwiderstand ist

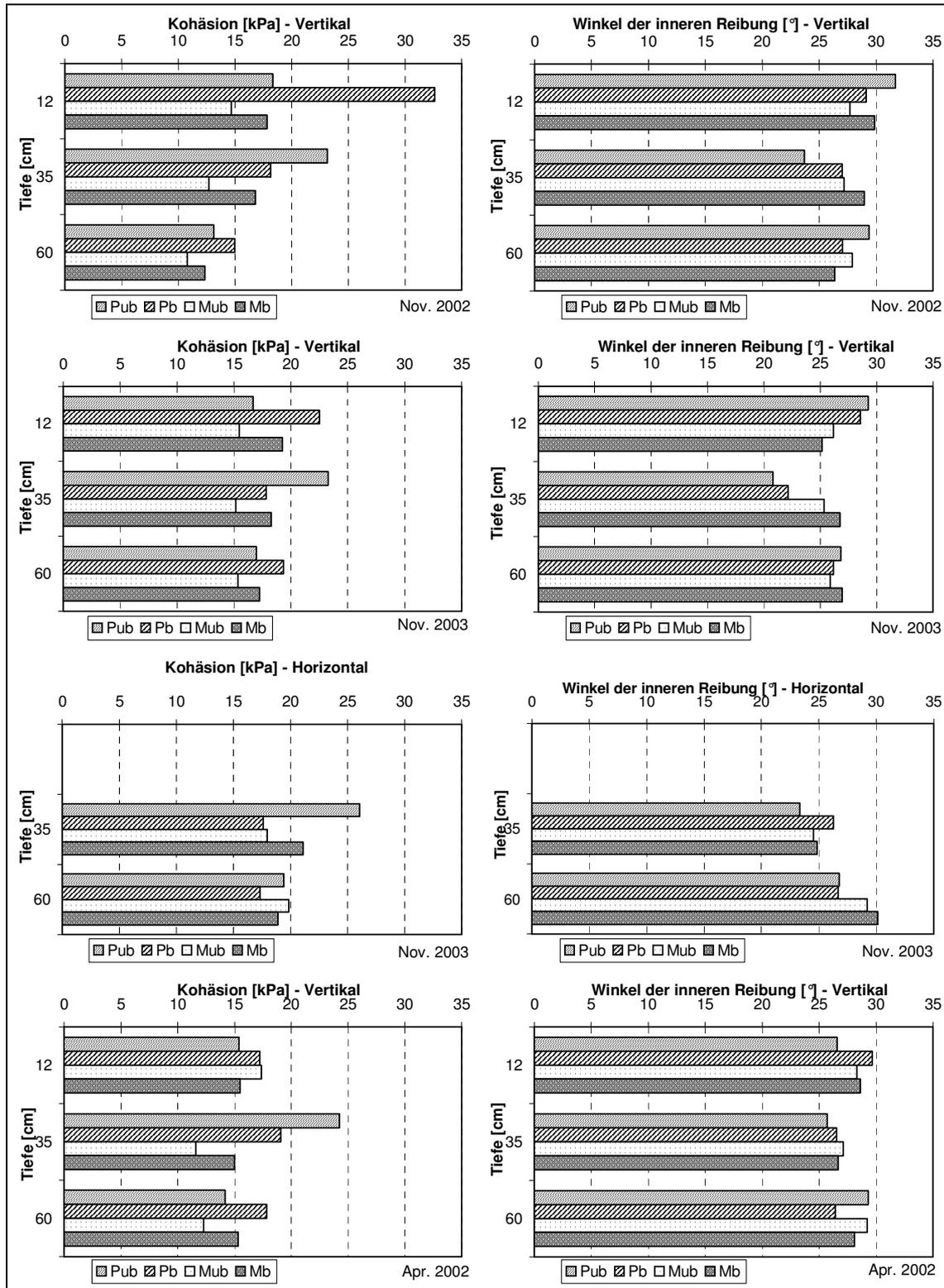


Abbildung 4-31 Kohäsion und Winkel der inneren Reibung aller Varianten und für alle Tiefen sowie Probenahmeterminale bei pF1,8 Vorentwässerung

Die Kohäsion scheint bei allen Varianten die unterschiedlichen Bearbeitungs- bzw. Befahrungsvarianten deutlich widerzuspiegeln. Die Kohäsionswerte liegen

für alle untersuchten Proben und bei allen Varianten zwischen ca. 12-25kPa, wobei einige extrem hohe Werte auch vorhanden sind. Der Winkel der inneren Reibung zeigt hingegen eine geringe Tendenz bei den unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten. An einigen Stellen ist festzuhalten, dass mit abnehmender Kohäsion der Winkel der inneren Reibung zunimmt, was aber keine Relation zur Bodenbearbeitung zeigt.

Im Oberboden wurden bei den Herbstprobenahmen signifikante Unterschiede sowohl zwischen den Bearbeitungsvarianten als auch zwischen unbefahrenen und befahrenen Flächen gefunden. Eine erhöhte Kohäsion war bei der Pflugvariante zu beobachten. Durch eine Befahrung erhöht sich in beiden Varianten die Kohäsion. Im Pflugsohlenbereich schwanken die Kohäsionswerte je nach Variante sehr, Aufschlüsse können jedoch die signifikanten Unterschiede aus Tabelle 4-10 geben. So weist die Pflugvariante eine signifikant höhere Kohäsion auf als die Mulchvariante. Die Befahrung wirkt ebenfalls unterschiedlich bei den Bearbeitungsvarianten. Eine Befahrung mit Holmer Terra Dos erhöhte unterhalb der noch vorhandenen Pflugsohle bei der Mulchvariante die Kohäsion, während gleichzeitig die Kohäsion bei der Pflugvariante nach einer Befahrung kleiner geworden ist. Ein ähnliches Phänomen wurde auch bei den Vorbelastungen gefunden (Abbildung 4-28).

Im Unterboden ändert sich bei der Mulchvariante die Kohäsion wenig im Vergleich zum ehemaligen Pflugsohlenbereich. Bei der Pflugvariante nähern sich die Kohäsionswerte denen der Mulchvariante an.

Tabelle 4-10 Kohäsion und Winkel der inneren Reibung bei $pF_{1,8}$ Vorentwässerung (die kleinen Buchstaben bedeuten die sign. Differenz zwischen Behandlungen innerhalb einer Tiefe, die großen Buchstaben definieren die Signifikanz zwischen den Tiefen innerhalb einer Variante)

	Tiefe	Variante	Kohäsion			Winkel der inneren Reibung			Orientierung V / H
			[kPa]		St. Abw.	[°]		St. Abw.	
Nov. 2002	12cm	Pub	18,4	b B	1,4	31,7	a B	1,1	V
		Pb	32,6	c C	1,3	29,1	a A	3,0	V
		Mub	14,7	a A	1,2	27,7	a A	2,9	V
		Mb	17,8	b B	0,7	29,9	a A	1,8	V
	35cm	Pub	23,2	c C	0,6	23,7	a A	1,2	V
		Pb	18,1	b B	0,5	27,0	a A	2,5	V
		Mub	12,7	a A	2,2	27,2	a A	3,5	V
		Mb	16,8	b B	2,2	29,0	a A	3,1	V
	60cm	Pub	13,1	ab A	1,9	29,4	a B	4,3	V
		Pb	15,0	b A	1,5	27,0	a A	3,1	V
		Mub	10,8	a A	1,5	27,6	a A	1,7	V
		Mb	12,3	ab A	1,1	26,4	a A	2,3	V
Nov. 2003	12cm	Pub	16,7	ab A	1,2	29,3	a B	0,7	V
		Pb	22,5	c B	0,7	28,5	a B	2,0	V
		Mub	15,5	a A	1,0	26,2	a A	1,7	V
		Mb	19,3	b A	1,7	25,2	a A	2,7	V
	35cm	Pub	23,3	b B	2,6	20,8	a A	2,1	V
		Pb	17,8	a A	1,8	22,1	ab A	0,4	V
		Mub	15,2	a A	0,7	25,3	ab A	2,4	V
		Mb	18,3	a A	1,1	26,8	b A	2,9	V
		Pub	26,1	b B	1,5	23,4	a A	1,2	H
		Pb	17,6	a A	1,6	26,3	a A	2,3	H
		Mub	18,0	a A	0,4	24,5	a A	1,2	H
		Mb	21,1	b A	0,5	24,8	a A	1,2	H
	60cm	Pub	17,0	a A	1,3	26,8	a B	2,5	V
		Pb	19,4	b A	0,8	26,2	a AB	2,8	V
		Mub	15,3	a A	0,9	25,9	a A	2,4	V
		Mb	17,2	a A	0,8	26,9	a A	2,1	V
Pub		19,4	a A	1,5	26,8	a A	1,2	H	
Pb		17,3	a A	1,3	26,7	a A	1,3	H	
Mub		19,9	a A	2,6	29,2	a A	2,8	H	
Mb		18,9	a A	1,2	30,1	a B	1,5	H	
April 2002	12cm	Pub	15,4	a A	0,3	26,6	a A	0,9	V
		Pb	17,2	a A	1,8	29,7	a A	2,0	V
		Mub	17,4	a B	0,1	28,3	a A	4,6	V
		Mb	15,5	a A	0,8	28,6	a A	2,4	V
	35cm	Pub	24,2	c B	0,4	25,7	a A	0,4	V
		Pb	19,1	bc A	0,1	26,5	a A	1,6	V
		Mub	11,6	a A	0,0	27,1	a A	1,1	V
		Mb	15,0	ab A	2,7	26,7	a A	2,8	V
	60cm	Pub	14,2	ab A	1,1	29,3	a A	2,8	V
		Pb	17,8	b A	0,2	26,4	a A	0,4	V
		Mub	12,3	a A	1,1	29,2	a A	1,4	V
		Mb	15,3	ab A	0,0	28,1	a A	4,9	V

Interessant ist der Vergleich der Kohäsionswerte zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben, die als Quotienten in Tabelle 4-11 dargestellt sind. Die Quotienten zeigen ein ähnliches Bild wie bei der Vorbelastung (vgl.

Tabelle 4-9). Die Quotienten der Kohäsion sind bei allen Varianten und Tiefen größer als 1. Eine Ausnahme stellt nur die befahrene Pflugvariante in beiden Tiefen dar. Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten wurden nur in 60cm gefunden.

Tabelle 4-11 Quotient der Kohäsion (C) bzw. des Winkels der inneren Reibung (φ) zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben, Nov. 2003

$K = \frac{\text{Horizontal}}{\text{Vertikal}}$		Pub	Pb	Mub	Mb
35cm	C	1,13 a A	0,99 a A	1,19 a A	1,16 a A
	φ	1,14 a A	1,19 a A	0,98 a A	0,94 a A
60cm	C	1,14 c A	0,89 a A	1,30 c A	1,10 b A
	φ	1,00 a A	1,03 a A	1,14 a A	1,12 a B

Als Kombination aus den Labormessungen und den Freilandbefahrungen sind in die Scher- und Normalspannung-Diagramme (Abbildung 4-33) die mittlere Normalspannung (MNS) als wirksame Normalspannung und die mittlere Scherspannung (OCTSS) als die wirksame Scherbelastung dargestellt, die während einer Überrollung mit den SST aufgenommen wurden, da hierdurch Informationen zur Bruchbedingung im Boden gegeben werden. Dazu wird die Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade mit den im Gelände aufgenommenen MNS-OCTSS-Werten verglichen. Liegen die Werte der mittleren Normalspannung und mittleren Scherspannung, unterhalb der Geraden, bleibt der Boden stabil. Ein Scherbruch wird erst erreicht, wenn die Werte die Gerade überschreiten.

Wie Abbildung 4-32 und die zusammenfassende Tabelle 4-12 zeigen, wurde der Scherwiderstand durch eine Überrollung im Nov. 2002 bei allen Feldwiederholungen (d.h. die einzelnen Messwerte) der Varianten und in allen Tiefen überschritten.

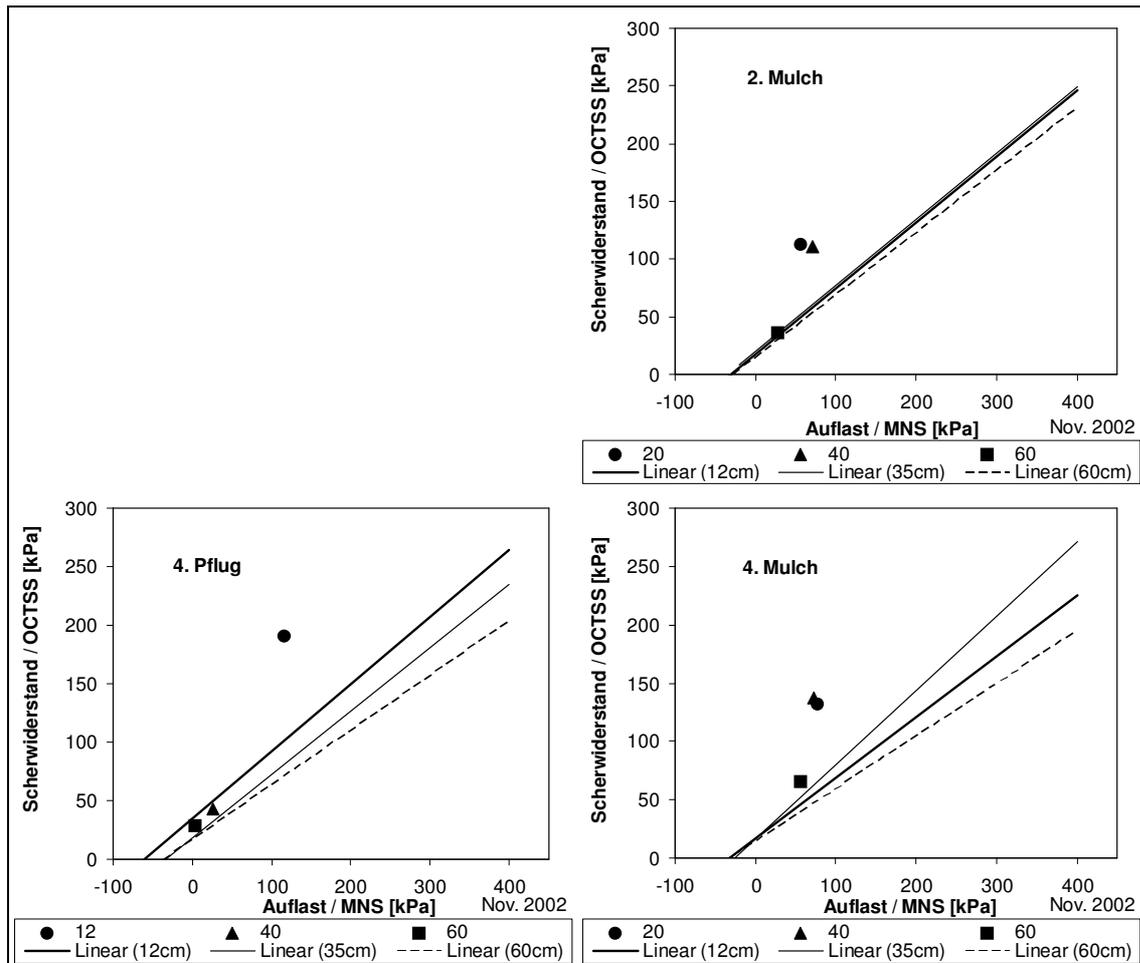


Abbildung 4-32 Mohr-Coulomb'sche Bruchgeraden und die maximale Scherbeanspruchung bei der Befahrung. Einzelne Messwerte aus Nov. 2002 bei den jeweiligen Feldwiederholungen

Die Bruchbedingungen aus dem Befahrungstermin Nov. 2003 sind in der Abbildung 4-33 dargestellt. Die Bruchzustände sind in der 3. Feldwiederholung sowohl bei der Pflug- als auch bei der Mulchvariante in 20 und 40cm Tiefe überschritten. In der Mulchvariante in 60cm Tiefe weisen selbst die MNS/OCTSS Werte auf eine Annäherung an die Schergeraden hin. Bei der 4. Feldwiederholung der Pflugvariante findet ein Scherbruch in 20cm Tiefe statt, während bei der Mulchvariante der Scherbruch bis in 40cm Tiefe geht. Die MNS/OCTSS-Werte bei der Pflugvariante in 40cm Tiefe und bei der Mulchvariante in 60cm Tiefe liegen unterhalb der Schergeraden.

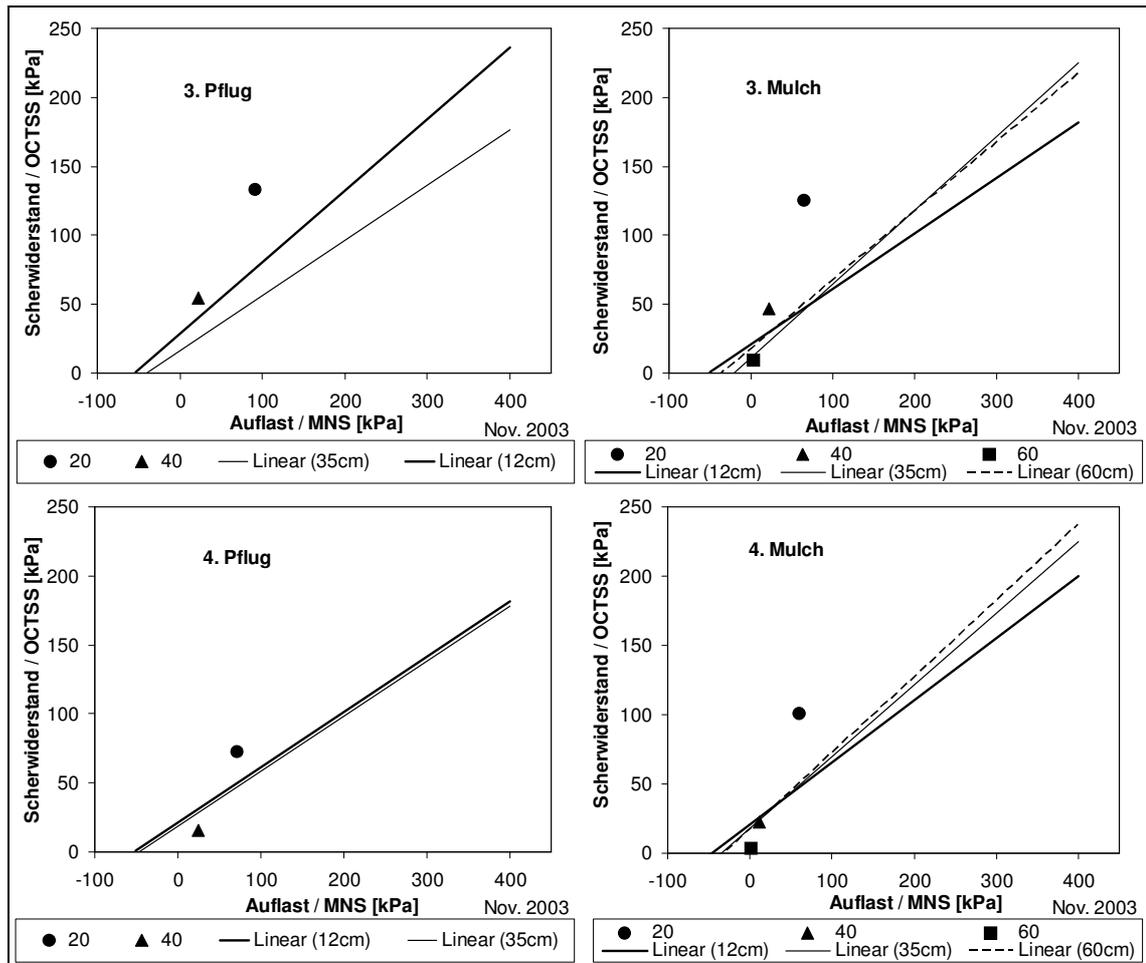


Abbildung 4-33 Mohr-Coulomb'sche Bruchgeraden und die maximale Scherbeanspruchung bei der Befahrung. Einzelne Messwerte aus Nov. 2003 bei den jeweiligen Feldwiederholungen

Tabelle 4-12 Zusammenfassende Kennzeichnung von Bruchbedingungen in unterschiedlichen Feldwiederholungen und Tiefen bei beiden Befahrungsterminen (+: Scherbruch; -:kein Scherbruch; k.A.: keine Angabe)

Tiefe [cm]	Nov. 2002				Nov. 2003			
	Pflug		Mulch		Pflug		Mulch	
	4. Wdh.	2. Wdh.	4. Wdh.	3. Wdh.	4. Wdh.	3. Wdh.	4. Wdh.	
20	+	+	+	+	+	+	+	
40	+	+	+	+	-	+	-	
60	+	+	+	k.A.	k.A.	-	-	

Die berechneten Zugspannungen sind exemplarisch für die Scherdaten der Beprobung Nov. 2003 in der Abbildung 4-34 dargestellt (Die

Zugspannungsergebnisse der weiteren Probenahmeterminen sind in Anhang 14 zusammengefasst). Die Zugspannung spiegelt die Ergebnisse von der Kohäsion und dem Winkel der inneren Reibung wider. Die Zugspannung nimmt im Oberboden nach einer Befahrung zu, wobei man keine Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten erkennen kann. Bei den vertikal entnommenen Proben im Pflugsohlenbereich deutet die hohe Zugspannung der unbefahrenen Pflugvariante auf eine stark verdichtete Pflugsohle hin, trotzdem ist der Wert der befahrenen Pflugvariante deutlich kleiner und bei den horizontal entnommenen Proben sinkt er noch mehr. Im Unterboden zeigt sich dieselbe Tendenz bei der Pflugvariante wie sie im Pflugsohlenbereich auftritt. Die Zugspannung der Mulchvariante ändert sich weder bei vertikal noch bei horizontal entnommenen Proben im Unterboden.

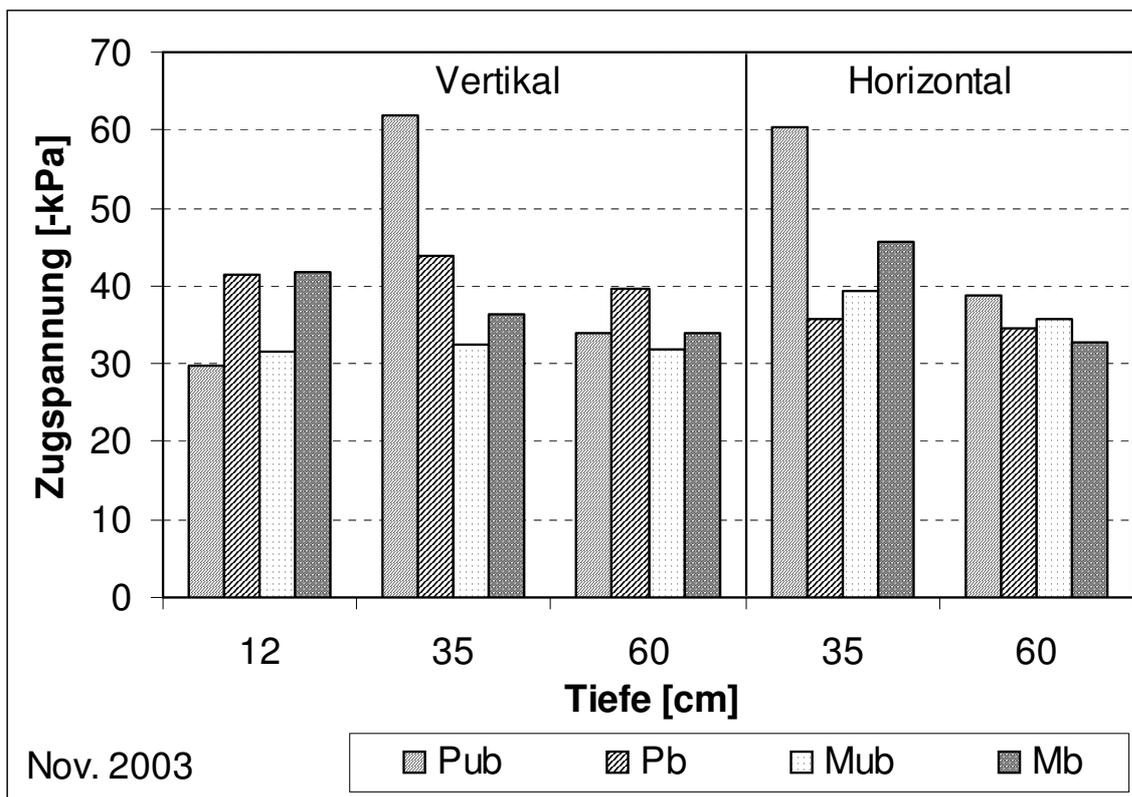


Abbildung 4-34 Zugspannung bei den vertikal und horizontal entnommenen Proben bei pF1,8 Vorentwässerung, im Nov. 2003

Berechnet man aus der Zugspannung einen Quotienten zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben, erhält man eine ähnliche Tendenz wie bei der Vorbelastung und Kohäsion. Die berechneten Quotienten sind in der Tabelle 4-13 dargestellt. Im Pflugsohlenbereich ist der Quotient bei allen

Varianten mit Ausnahme von der befahrenen Pflugvariante annähernd gleich oder größer als 1. Dementsprechend ist die Zugspannung bei den horizontal entnommenen Proben größer als bei den vertikalen Proben, wobei es bei der befahrenen Pflugvariante umgekehrt ist. Es weist wiederum auf eine Stabilitätsverminderung hin. Dasselbe gilt im Unterboden bei der befahrenen Pflugvariante.

Tabelle 4-13 Quotient der Zugspannung zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben, im Nov. 2003

$K = \frac{\text{Horizontal}}{\text{Vertikal}}$		Pub	Pb	Mub	Mb
35cm	Zugspannung	0,98 ab A	0,82 ab A	1,22 ab A	1,26 b B
60cm		1,14 a A	0,87 a A	1,12 a A	0,96 a A

4.2.8 Diskussion zum Thema zur Analyse des Drucksetzungsverhaltens des Bodens und Scherwiderstand

Die Bodenstabilitätsparameter deuten auf strukturelle Unterschiede zwischen Bearbeitungs- bzw. Befahrungsvarianten und Bodentiefen hin. Bei den vertikal entnommenen Proben nimmt die Vorbelastung bei allen Varianten im Pflugsohlenbereich zu und darunter wieder mehr oder weniger ab. Dies weist auf eine tiefreichende Bodenverdichtung hin. Die Vorbelastungswerte sind im Pflugsohlenbereich und im Unterboden als hoch oder sehr hoch nach der DVWK (1995) einzustufen. Unterschiede durch eine Befahrung sind hierbei deutlicher bei der Pflugvariante zu erkennen. Hill (1990) hat bei einem schluffigen Ton im Oberboden bei konservierender Bodenbearbeitung eine höhere Bodenstabilität gefunden als bei konventioneller Bodenbearbeitung. Im Unterboden hat Ehlers et al. (2000) an einem Lössstandort eine höhere Bodenstabilität bei der konventionellen Bewirtschaftung mit einer deutlich stark ausgeprägten Pflugsohle gefunden als bei konservierender. Wiermann (1998) und Farkas et al. (1998) fanden eindeutige Unterschiede an einem Lössstandort zwischen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung. Er hat

gezeigt, dass nachhaltige Veränderungen bei Bodenbearbeitungssystemen besonders im Unterboden auftreten und er hat die Aufmerksamkeit auf den schon stark verdichteten Pflugsohlenbereich der Pflugvariante gerichtet, wo selbst nach einer Belastung keine oder kaum Veränderungen nachgewiesen werden konnten. Seine Ergebnisse stimmen hinsichtlich der unterschiedlichen Bearbeitungssysteme mit der vorliegenden Arbeit überein.

Die Kohäsionswerte weisen auf unterschiedliche Behandlungsmaßnahmen hin, während der Winkel der inneren Reibung keine Aussagen zulässt. Semmel (1993) hat weder bei der Kohäsion noch bei dem Winkel der inneren Reibung Zusammenhänge mit den Bearbeitungsvarianten gefunden, da die Parabraunerde des Standortes (FAL Braunschweig) bereits vollständig überverdichtet war und auch der aktuelle Wassergehalt während der Versuchsjahre stets sehr niedrig war. Lebert (1989) hat dagegen unterschiedliche Werte für den Winkel der inneren Reibung gefunden, die mit zunehmender Strukturierung des Bodens erklärt wurden.

Die Vorbelastungen und Kohäsionen zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben verhalten sich bei allen Varianten und Tiefen ähnlich, außer bei der befahrenen Pflugvariante (vgl. Tabelle 4-9 und Tabelle 4-11). In 35 und 60cm Tiefe ist bei allen Varianten eine Pflugsohle und darunter ein stark verdichteter Unterboden, teilweise mit plattiger Bodenstruktur, vorhanden. Der Unterschied der Vorbelastung zwischen unbefahrener Pflug- und Mulchvariante deutet auf eine Regenerierung der Mulchvariante hin, was durch den Verzicht auf Pflugeinsatz begründet werden kann. Bei der Mulchvariante ist die ehemalige Pflugsohle und eine Unterbodenverdichtung, teilweise auch mit Plattengefüge, noch immer vorhanden, obwohl der letzte Pflugeinsatz über 10 Jahre zurück liegt. Nach einer Befahrung ändern sich die Stabilitätsparameter geringfügig bei der Mulchvariante. Dieses deutet darauf hin, dass sich die Mulchvariante elastischer gegen eine Befahrung verhält, wobei die Spannungen in tiefere Bereiche abgeleitet werden können, was wiederum eine Unterbodenverdichtung hervorruft. Wiermann (1998) und Semmel (1993) haben im Pflugsohlenbereich und teilweise im Unterboden Unterschiede zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben gefunden.

Horn (2004) berichtet über die Änderung der Stabilitätsparameter, wie Vorbelastung oder Kohäsion, bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung, dass drei Jahre nach erfolgter Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung Unterschiede in 30cm Tiefe bei der Vorbelastung gefunden wurden, während in 60cm Tiefe erst nach 8 Jahren differenzierter Bodenbearbeitung Unterschiede bei Vorbelastung und Kohäsion gefunden werden konnten. Voorhees und Lindstrom (1984) haben erst nach 5 Jahren Anwendung auf reduzierte Bearbeitung Unterschiede zu der konventionellen Bodenbearbeitung gefunden.

Nach einer Befahrung der Pflugvariante erwartet man eigentlich eine Erhöhung der Vorbelastung sofern noch kein Gleichgewicht zwischen Maschinendruck – Eigenstabilität vorliegt. In der vorliegenden Arbeit konnte sich die Vorbelastung auf Grund des stark vorverdichteten Pflugsohlenbereichs und Unterbodens nicht mehr weiter erhöhen, sondern der Boden wies einen Stabilitätsverlust auf. Bei der Pflugvariante führte der jährliche Pflugeinsatz und die jährliche Belastung mit den üblichen landwirtschaftlichen Geräten bereits zu einem stark ausgeprägten Pflugsohlenbereich und im Unterboden zu einer starken Verdichtung mit einer plattigen Struktur. Das ganze Bodenprofil scheint daher stabil zu sein.

Während der erstmaligen und bei weitem die Eigenstabilität überschreitenden einmaligen Belastung mit einem schweren Rübenrodebunker verändert sich der stark verdichtete Pflugsohlenbereich. Diese Änderung wurde mit den Quotienten der Vorbelastung zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben bewiesen (vgl. Tabelle 4-9) und deuten darauf hin, dass mit dieser Belastung (Überrollung mit Holmer Terra Dos) die Eigenstabilität erstmalig deutlich überschritten wurde. Folglich wird nach einer Befahrung mit Holmer Terra Dos bei der Pflugvariante ein in sich instabiles Bodengefüge zurückgelassen, während bei der Mulchvariante der tiefere Bodenhorizont (unter dem verbliebenen Pflugsohlenbereich) höher verdichtet vorliegt.

Hartge und Bohne (1983) haben den Einfluss der Gefügegeometrie auf die Verdichtbarkeit des Bodens untersucht und stellten fest, dass die vertikal orientierenden Poren eine geringere Verformung erlitten haben als die

horizontal liegenden Poren. Bei der Mulchvariante und der unbefahrenen Pflugvariante in den eigenen Versuchen haben die vertikal entnommenen Proben eine höhere Stabilität, was mit den Ergebnissen von Hartge und Bohne (1983) übereinstimmt. Werden jedoch die Stabilitätsparameter für die befahrene Pflugvariante bestimmt, so hat sich ein umgekehrtes Verhältnis der Komprimierbarkeit ergeben als es die Theorie vorgibt. Hier weisen die horizontal entnommenen Proben eine niedrigere Stabilität auf als die vertikalen Proben.

Was eigentlich bei der Pflugvariante geschehen ist, kann schematisch in Abbildung 4-35 dokumentiert werden: Durch eine Befahrung mit dem schweren Rübenrodebunker biegen sich die Platten zu Anfang durch und brechen auf Grund des nicht mehr vorhandenen elastischen Zustandes bei der Pflugvariante auf. Diese „Auflockerung“ führt zu unregelmäßig und ungleich großen und kleineren Bruchstücken, die bei nunmehr geringerer Biegesteifigkeit und Starrheit leichter in größere Tiefen abgeleitet werden können und dort zu zusätzlicher Komprimierung / Scherung führen, verbunden mit erneuter Ausbildung eines dichten Plattengefüges.

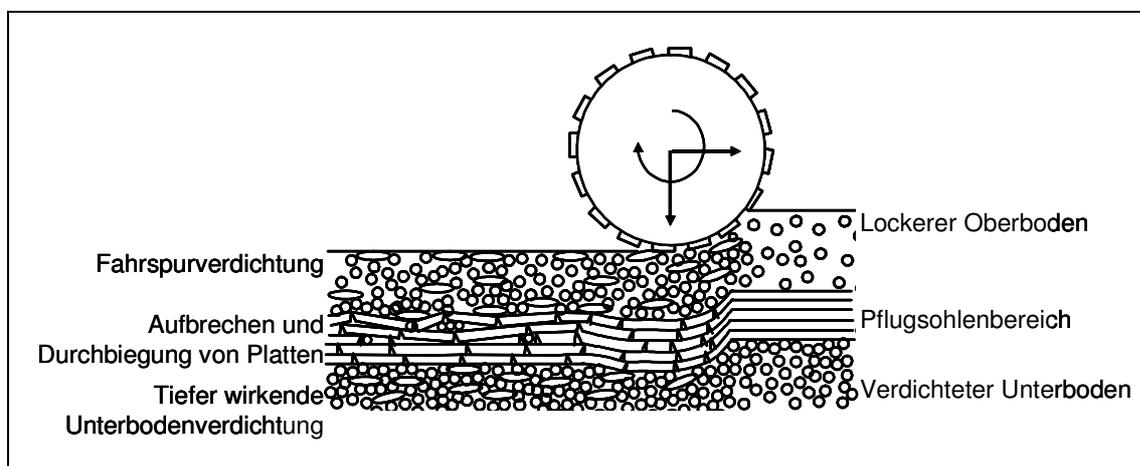


Abbildung 4-35 Schematische Darstellung des Aufbrechens von Platten im Boden

Kézdi (1973) hat bereits die Art und Weise der Zerstörung unter mechanisch befestigten Erdstraßen beschrieben. Hierbei wurde die mechanische Befestigung nur durch mechanische Verdichtung (ohne Zusatzstoffe!) induziert. Dies kann sinnbildlich auf die stark verdichtete Pflugsohle und den unteren

Bereich übertragen werden. Durch jahrzehntelangen Arbeitseinsatz mit Pflug und den üblichen mehr (Getreideerntemaschine ~15Mg) oder weniger (einreihig gezogene Rübenerntemaschine ~7Mg) schweren landwirtschaftlichen Maschinen wurde eine auflastabhängige Stabilisierung erreicht, die bei Überschreitung der Eigenstabilität durch schwere Maschinen zusätzlich deformiert wird.

Wenn die Festigkeit des Untergrundes für ein fahrendes Fahrzeug allerdings nicht ausreicht, wird die flexible, stark verdichtete Schicht bei räumlich begrenzter Belastung stark eingedrückt. Wenn aber die Durchbiegung der plattigen Bodenstruktur nicht mehr gewährleistet ist, um ein Spannungsgleichgewicht zu schaffen, wird dieser verdichtete Bodenhorizont in ungleichmäßig große Stücke zerbrochen (Kézdi, 1973). Der schon stark verdichtete Bodenhorizont, der eine einmalige statische Einwirkung der Radlast hätte gut widerstehen können, kann durch die knetende und vibrierende Wirkung der sich bewegenden Räder und bei den vergleichsweise größeren Kontaktflächendrücken und durch die kurzzeitige Wiederholung der Belastungen von Vorder- und Hinterrad verstärkt und sogar schneller zerstört werden.

Wird eine vertikal und horizontal entnommene stabile Plattenstruktur verdichtet, ergibt sich bei den vertikalen Proben eine größere Porenzifferänderung als bei den horizontal entnommenen Proben. Die horizontal stehenden Platten sind gegen eine Belastung stabiler. Wenn hingegen eine „aufgelockerte“ Plattenstruktur aus vertikaler und horizontaler Richtung entnommenen Proben belastet werden, können die im Stechzylinder horizontal stehenden Bruchstücke eine Auflast nicht mehr aushalten und das ganze System kollabiert. Die vertikal entnommenen Proben mit „aufgelockerten“ Platten erleiden eine geringere Verformung nach einer Belastung und die Porenziffer bleibt schließlich höher als bei den horizontal entnommenen Proben.

4.3 Bedeutung der Wasserspannung auf die Stabilität an gestörten/homogenisierten und an ungestörten Bodenproben

Nachfolgend wird die Bedeutung der Wasserspannung bzw. die Auswirkung unterschiedlicher Auflastzeiten auf die Stabilität bei gestörten und ungestörten Bodenproben beschrieben.

4.3.1 Gestörte/Homogenisierte Bodenproben

4.3.1.1 Drucksetzungsverhalten als Funktion der Belastungsdauer

Bei einer Belastung nimmt die Bodenhöhe ab, damit erhöht sich gleichzeitig die Lagerungsdichte. Bei jeder applizierten Auflast tritt zu Beginn eine schnelle Setzung auf, während mit der Zeit die Zeitsetzungskurve dann abflacht. Je länger die Proben belastet werden, desto stärker setzt sich der Boden (Abbildung 4-36).

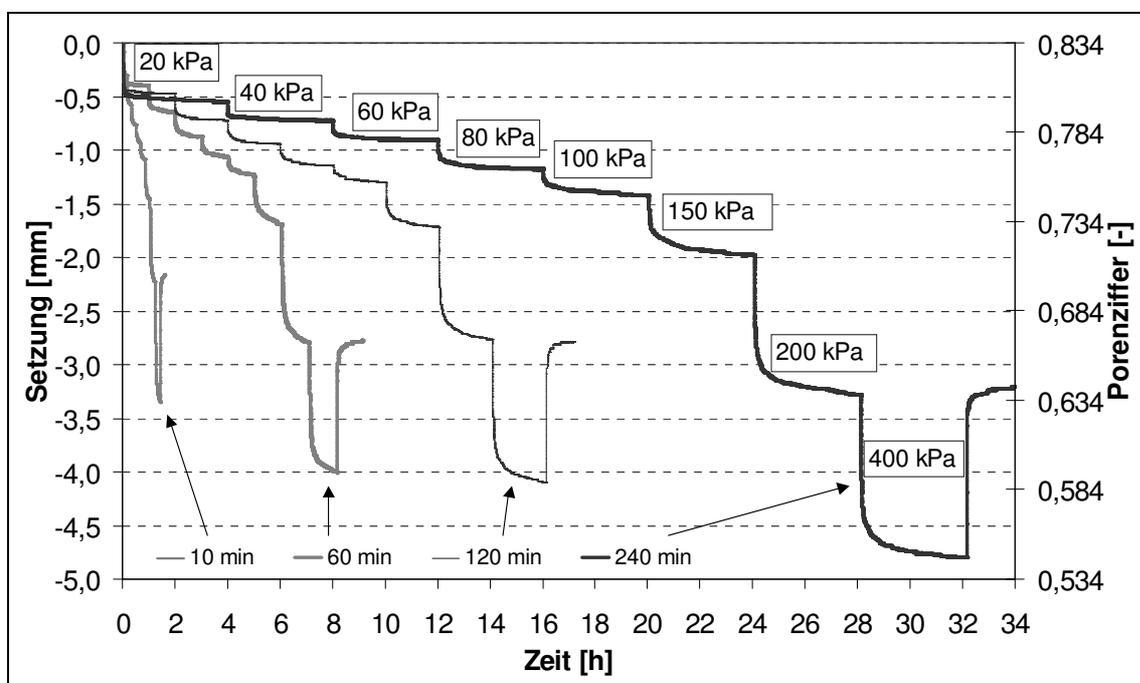


Abbildung 4-36 Setzungsverläufe bei unterschiedlichen Auflastzeiten pro Druckstufe während der Drucksetzungsversuche

Außerdem tritt bei einer Belastung aufgrund der abnehmenden Porenziffer eine entsprechende Mobilisierung des Wassers durch Änderung der Form der Wassermenisken und in Abhängigkeit von der Wasserleitfähigkeit auch eine Wasserbewegung ein, die bei den verschiedenen Auflastzeiten unterschiedlich ausgeprägt ist (Abbildung 4-37). Wenn das Porenwasser aufgrund der hydraulischen Bedingungen nicht in dem Maße abfließen kann, wie es entsprechend der Bodenstabilität bzw. der zu erwartenden Bodendeformation eigentlich erfolgen müsste, dann muss auch das Porenwasser einen Teil der Auflast tragen. Demzufolge findet man nach der Lastaufbringung zu Beginn einen Anstieg des Porenwasserdruckes, während im Verlauf der Belastung bei niedrigen Auflasten zuerst eine erneute Abnahme zu verzeichnen ist. Bei höheren Auflasten sinkt der Porenwasserdruck nicht mehr mit der Belastungsdauer, sondern steigt insgesamt stärker an. Außerdem ist mit steigender Belastungsdauer die Änderung des Porenwasserdruckes bei definierter Auflast deutlicher ausgeprägt.

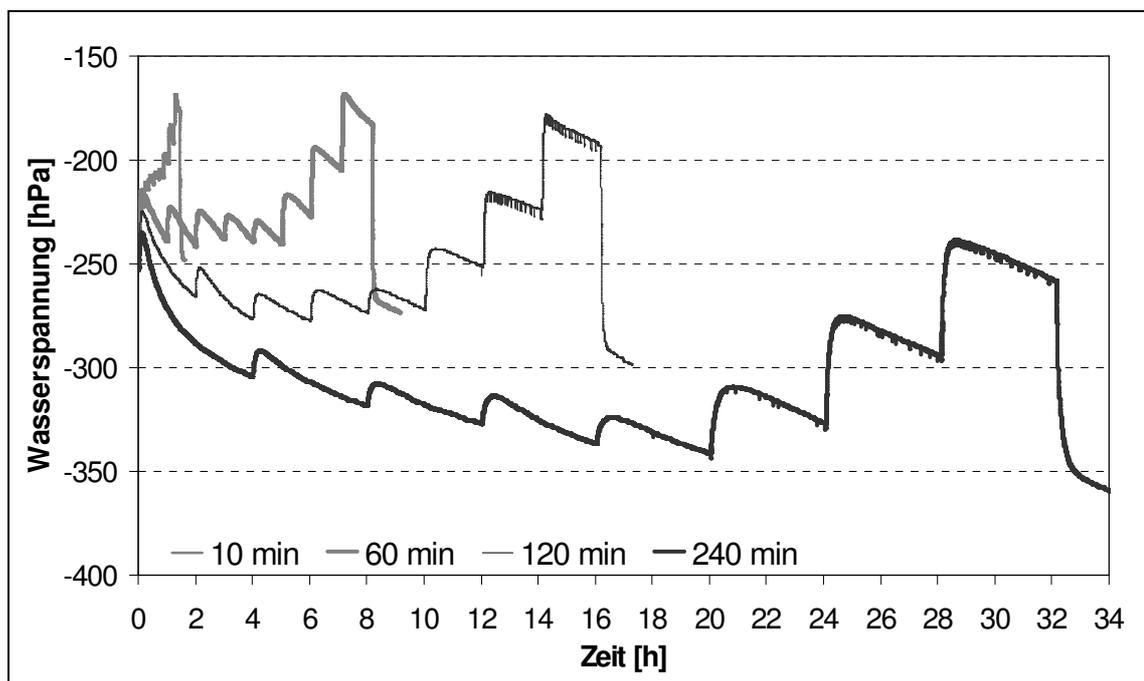


Abbildung 4-37 Wasserspannungsverläufe bei unterschiedlichen Auflastzeiten pro Druckstufe während der Drucksetzungsversuche

4.3.1.2 Porenwasserdruckänderung mit der Auflast und Zeitdauer der Belastung

Die Unterschiede in der Wasserspannung im Verlauf der Setzung bei konstanter Auflast zeigen Abbildung 4-38 und Abbildung 4-39.

Der Porenwasserdruckunterschied im Verlauf einer konstanten Belastung wird dabei wie folgt berechnet:

$$\Delta\psi_1 = \psi_{i,\max} - \psi_{i,\text{anfang}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

wobei $\psi_{i,\max}$ der größte Porenwasserdruck während der Belastung und $\psi_{i,\text{anfang}}$ der ursprüngliche Porenwasserdruck zu Beginn der Belastung ist.

Bei kleinen Auflasten konnte kein deutlicher Unterschied $\Delta\psi_1$ in Abhängigkeit von der Auflastzeit nachgewiesen werden (Abbildung 4-39), während bei höheren Auflasten steigt hingegen $\Delta\psi_1$ mit der Auflastzeit an.

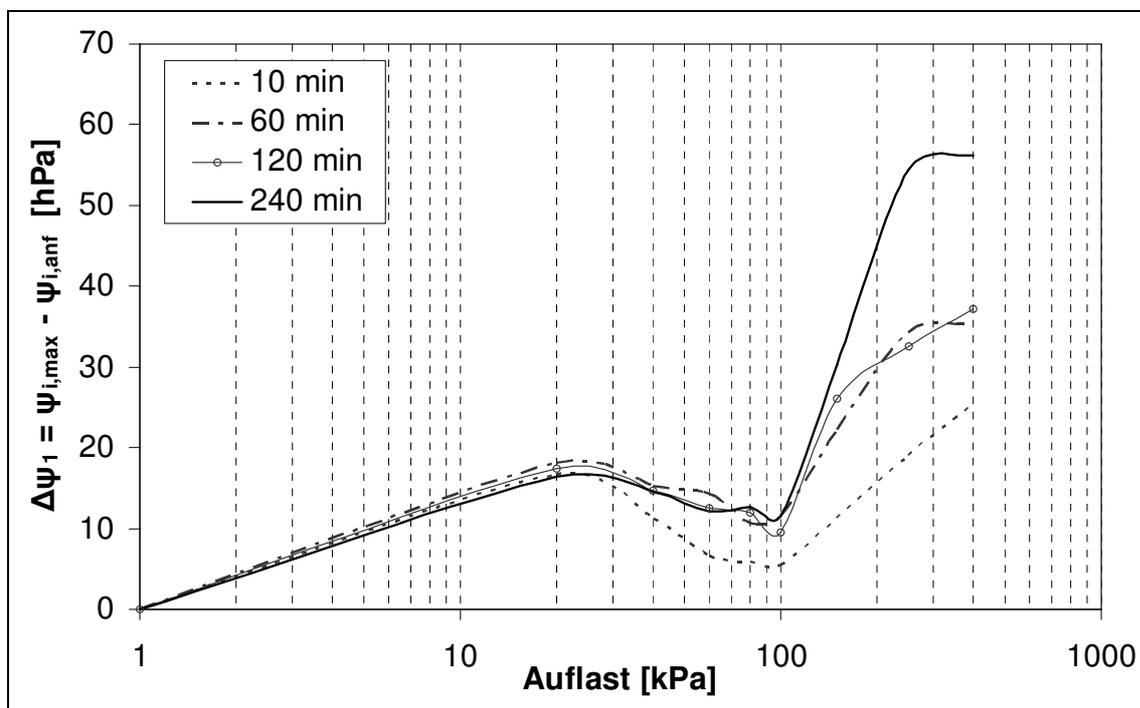


Abbildung 4-38 Wasserspannungsunterschiede ($\Delta\psi_1$) zwischen Maximal- und Anfangswert der jeweiligen Auflaststufen als Funktion der Zeit während der Abfolge der Auflaststufen

Außerdem ist aus dem in Abbildung 4-37 dargestellten Verlauf der Porenwasserdruckänderung zu entnehmen, dass der Unterschied $\Delta\psi_2$ zwischen der maximalen und der Endwasserspannung während einer Auflaststufe deutlicher ausgeprägt ist als bei $\Delta\psi_1$. $\Delta\psi_2$ wird dabei wie folgt definiert:

$$\Delta\psi_2 = \psi_{i,\max} - \psi_{i,\text{end}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

wobei $\psi_{i,\text{end}}$ der Porenwasserdruck zum Ende der Belastung ist.

Während bei einer Auflastzeit von 10 min/Druckstufe die Unterschiede noch sehr gering sind, können bei längeren Auflastzeiten größere Unterschiede dokumentiert werden (Abbildung 4-39).

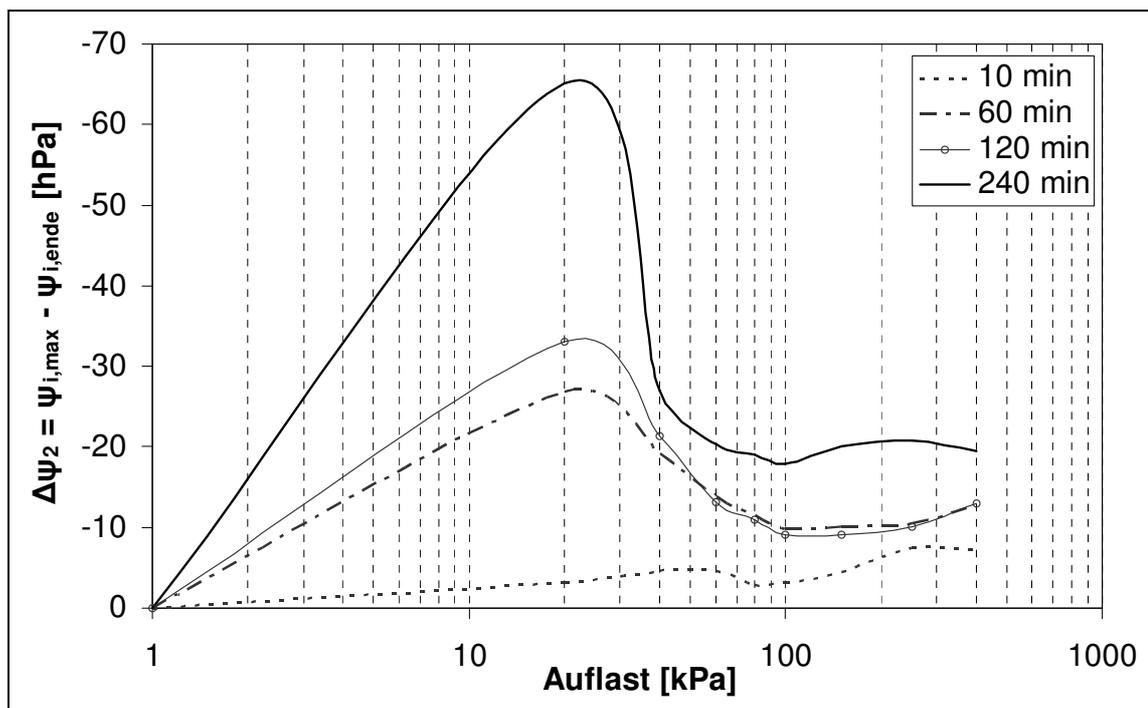


Abbildung 4-39 Wasserspannungsunterschiede ($\Delta\psi_2$) zwischen Maximal- und Endwert der jeweiligen Auflaststufen als Funktion der Zeit während der Abfolge der Auflaststufen

Den Vergleich der Drucksetzungskurven und der entsprechenden Änderungen der Porenwasserdrücke am Ende einer Auflaststufe zeigt Abbildung 4-40. Man erkennt, dass die Kurvenverläufe der Porenziffer und der Porenwasserdrücke bei gegebener Auflast als Funktion der Zeit einen vergleichbaren Verlauf mit entgegengesetzten Steigungen aufweisen.

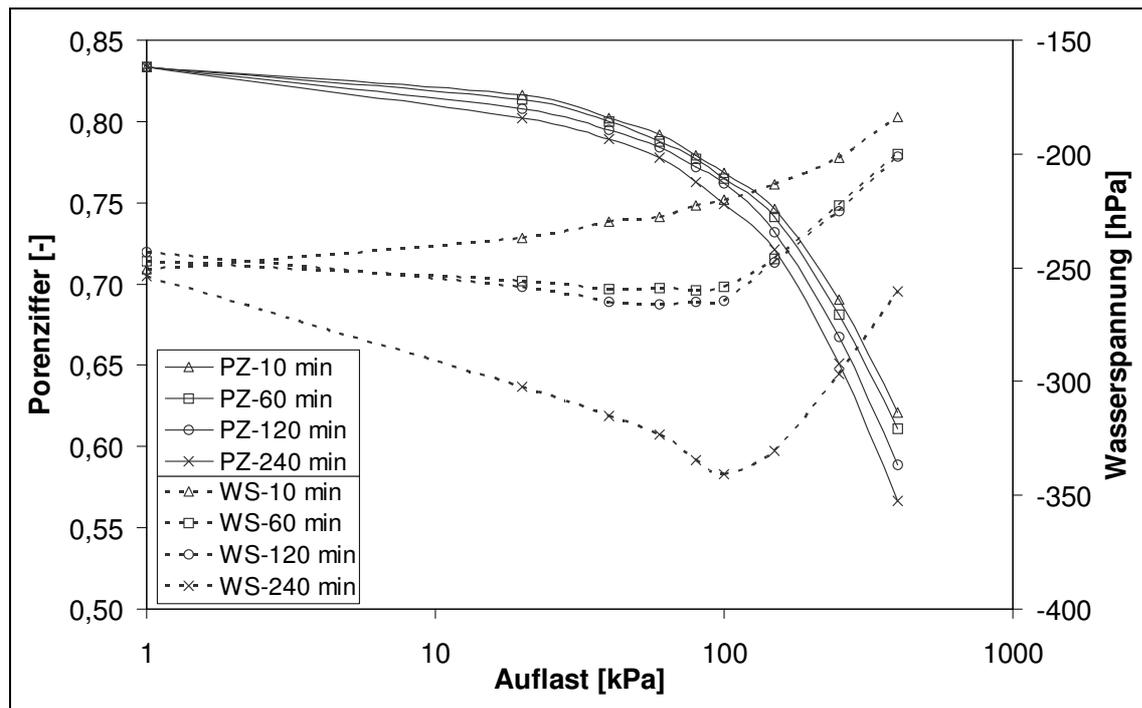


Abbildung 4-40 Wasserspannungs- und Porenzifferverläufe bei definierten Auflasten als Grundlage für die Vorbelastungsbestimmung

4.3.1.3 Ermittlung der Vorbelastung und des Umkehrpunktes der Wasserspannungs- und Auflastzeitbeziehung

Errechnet man aus den Drucksetzungskurven den Wert der Vorbelastung, so ergeben sich unterschiedlich große Werte. Parallel zur größten Krümmung nimmt die Vorbelastung mit zunehmender Auflastzeit ab. (Abbildung 4-41)

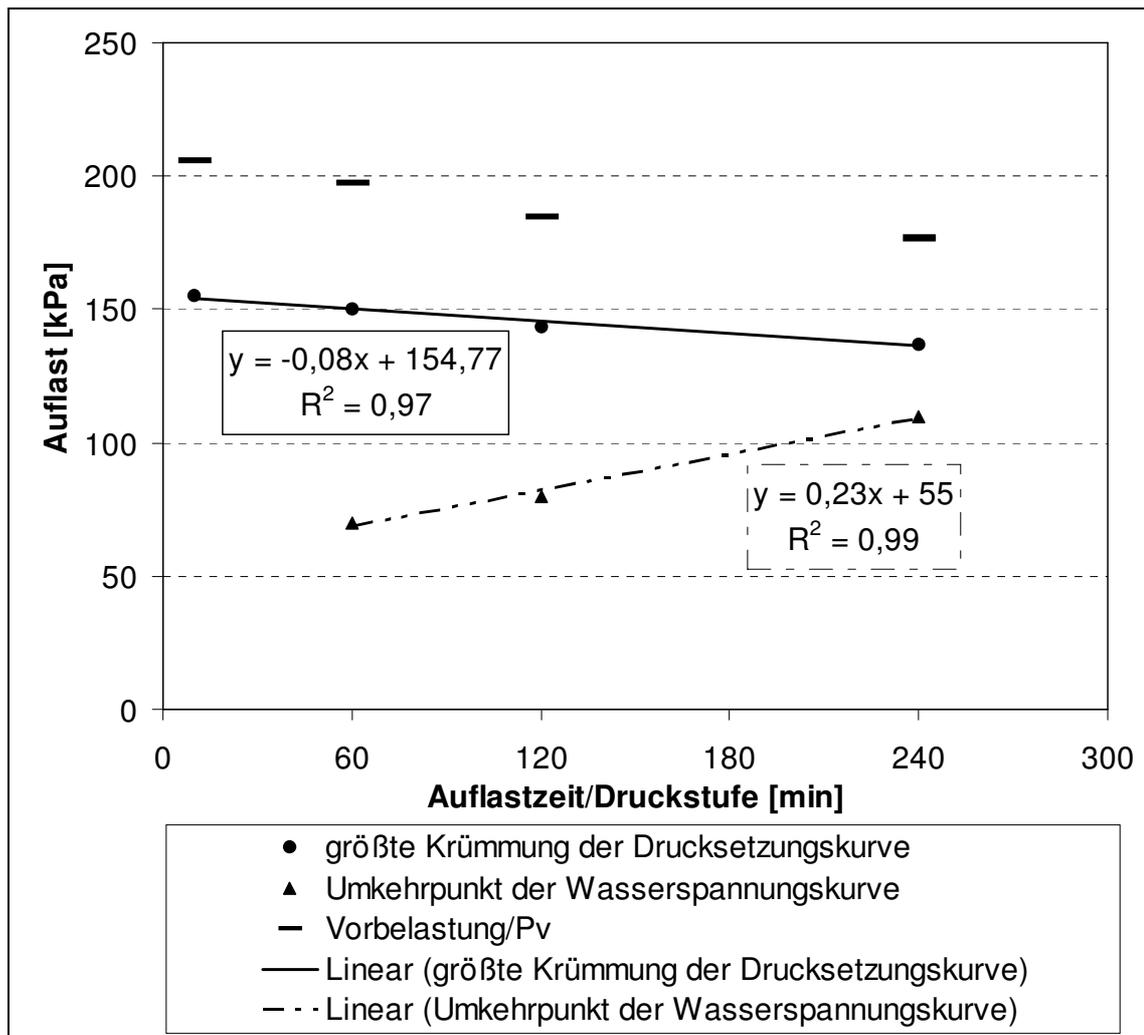


Abbildung 4-41 Änderung der Vorbelastung und des Umkehrpunktes der Wasserspannungs-/Auflastbeziehung als Funktion der Belastungsdauer

Berücksichtigt man außerdem den durch Anpassung einer polynomischen Kurve an die Wasserspannungskurve (Abbildung 4-40) abgeleiteten Umkehrpunkt des Wasserspannungsverlaufes, so zeigt sich Folgendes: Die Umkehrpunkte der Wasserspannungskurven nähern sich mit zunehmender Auflastzeit pro Druckstufe der aus der Drucksetzungskurve errechneten größten Krümmung. Die Umkehrpunkte der Wasserspannungskurven und die größten Krümmungen der Drucksetzungskurven weisen lineare Beziehungen zur Auflastzeit auf, die sich bei längerer Auflastzeit in der Auflastzeit „t“ schneiden müssten (Abbildung 4-41).

4.3.2 Ungestörte Bodenproben

4.3.2.1 Drucksetzungsverhalten und Porenwasserdruckänderung als Funktion der Belastungsdauer

Das Drucksetzungsverhalten wurde an ungestörten Bodenproben vom Versuchsstandort Harste an der Tschernosem-Parabraunerde des Probenahmeterrmins November 2002 erfasst. Hierbei wurden als Auflastzeit je Auflaststufe 10 und 120min benutzt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt und ihre Auswirkungen auf die Prozesse in der Bodenmatrix erläutert, ohne auf die Betrachtung der Bearbeitungsvarianten einzugehen.

Die Abbildung 4-42 zeigt schematisch die typischen Porenwasserdruckänderungen während eines Belastungsvorganges. Hierbei verläuft die Wasserspannungskurve a) während der Zusammendrückung des Bodens mit steigenden Auflasten in Richtung positiver Werte (=Porenwasserüberdruck). In einigen Fällen werden sogar positive Werte erreicht, was gleichbedeutend mit einem gesättigten Zustand im Boden ist. Solche Wasserspannungsverläufe wurden hauptsächlich bei kürzeren Auflastzeiten (10min) beobachtet, wo der durch die Belastung hervorgerufene Porenwasserdruck je nach Verdichtungsgrad in einem kurzen Zeitraum während einer Auflaststufe nicht entweichen konnte.

Da in diesem Fall die Wasserspannungskurve keinen Umkehrpunkt aufweist, wird der durch die neu aufgebraachte Auflast induzierte Porenwasserdruck zum schon existierenden Porenwasserdruck aufsummiert. Dies bedeutet, dass die gewählte Auflastzeit zur Bestimmung des Druck- und Zeitsetzungsverhaltens der Bodenprobe nicht für den Verdichtungsgrad des Bodens geeignet ist. Dadurch erhält man aufgrund der Inkompressibilität des Wassers aus der Drucksetzungskurve höhere Vorbelastungswerte.

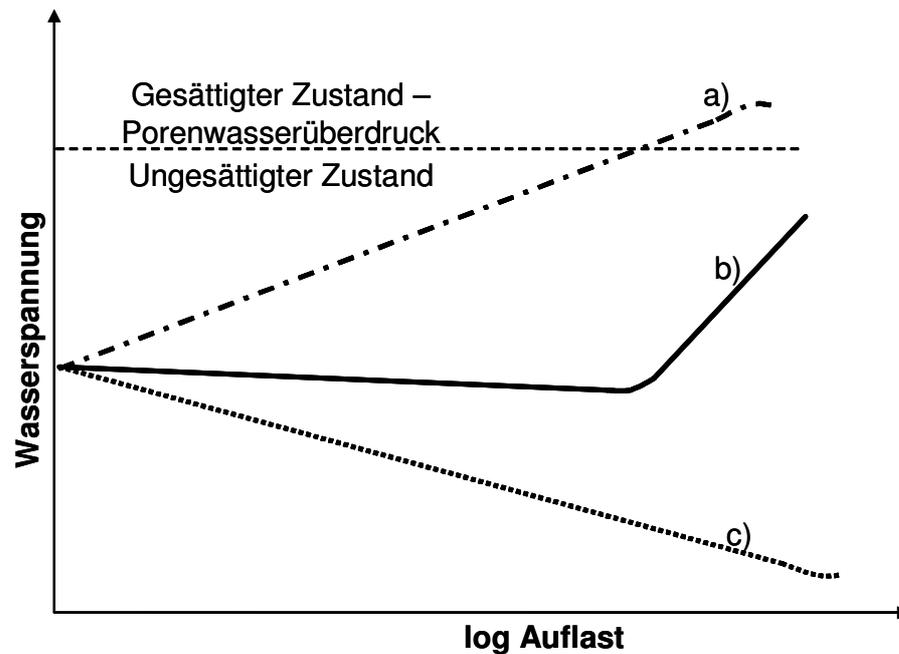


Abbildung 4-42 Exemplarischer Verlauf der Wasserverspannungen während des Drucksetzungsversuches im Ödometer

Wenn die untersuchten Böden besonders stabil sind und außerdem noch über luftführende Poren verfügen, sinkt die Wasserverspannung während der Kompression so lange weiter, bis ein Stabilitätsverlust eintritt (Abbildung 4-42, c). Solche Wasserverspannungsverläufe kann man besonders bei den hoch verdichteten Bodenproben, wie z.B. bei der stark plattigen Pflugsohle, beobachten. Gleichzeitig ist die Vorbelastung extrem hoch und der Wasserverspannungsverlauf weist nur bei sehr hohen Auflasten eine tendenzielle Änderung auf. Würde man über die am höchsten gewählte Auflaststufe eine noch höhere Auflaststufe wählen, würde man bei einer längeren Auflastzeit (120min) wahrscheinlich auch einen Umkehrpunkt der Wasserverspannung finden, der sich auch in einem erhöhten Vorbelastungswert widerspiegelt.

Eine Zwischenstellung mit Kurvenverlauf b) in der Abbildung 4-42 zeigt, dass die Wasserverspannung bis zu einer bestimmten Auflast abnimmt oder konstant bleibt und danach weniger negative Wasserverspannungswerte erzeugt. In einigen Fällen erreicht die Wasserverspannung der höchsten Auflaststufe sogar einen gesättigten Zustand. Bei einem solchen Kurvenverlauf kann man den minimalen Porenwasserdruck dort finden, wo ein Umkehrpunkt in der Kurve zu erkennen ist. Dieser typische Wasserverspannungskurvenverlauf lässt sich vorrangig dann nachweisen, wenn längere Auflastzeiten gewählt werden, da sich der

Porenwasserdruck im elastischen Bereich der Drucksetzungskurve einregeln kann, während im plastischen Bereich der Verformung das mobilisierte Porenwasser keinen Platz mehr im Porenraum hat, sich der aufgebrachten Spannung anzupassen.

4.3.2.1.1 Vergleich der Wasserspannungsverläufe zwischen gestörten und ungestörten Bodenproben

Werden die Wasserspannungsverläufe während der Belastung an gestörtem und ungestörtem Boden miteinander verglichen, so zeigt die Abbildung 4-43, dass die Bodenzusammendrückung zu einer ähnlichen Änderung des Porenwasserdruckes führt, wobei aber darauf hingewiesen werden muss, dass die Ausgangswasserspannung nicht identisch war. Je nach dem Aggregierungszustand können die Werte voneinander abweichen. Bei kürzerer Auflastzeit (10min) findet man weder bei gestörtem noch bei ungestörtem Boden einen eindeutigen Umkehrpunkt der Wasserspannungskurve. Erst bei längeren Auflasten (120min) kann man sowohl bei gestörtem als auch bei ungestörtem Boden eine tendenzielle Änderung der Wasserspannung in Form des Umkehrpunktes nachweisen.

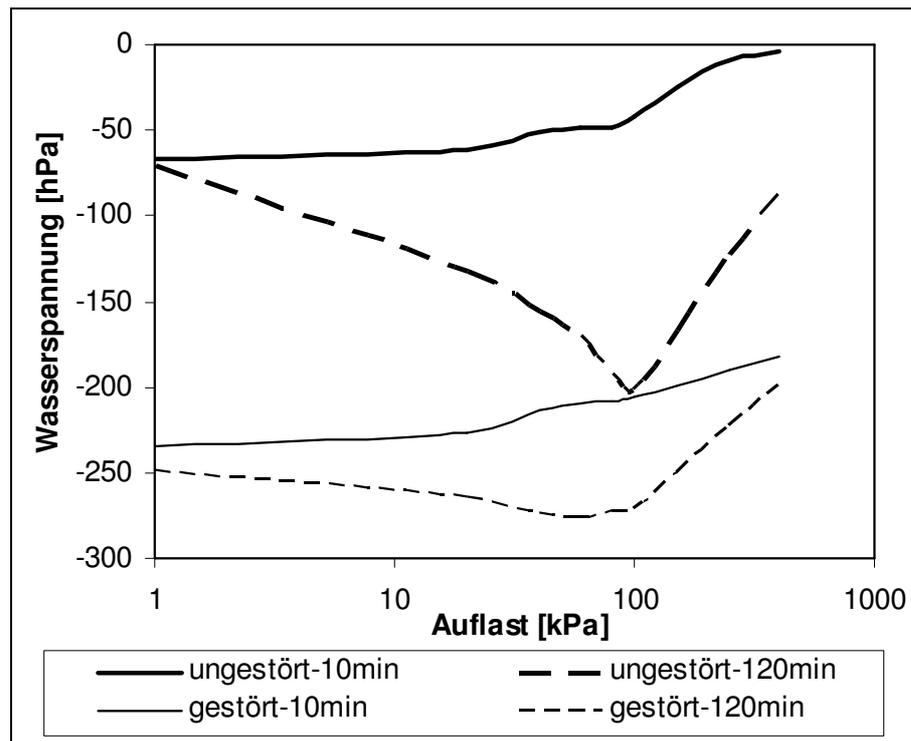


Abbildung 4-43 Wasserspannungsverläufe bei 10min und 120min pro Auflaststufe an gestörten und ungestörten Bodenproben (die Kurven der ungestörten Proben sind repräsentativ für 1Mb12cm im Nov. 2002)

4.3.2.2 Auswertung der Vorbelastung und des Umkehrpunktes der Wasserspannungskurve bei unterschiedlichen Auflastzeiten

Im Folgenden wird die Analyse der einzelnen Messwerte für die Vorbelastung und für die Wasserspannungskurve mit dem Umkehrpunkt bei 10 und 120min/Auflaststufe an natürlich gelagerten, aggregierten Boden vorgestellt.

Die Regressionen der berechneten Vorbelastungswerte und der Umkehrpunkte der Wasserspannung aller untersuchten Stechzylinderproben des Probenahmetermins November 2002 sind in der Abbildung 4-44 dargestellt.

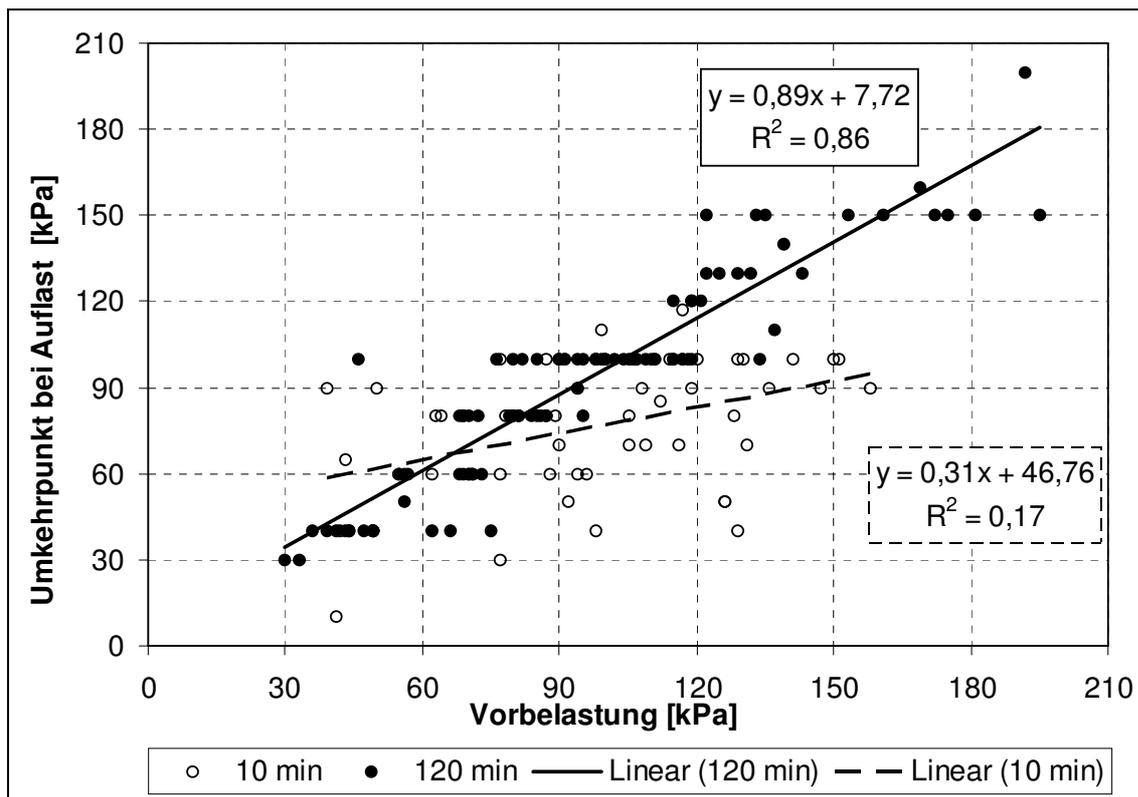


Abbildung 4-44 Beziehung zwischen Vorbelastung und Umkehrpunkt der Wasserspannungskurve während des Drucksetzungsvorgangs in Abhängigkeit von der Auflastzeit pro Auflaststufe (im Nov. 2002)

Die Bodenproben, die mit kurzer Auflastzeit (10min) pro Auflaststufe belastet wurden, zeigen einerseits eine größere Streuung zwischen Vorbelastung und Umkehrpunkt der Wasserspannung, andererseits konnte man hier nicht immer einen Umkehrpunkt in der jeweiligen Wasserspannungskurve finden, der als Merkmal für den Stabilitätsverlust herangezogen werden sollte. Dies wird besonders deutlich, wenn man die einzelnen Messwerte betrachtet, denn bei nur 52% aller Stechzylinderproben, die mit 10min/Auflaststufe belastet wurden, konnte man einen Umkehrpunkt feststellen. Ansonsten verliefen die Wasserspannungskurven nach dem Kurvenverlauf a) aus der Abbildung 4-42.

Die lineare Anpassung zwischen Vorbelastung und Umkehrpunkt der Wasserspannungskurve bei der kurzen Auflastzeit zeigt eine schwache Beziehung ($R^2=0,17$). Es spricht dafür, dass der Porenwasserdruck bei der kürzeren Auflastzeit nicht entweichen konnte und die Auflast von Anfang an vom Porenwasser getragen wurde. Dies bedeutet eine

Verdichtungsempfindlichkeit bei abnehmenden Wasserbindungskräften zwischen den Partikeln.

Bei den Bodenproben, die mit längerer Auflastzeit (120min) pro Auflaststufe belastet wurden, konnte man bei allen Stechzylinderproben einen Umkehrpunkt finden. Dies beweist, dass sich der Porenwasserdruck während der aufgetragenen Auflast abbauen konnte bzw. einem neuen Gleichgewicht entgegenstrebt. Zwischen Vorbelastung und Umkehrpunkt besteht eine positive lineare Regression mit einem höheren R^2 -Wert von 0,86. Werden die einzelnen Werte der längeren Auflastzeit aus der Abbildung 4-44 betrachtet, so entspricht die Auflaststufe mit dem Umkehrpunkt annähernd dem Vorbelastungswert.

Würde man um den Vorbelastungswert herum eine engere Abstufung der Auflaststufen wählen, so ließe sich eine genauere Auflaststufe mit dem Umkehrpunkt der Wasserspannung feststellen, welche näher zum Vorbelastungswert tendiert. Somit könnte man in der Abbildung 4-44 eine bessere lineare Beziehung zwischen Umkehrpunkt der Wasserspannungskurve und Vorbelastung bei 120min Auflastzeit pro Auflaststufe erreichen.

Um die Unterschiede zwischen den mit unterschiedlichen Auflastzeiten pro Auflaststufe berechneten Vorbelastungswerten zu veranschaulichen, wurde der Koeffizient zwischen den Werten der Vorbelastung bei 10 und 120min berechnet:

$$K_{P_v} = \frac{P_{v_{10\text{min}}}}{P_{v_{120\text{min}}}} \quad \text{Gl. 4-3}$$

Hierbei bedeutet P_v die Vorbelastungswerte bei unterschiedlichen Auflastzeiten, K_{P_v} ist der berechnete Koeffizient aus diesen Vorbelastungen.

Ein Koeffizient kleiner als 1 bedeutet, dass die Vorbelastungswerte mit 120min Auflastzeit pro Druckstufe größer sind als mit 10min. Wenn dieser größer als 1 ist, besagt es, dass die Vorbelastungen mit 10min Auflastzeit pro Druckstufe größer sind. Die Koeffizienten variieren mit einer Abweichung zwischen $\pm 25\%$, je nach Aggregierungszustand, der durch Bearbeitungs- bzw. Behandlungseffekte beeinflusst wird (Abbildung 4-44).

Im Oberboden der befahrenen Flächen sind die Koeffizienten größer als 1, da hier die Bodenaggregate durch den Schlupf geknetet und zusammengepresst wurden. Unterhalb der Pflugsohle, wo der Horizont eine stark verdichtete, plattige Bodenstruktur aufweist, ist der Koeffizient kleiner als 1, da in diesem Fall durch die plattige Struktur eine zügige Wasserableitung verhindert wird. Im Unterboden liegen die Werte größer als 1 mit Ausnahme der unbefahrenen Pflugvariante.

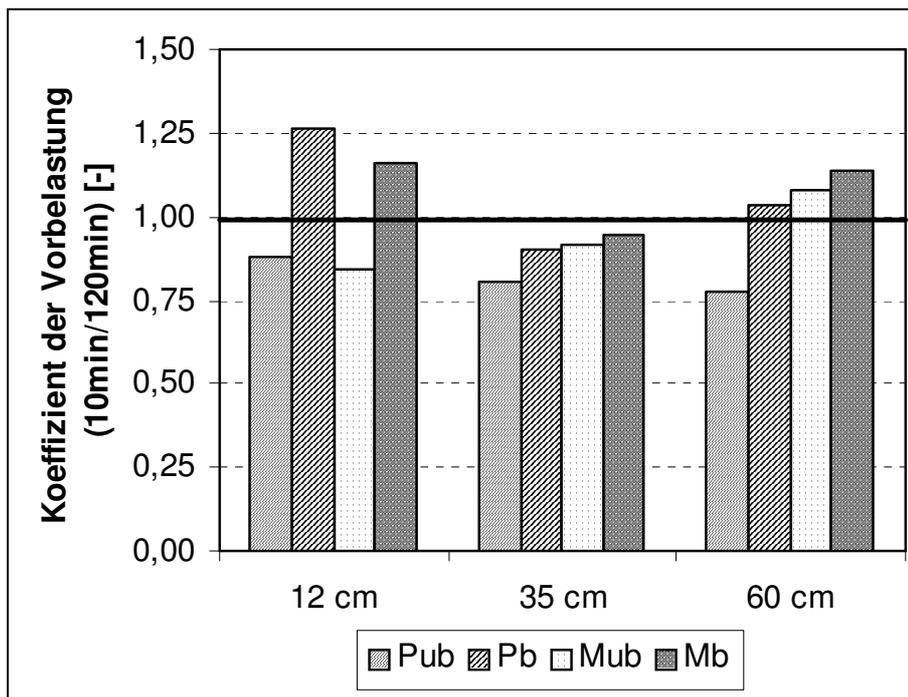


Abbildung 4-45 Koeffizient der Vorbelastung zwischen 10 und 120min Auflastzeit pro Auflaststufe (im Nov. 2002)

Aus der Abbildung 4-45 kann folglich abgeleitet werden, dass Bodenhorizonte mit zerknieteten Aggregaten nicht nur instabiler sind, sondern das Porenwasser verstärkt mobilisiert wird. Dabei fällt auch auf, dass selbst bei einer längeren Auflastzeit (120min) das Porenwasser noch einen Teil der Auflast aufnimmt und damit eine schnelle Porenwasserdruckänderung erfolgt. Bodenhorizonte mit weniger oder noch nicht zerstörten Aggregaten weisen eine intakte Porenfunktion auf. Hier baut sich erst später ein Porenwasserdruck durch den Belastungsvorgang auf; die Bodenmatrix bleibt stabiler.

4.3.2.3 Berücksichtigung des Porenwasserdruckes bei der Bestimmung der Vorbelastung - effektive Spannung

Durch den Drucksetzungsvorgang ändert sich der Porenluft- und Porenwasserdruck. Folglich werden die Spannungskomponenten im Bodeninneren nach der Art der Spannungsübertragung differenziert. Da im Boden am häufigsten Mehrphasensysteme (drei Phasen) auftreten, wird im Folgenden die Bedeutung der Wasserspannung bei der Berechnung der Vorbelastung anhand der effektiven Spannungsgleichung für den Probenahmetermin November 2003 beschrieben.

Um die effektive Spannung zu berechnen, benötigt man bei einem Dreiphasensystem den χ -Faktor und den Porenwasserdruck. Der Sättigungsgrad kann gravimetrisch bestimmt werden.

Abbildung 4-46 zeigt exemplarisch an ungestörten Stechzylinderproben aus unterschiedlichen Varianten den aktuellen Wassergehalt nach der 2-stündigen Lastaufbringung und anschließend nach der 2-stündigen Entlastung. Da die Proben während des Versuchs mit Folie vor Verdunstung geschützt waren, wurde eine Wassergehaltsänderung nur durch Wasserableitung über die beidseitig vorhandenen Sintermetallplatten verursacht. Bei jeder induzierten Lastaufbringung nimmt der gravimetrische Wassergehalt des Bodens ab, wobei eine signifikante Beziehung zwischen Auflast und gravimetrischem Wassergehalt im Boden besteht (Abbildung 4-46). Je nach Variante und Verdichtungsgrad variieren die Regressionen; jedoch liegt R^2 bei allen Varianten über 0,75. Nach der Entlastung des Bodens bleibt der gravimetrische Wassergehalt gleich oder steigt etwas an, da das entlastete erhöhte Porenvolumen des Bodens aus den Sintermetallplatten wieder Wasser aufnehmen kann.

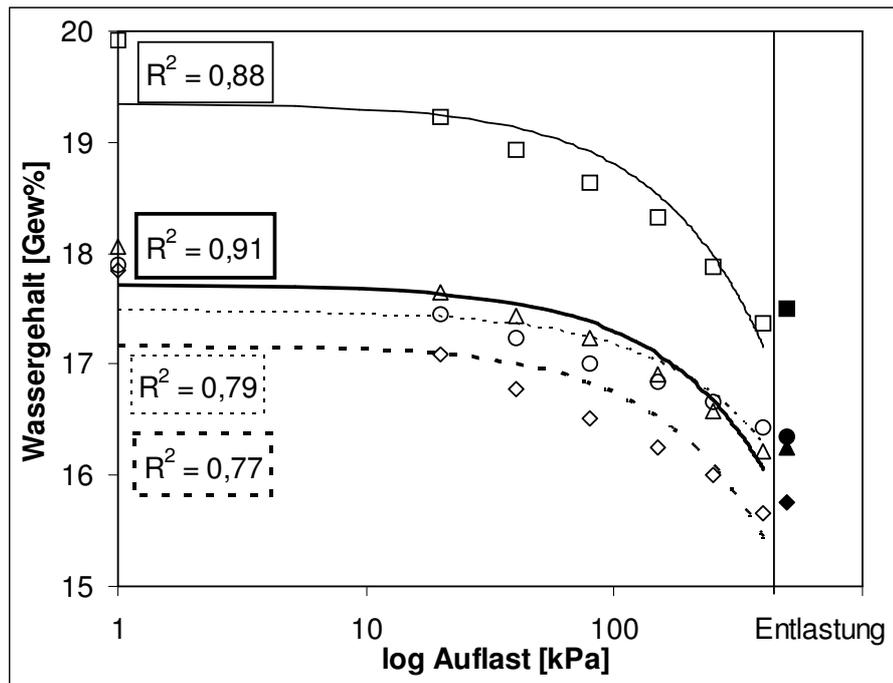


Abbildung 4-46 Exemplarischer gravimetrischer Wassergehaltsverlauf während des Drucksetzungsvorgangs bei 4 unterschiedlichen ungestörten Bodenproben

Betrachtet man den gravimetrischen Wassergehalt der Sintermetallplatten, die die Stechzylinderproben von oben und unten ummantelt haben, und den Wassergehalt der Bodenprobe als ein System, so veranschaulicht die Abbildung 4-47, dass der gravimetrische Wassergehalt im ganzen System während der Belastung konstant bleibt und somit die Sintermetallplatten als Wasserzweischenspeicher dienen.

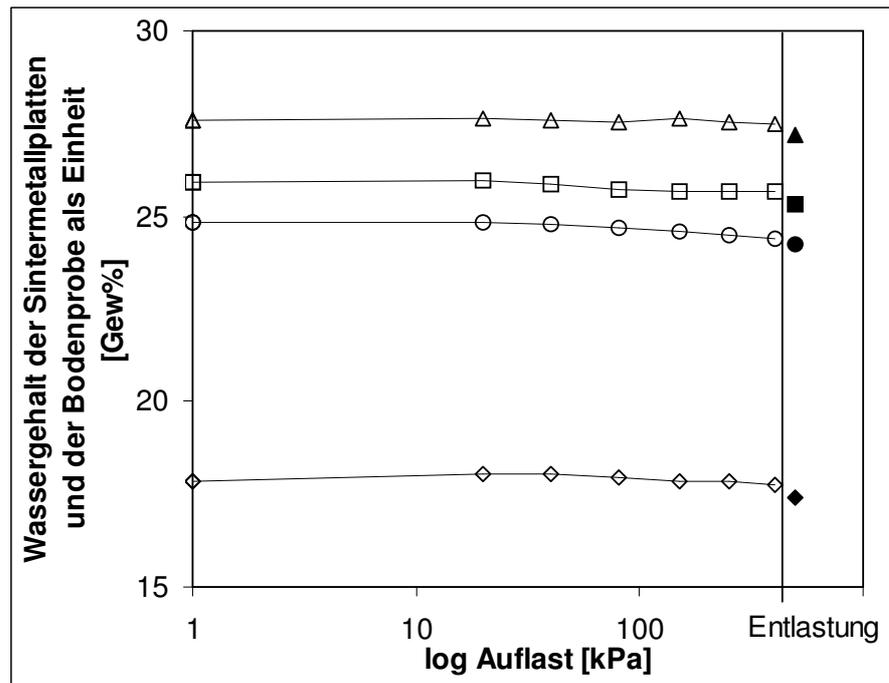


Abbildung 4-47 Wassergehalt der Sintermetallplatten und des Bodens sind als ein geschlossenes System anzusehen

Wenn man annimmt, dass sich der gravimetrische Wassergehalt im ganzen System nicht ändert (siehe Abbildung 4-47), so ist es möglich, den χ -Faktor nach allen Auflaststufen auszurechnen und in der effektiven Spannungsgleichung zu berücksichtigen. Bei allen Varianten wurden die Vorbelastungswerte mit Normalspannung und mit effektiver Spannung, also mit Berücksichtigung der Wasserspannung, errechnet. Während des Belastungsvorgangs blieb die Wasserspannung bei fast allen Varianten negativ. Dies bedeutet, dass sich der Boden in den meisten Fällen im ungesättigten Zustand befand. In seltenen Fällen wurde ein gesättigter Zustand während des Drucksetzungsversuchs nur bei der höchsten Auflaststufe (400kPa) erreicht.

Die Drucksetzungskurven einer Bodenprobe mit Berücksichtigung nur der Normalspannung bzw. der effektiven Spannung mit und ohne Berücksichtigung des χ -Faktors wird in der Abbildung 4-48 gezeigt. Bei allen drei Drucksetzungskurven kann man den bekannten Wieder- und Erstverdichtungsast definieren. Unterschiede ergeben sich bei der Neigung der beiden Äste, die dementsprechend andere Vorbelastungswerte ergeben.

Die unterschiedlichen Neigungen der Wieder- und Erstverdichtungsäste werden zwischen den dargestellten Drucksetzungskurven mit Normalspannungen und bei Berücksichtigung der effektiven Spannungen deutlich. Bei der Kurve mit Normalspannungen ergibt sich ein flacher Wiederverdichtungsast, wohingegen bei den beiden Kurven mit effektiven Spannungen steilere Neigungen auftreten. An den Erstverdichtungsästen der drei Drucksetzungskurven können Linien mit derselben Neigung angelegt werden. Unterschiede in den mit unterschiedlichen Spannungen berechneten Vorbelastungswerten hängen in diesen Fällen hauptsächlich von der Neigung des Wiederverdichtungsastes ab.

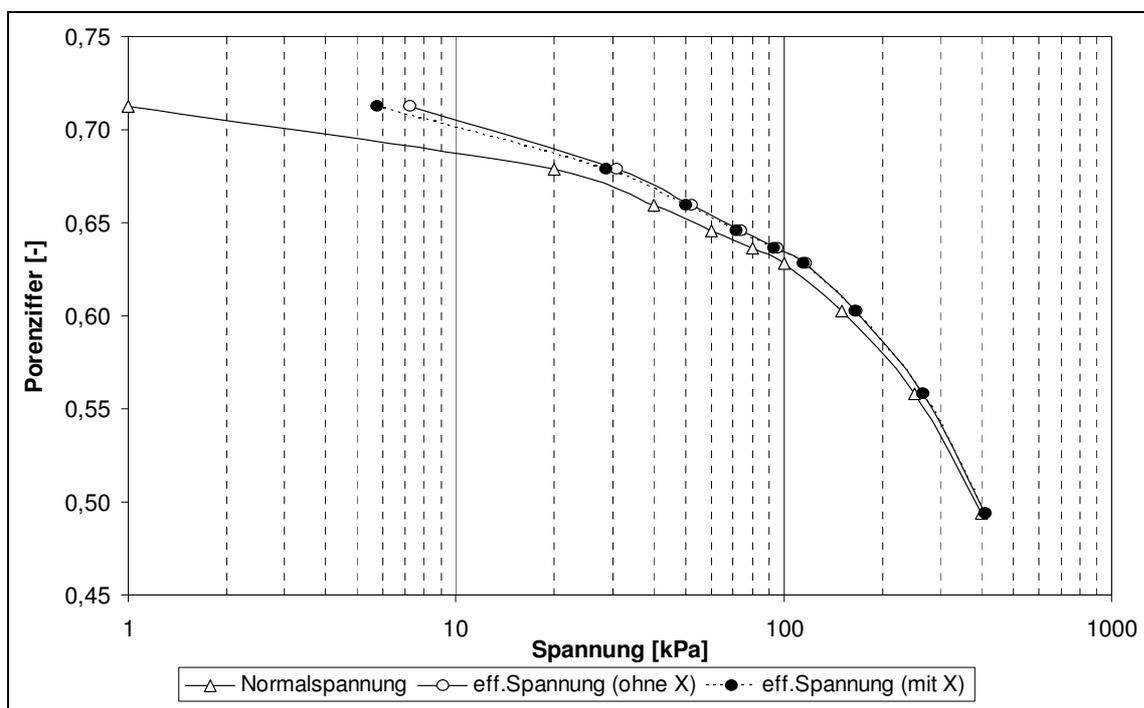


Abbildung 4-48 Zur Vorbelastungsbestimmung benötigte Drucksetzungskurven mit Normalspannung und effektiver Spannung (mit und ohne χ) (als Beispiel V1Mb40 im Nov. 2003)

Um die Wichtigkeit der Porenwasserdrücke im Boden zu verdeutlichen, ist der Zusammenhang der einzelnen Messwerte zwischen den Vorbelastungswerten mit Normalspannungen und mit effektiven Spannungen ohne Berücksichtigung des χ -Faktors in der Abbildung 4-49 dargestellt.

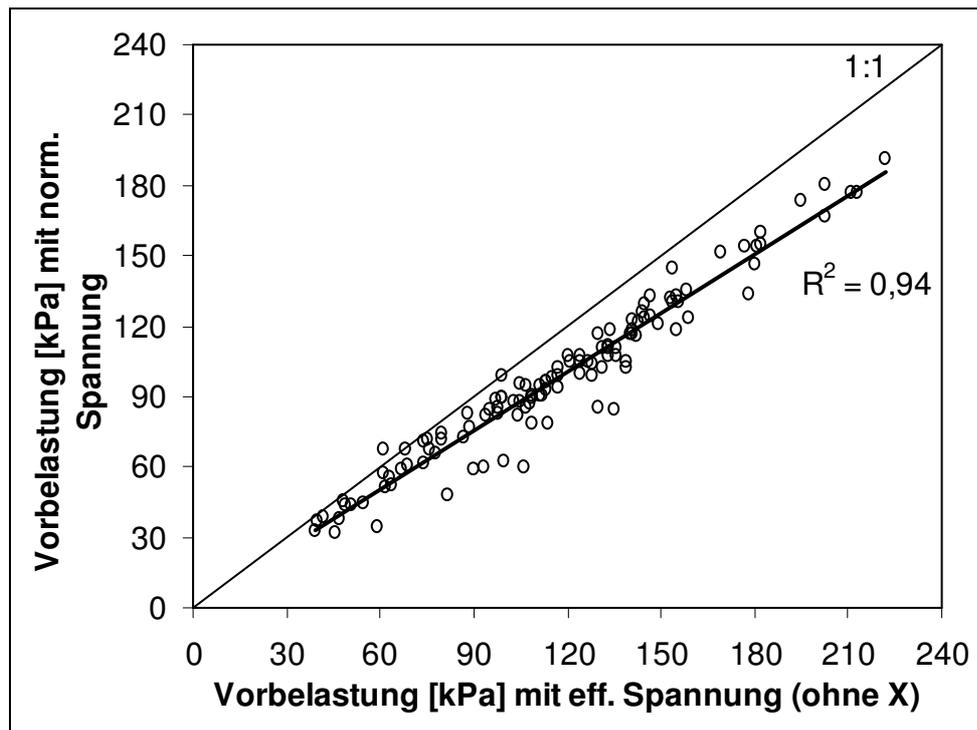


Abbildung 4-49 Beziehung zwischen den berechneten einzelnen Vorbelastungswerten auf der Grundlage der Gesamt(Normal)speannung und der effektiven Spannung (ohne χ) (im Nov. 2003)

Abbildung 4-49 zeigt, dass eine lineare Anpassung zwischen den Vorbelastungswerten mit Normalspeannung und mit effektiver Spannung (ohne χ) eine sehr hohe Regression aufweist. Die gemessenen Werte liegen alle unterhalb der $R^2=1$ Linie, also die mit effektiver Spannung berechneten Vorbelastungswerte sind stets größer als die mit Normalspeannung berechneten Vorbelastungswerte.

Abbildung 4-50 stellt die Beziehung zwischen den Werten der Vorbelastungen dar, die mit effektiver Spannung mit und ohne χ -Faktor berücksichtigt wurden, wobei der χ -Faktor den Sättigungsgrad des Bodens bedeutet, der nach dem Drucksetzungsversuch bei den jeweiligen Stechzylinderproben gravimetrisch bestimmt wurde. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei den hier ausgewerteten Datensätzen der χ -Faktor als weitere Korrekturgröße in der effektiven Spannungsgleichung vernachlässigt werden kann (im Zusammenhang der späteren ökologischen Beurteilung der Bearbeitungsmaßnahmen).

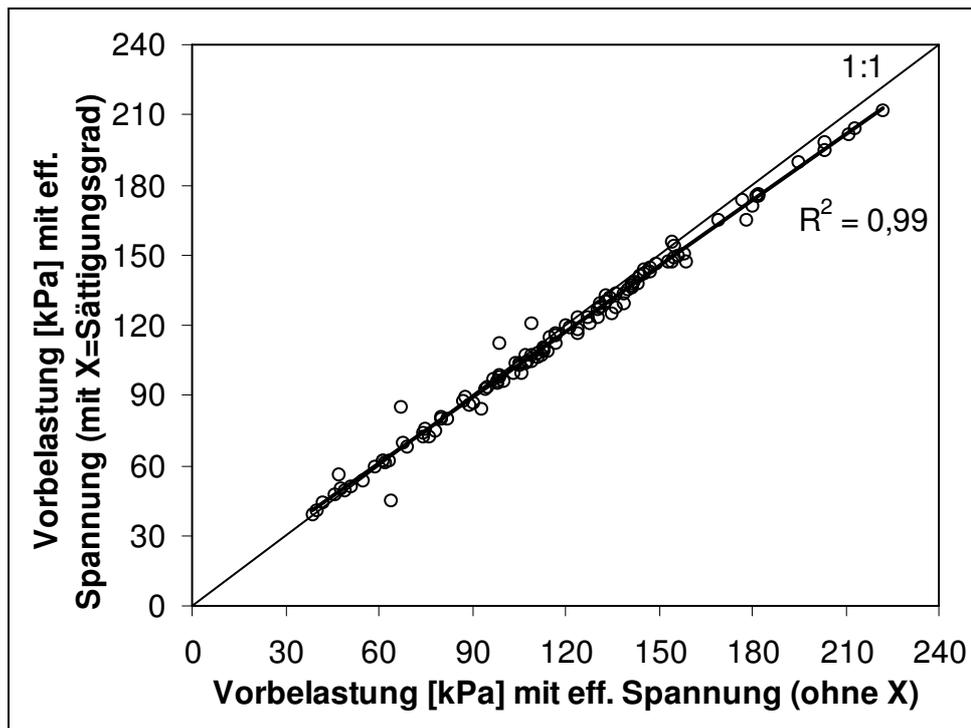


Abbildung 4-50 Beziehung zwischen den ausgerechneten einzelnen Vorbelastungswerten mit effektiver Spannung unter Berücksichtigung des Sättigungsgrades (mit χ -Faktor) und der effektiven Spannung (ohne χ -Faktor) (im Nov. 2003)

4.3.2.4 Die Auswirkung unterschiedlicher Entwässerungsstufen auf die Bodenstabilität bei ungestörten Bodenproben

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen der Bodenstabilität bei den -60hPa und -300hPa entwässerten Bodenproben aus dem Probenahmetermin April 2002 dargestellt.

Die mit -60hPa entwässerten Bodenproben ergaben niedrigere Vorbelastungswerte als nach einer Entwässerung auf -300hPa. Je negativer die Saugspannung desto stabiler wird der Boden (Abbildung 4-51).

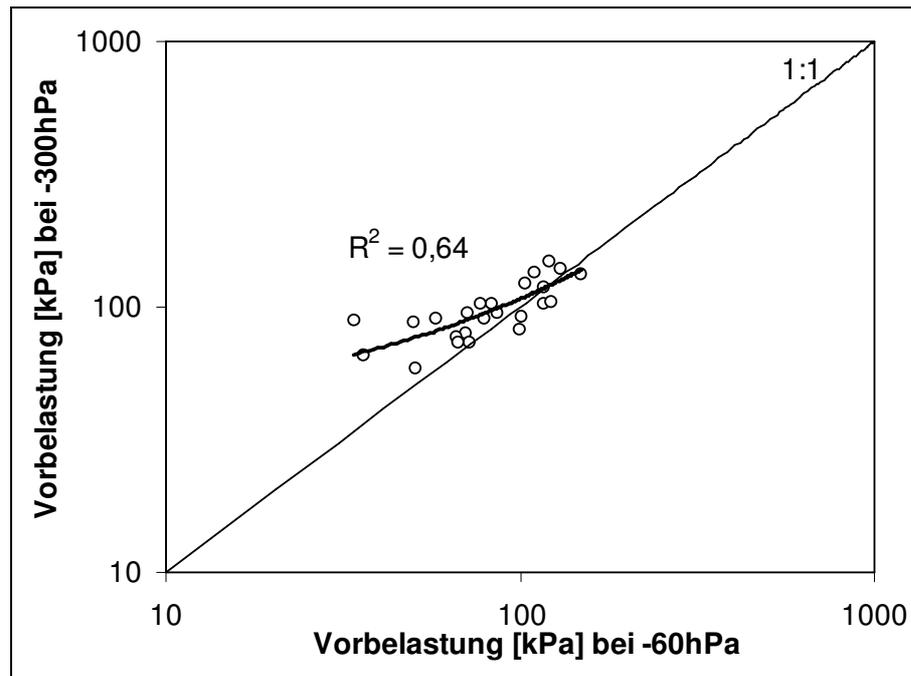


Abbildung 4-51 Beziehung zwischen den Vorbelastungswerten bei Entwässerungen von -60hPa und -300hPa bei allen Varianten und Tiefen (im April 2002)

Die Bedeutung der unterschiedlichen Entwässerungsstufen lässt sich anhand von Scherversuchen zusätzlich verdeutlichen, da hier besonders bei der dynamischen Belastung die Meniskenkräfte stärker zur Bodenstabilisierung beitragen, als bei einer statischen Belastung.

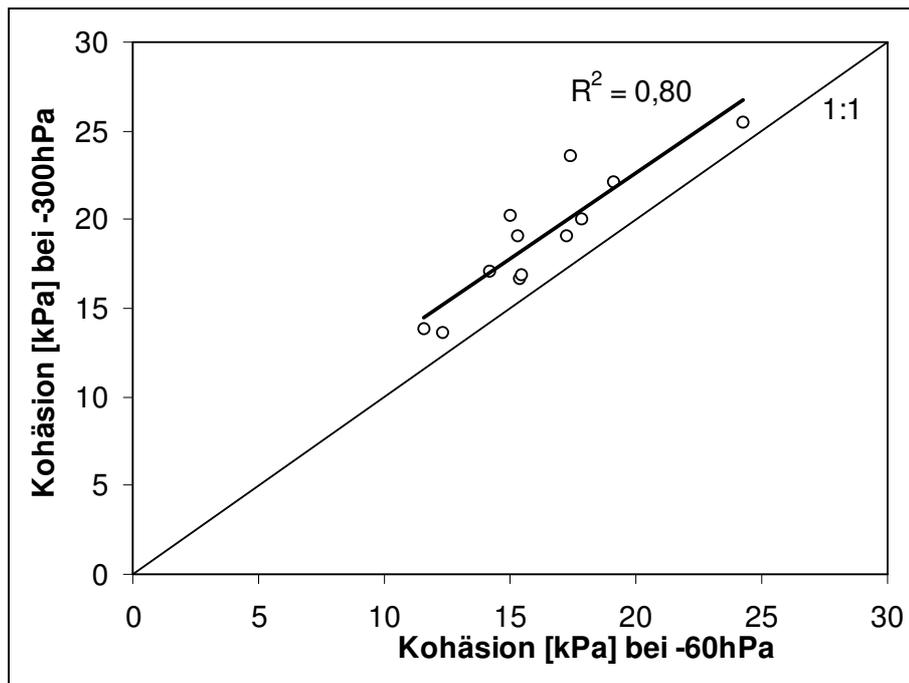


Abbildung 4-52 Beziehung zwischen den Kohäsionswerten bei Entwässerungen von -60hPa und -300hPa (im April 2002)

Die Kohäsionswerte (Abbildung 4-52) weisen ähnliche Tendenzen auf wie die Vorbelastungswerte (Abbildung 4-51). Mit zunehmenden Entwässerungsstufen erhöhen sich die Kohäsionswerte. Zwischen den bei -60hPa und -300hPa entwässerten Proben liegt bei der Kohäsion eine lineare Beziehung mit einem hohen R^2 vor.

4.3.3 Diskussion zur Bedeutung der Wasserspannung auf die Stabilität an gestörten/homogenisierten und an ungestörten Bodenproben

Jede mechanische Belastung führt stets zu einer Neuordnung der festen, flüssigen und gasförmigen Phase von Böden. Es kommt zu einer Mobilisierung der zwischen den einzelnen Bodenpartikeln maximalen Scherwiderstände, wobei ebenfalls die Bindungskräfte der verschiedenen Phasen mit beansprucht werden.

Während der Belastung des Bodens ändert sich das Volumen der Bodenprobe und das gesamte Porenvolumen verringert sich. Die Aggregate werden zu Beginn der Kompression näher aneinander gepresst, wodurch ein feineres Porensystem geschaffen wird. Mit abnehmender Porengröße werden zuerst die

luftgefüllten Poren zusammengepresst und der Anteil der engen Grob- und Mittelporen steigt, bevor bei höheren Auflasten dann der Anteil der Mittel- und Feinporen auch abnimmt. Mit der Porengrößenänderung ändert sich auch der Porenwasserdruck.

Jede Setzung durch eine mechanische Belastung und damit Abnahme der Porenziffer erfolgt zeitabhängig, wobei die einhergehende Mobilisierung des Bodenwassers den Verlauf der Zeitsetzung deutlich verzögern kann (Kézdi, 1964). Wenn nämlich während einer Belastung luftgefüllte, grobe Poren zusammengepresst und damit entsprechend dem vorherigen Entwässerungsgrad eigentlich noch wassergesättigt sein müssten, dann kommt es durch Umverteilung des in der Probe vorhandenen Bodenwassers zu einer weiteren Absenkung des Porenwasserdruckes, der wiederum abhängig von der herrschenden Wasserleitfähigkeit des Bodens ist. Prinzipiell bedeutet dies aber auch, dass die in der Bishop-Gleichung (Bishop, 1961) definierte effektive Spannung σ' steigt und der Boden damit fester wird.

Wenn hingegen aufgrund der Abnahme des Porensystems und gleichzeitiger weiterer Aufsättigung der ehemals luftgefüllten Hohlräume der Porenwasserdruck zunimmt (d.h. weniger negativ wird), dann wird der Wassermeniskus flacher, bis schließlich bei Wassersättigung das Wasser keine durch die Meniskenkräfte hervorgerufene Bodenstabilisierung mehr bewirkt. Damit treten in dem unter Auflast stehenden Boden nunmehr zwei Prozesse auf, die sehr wesentlich von der jeweiligen Wasserleitfähigkeit und den hydraulischen Gradienten geprägt werden.

Wenn aufgrund der zunehmenden Wassersättigung der Boden labiler wird, bedeutet dies gleichzeitig eine zunehmende Bodendeformation (Abbildung 4-41 und Abbildung 4-45). Gleichzeitig sinkt entsprechend dem Hagen-Poiseuille'schen Gesetz aber auch die durch den geringeren Querschnitt der Poren transportierbare Wassermenge. Folglich wird ein Teil der aufgetragenen Auflast nunmehr solange von der flüssigen und gleichzeitig inkompressiblen Wasserphase getragen, wie das mobilisierte Wasser nicht abgeleitet werden kann. Baumgartl (1991) fand heraus, dass je nach Bodengefügeform unterschiedliche Porenwasserdrücke (=weniger negative Wasserspannungen)

auftreten können (siehe dazu auch bei ungestörten Boden die Abbildung 4-45) und dadurch die Parameter der effektiven Spannungsgleichung eine Funktion des Strukturierungsgrades sind. Die Wiedereinstellung des Gleichgewichtes des Porenwasserdrucks verläuft folglich schnell bei kleineren Auflasten, da hier die Wasserleitfähigkeit noch nicht so deutlich reduziert wurde, während bei höheren Auflasten der Ausgangszustand erst später oder wie im vorliegenden Fall gar nicht wieder erreicht wird. Die Wasserleitfähigkeit ist somit im Vergleich zur abzutransportierenden Wassermenge zu gering. Dies steht auch in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Larson und Gupta (1980b) sowie Horn et al. (1995a;b).

Es ist auch bemerkenswert, dass die zeitabhängige Porenwasserdruckänderung während der Belastung bei geringen Auflasten vollständiger erfolgte als bei höheren Auflasten. Außerdem besteht gleichzeitig eine direkte Beziehung zur Belastungsdauer, was aus dem theoretischen Verlauf der k/ψ - Beziehung und deren Abhängigkeit von der mechanischen Belastung abgeleitet werden kann (Baumgartl und Horn, 1999). Während die Zeitfunktion des Wasserflusses allgemein bekannt ist, sollte nochmals darauf verwiesen werden, dass mit zunehmender Auflast die gesättigte Wasserleitfähigkeit deutlich abnimmt, während die auch für vorliegende Proben zutreffende ungesättigte Wasserleitfähigkeit um ein Vielfaches steigen kann (Horn et al., 1995b). Somit ist auch die zusätzliche Austrocknung durch Wasserableitung bei den längeren Belastungszeiten erklärbar.

Das Auftreten von weniger negativen Porenwasserdrücken ist eng gekoppelt an das Setzungsverhalten, selbst wenn es etwas eher einsetzt als dem Vorbelastungswert entspricht. Generell kann man postulieren, dass in ungesättigten Böden im Bereich der Wiederverdichtung eher negativere oder konstante Porenwasserdrücke auftreten, und erst im Bereich der Erstverdichtung der Sättigungsgrad von Böden bei gleichem gravimetrischem Wassergehalt steigt. Der Umkehrpunkt an der Wasserspannung-Auflast/Zeitkurve zwischen „trockenem“ und „feuchtem“ Ast kennzeichnet somit auch einen weiteren Aufweichungs-, d.h. Destabilisierungsprozess in Böden (Fazekas und Horn, 2005).

Einen Ansatz zur Quantifizierung des durch gekoppelte hydraulische und mechanische Prozesse induzierten Bodendeformationsvorganges bietet der direkte Vergleich der linearen Beziehungen des Umkehrpunktes der Wasserspannung und der Vorbelastung (Abbildung 4-41). Beide haben nämlich einen theoretischen Schnittpunkt, der durch die Auflastzeit definiert werden kann, an der die hydraulischen und mechanischen Spannungen im Boden in ihrer Wirkung gleich zu beurteilen sind. Diese „Schere“ zwischen den beiden Linien könnte ein Maß für die Strukturstabilität darstellen. Dieser Gedankenansatz muss aber in noch weiteren Untersuchungen an unterschiedlich texturierten und aggregierten Böden überprüft werden.

Die Stabilitätsänderung spiegelt sich also im Wasserspannungsverlauf während der Beanspruchung des Bodens wider. In der vorliegenden Arbeit weisen die Wasserspannungsänderungen während der Belastung, als Merkmal für die Stabilitätsänderung, bei natürlich, aggregierten Boden eine deutlich ausgeprägte Meniskenwirkung auf, während sie bei gestörten, homogenisierten Boden weniger ausgeprägt ist (vgl. Abbildung 4-43). Die Aggregation ist also ein entscheidender Faktor bei der Bodenstabilität. Horn und Lebert (1994) zeigten, dass die aggregierten Böden eine höhere Stabilität und damit eine andere Meniskenform aufweisen, als homogenisierte, gestörte Böden. Ihre Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen der Untersuchungen des Wasserspannungsverlaufs während der Kompression bei homogenisierten und aggregierten Böden überein.

Die unterschiedlichen Entwässerungsstufen rufen unterschiedlich starke Meniskenkräfte zwischen den Bodenteilchen hervor, die eine Auswirkung auf die Bodenstabilität haben. Die Meniskenkräfte halten die Bodenteilchen zusammen, damit erhöht sich der Widerstand des Bodens gegen eine von außen einwirkende Kraft (Kézdi, 1964). Generell gilt, dass trocknende Böden stabiler sind als feuchte Böden. Horn und Lebert (1994) zeigten, dass mit Erhöhung der Aggregation im Bodenprofil und mit Erhöhung der Wasserspannung (stärker negativ), sich der Wert der Vorbelastung erhöht, wobei sie in ihren Ergebnissen nur einen geringfügigen Unterschied zwischen Vorbelastungswerten bei -60 und -300hPa Entwässerungsstufe bei einem

Luvisol im AI Horizont fanden. Larson et al. (1980b) haben an unterschiedlichen Böden festgestellt, dass die Steigung der Erstverdichtungskurve der Drucksetzungskurve in einem Entwässerungsbereich bis -700hPa vom Wassergehalt unabhängig ist. Salire et al. (1994) fanden ähnliche Ergebnisse wie Larson et al (1980b); sie haben in ihren Untersuchungen die Stabilität zwischen -300 und -3000hPa untersucht, aber sie konnten in diesem Bereich keine Stabilitätsänderungen feststellen. Die hier genannten Autoren konnten jedoch bei der Stabilität eine Abhängigkeit von der Bodenstruktur feststellen (Kohärent < Prismen < Platten). In der vorliegenden Arbeit zeigen die Vorbelastungswerte bei unterschiedlichen Entwässerungsstufen von -60 und -300hPa (siehe Abbildung 4-51) eher eine Abhängigkeit von Aggregation, die weniger vom Entwässerungsgrad beeinflusst ist (siehe Abbildung 4-53).

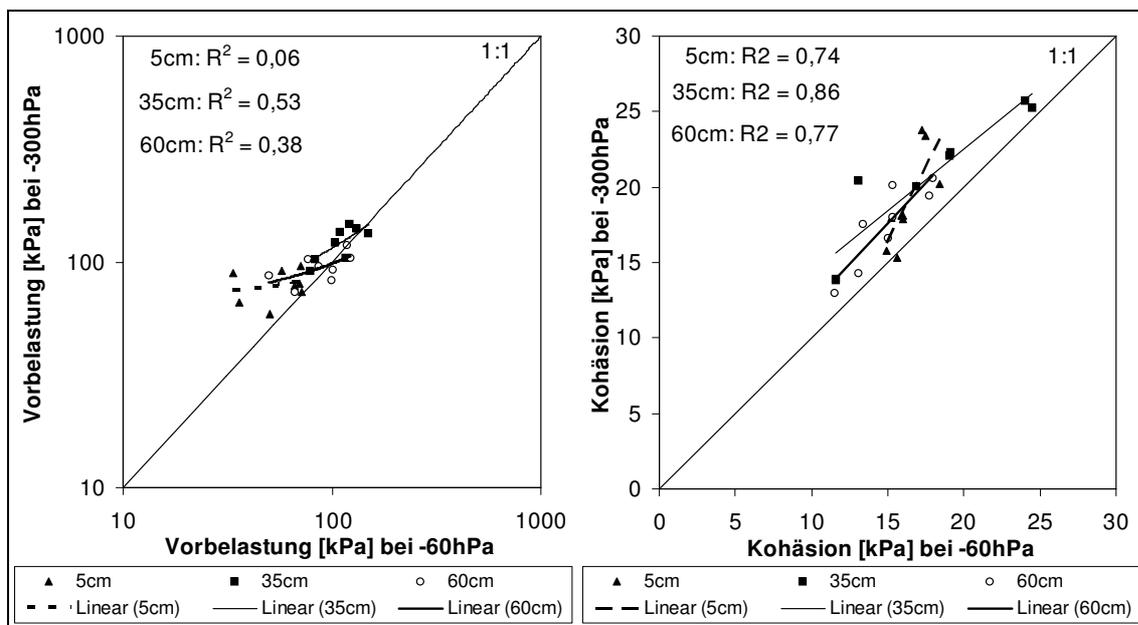


Abbildung 4-53 Einfluss der unterschiedlich aggregierten Bodenhorizonte auf die Vorbelastungs- und Kohäsionswerte bei -60 und -300hPa Entwässerungsstufe (im April 2002)

Die Kohäsion zeigte jedoch einen Zusammenhang zwischen den beiden Entwässerungsstufen (Abbildung 4-53), da die Partikel während des Schervorgangs von Wassermenisken zusammengehalten wurden, die die Kohäsion beeinflussen haben. Wenn die Wasserspannung gleich oder höher als der Luftdruck ist, dann kann das Wasser die Bodenpartikel nicht mehr zusammenhalten und der Boden verliert seine kohärente Eigenschaft. Die

Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stimmen auch mit den Ergebnissen von Kemper und Rosenau (1984) überein, die auch einen Zusammenhang zwischen Entwässerungsstufe und Kohäsion fanden. Bei der Kohäsion sind zwei aktive Kräfte im ungesättigten Bodensystem wirksam: zum einen hält die Oberflächenspannung des Wassers die Partikel aneinander und zum anderen trägt die Druckdifferenz der Luft- und Wasserphase dazu bei, dass die Partikel zueinander orientiert werden (Kemper und Rosenau, 1984).

5 Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerungen

Seit Jahrzehnten wird das Thema Bodenverdichtung und die daraus folgenden bodenphysikalischen Änderungen von Struktur und Porenfunktionen kontrovers diskutiert (Soane et al., 1981, Horn et al., 2000, Drescher et al., 1988), womit die Wichtigkeit und Aktualität dieser Prozesse in der Land- aber auch Forstwirtschaft dokumentiert wird. Durch die schnelle Leistungsentwicklung der Maschinen, verbunden mit einer Gewichtszunahme, wurde es notwendig, u. a. den Boden als natürliche Ressource mittels Bundes-Bodenschutzgesetz zu schützen. Im Zusammenhang mit §17 Abs. 2 „Gute fachliche Praxis“ hat das BBodSchG (Anonym, 1998) aber nur einen Empfehlungscharakter, weshalb es notwendig und aktueller denn je ist, zur Problematik um den Einsatz schwerer landwirtschaftlicher Maschinen auf den Boden, mit der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit sachdienlich beizutragen. Der Fokus der vorliegenden Arbeit richtet sich auf den Vergleich von zwei Bodenbearbeitungssystemen (konventionell und konservierend) und die Quantifizierung der Auswirkungen von Belastungen mit einem schweren Rübenrodebunker auf Strukturänderungen und die daraus abzuleitenden ökologischen Parameter und deren Wechselwirkungen. Außerdem wurde geprüft, ob der Vorbelastungswert mit Berücksichtigung der Wasserspannung eine Aussage über die Porenfunktionalität zulässt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen sollen offene Fragen beantwortet werden.

Die zwei Bearbeitungssysteme (konventionell-Pflug- und konservierend-Mulch-) spiegeln unterschiedliche Struktureigenschaften der Bodenprofile wider, was unter anderem mit den Spannungsmessungen und den Vorbelastungswerten belegt werden konnte. Zahlreiche Autoren berichten über unterschiedliche Strukturen bei unterschiedlichen Bearbeitungssystemen (Hill, 1990, Ehlers et al., 2000).

Im Bearbeitungshorizont der Pflugvariante wurde durch den jährlich wendenden Pflugeinsatz ein strukturell instabiler Oberboden mit einem heterogenen

Porensystem geschaffen. Durch diese Heterogenisierung des Gefüges wird künstlich ein höherer aber weniger leitender Grobporenanteil geschaffen (Hartge und Horn, 1999). Durch eine Befahrung werden die Aggregate zuerst dichter aneinander gepackt, bevor sie zerknestet werden (Dexter, 1988). Gleichzeitig verlieren die Poren ihre Funktionalität hinsichtlich der Leitfähigkeiten (Kirby, 1991, Horn und Rostek, 2000), und außerdem werden die Meniskenzugkräfte weniger zur Stabilität des Bodens beitragen (Larson und Gupta, 1980b). Durch das Zerknesten der Aggregate erhöht sich die Lagerungsdichte des Oberbodens und auch die Kohäsion, verbunden mit gleichzeitigem Verlust der Eigenstabilität, was durch eine kleinere Vorbelastung und etwas geringere Werte für den Winkel der inneren Reibung verdeutlicht wird. Durch die Betrachtung der Lagerungsdichte allein lässt sich keine Aussage über Stabilitätsveränderungen ableiten (Hartge und Horn, 1999). Im Oberboden der Pflugvariante wirken auf Grund des künstlich homogenisierten Porensystems nicht nur höhere vertikale, sondern auch horizontale Spannungen als bei der Mulchvariante, die zu einem Kollabieren der Stabilität führen.

Den Übergang von Ober- zu Unterboden stellt der Pflugsohlenbereich mit der sehr stark ausgeprägten, plattigen Pflugsohle sowohl bei der Pflugvariante als auch bei der Mulchvariante dar. Auf Grund des sehr hoch verdichteten Bodenhorizonts können darin bei den schon hohen Lagerungsdichten keine bedeutsamen Änderungen durch eine Belastung mehr eintreten, die auf Strukturänderungen durch eine Befahrung hinweisen könnten (Sammel, 1993). Die Pflugsohle ist somit als stabil einzustufen, und kann hohen Belastungen standhalten, wie es auch Alakukku (1997) und Hammel (1994) festgestellt haben. Die stark ausgeprägte Pflugsohle der Pflugvariante kompensiert scheinbar die eingetragenen Spannungen, aber aufgrund der räumlich begrenzten Elastizität und der früheren Schaffung von horizontalen Hohlräumen entlang der Platten bewirkt bereits eine einmalige intensivere Belastung ein Kollabieren der Platten (siehe Abbildung 4-35), folgend mit einem Stabilitätsverlust durch eine erstmals diese Eigenstabilität bei Weitem übersteigende mechanische Belastung in Form der Befahrung mit dem 35Mg schweren Rübenrodebunker Holmer Terra Dos. Die Zerstörung der

Plattenstruktur und damit das Schaffen einer instabilen Bodenstruktur werden durch eine niedrigere Vorbelastung in 35cm Tiefe und einer deutlichen Zunahme in 60cm Tiefe dokumentiert. Kézdi (1973) berichtet ebenfalls darüber, dass ein stark verdichteter Bodenhorizont nach einer hohen Belastung partiell lockerer werden kann und auch Semmel (1993) stellte eine Durchbiegung der Plattenstruktur fest.

Bei der Mulchvariante ist, auf Grund des Verzichts von Pflugeinsatz seit über 10 Jahren, die Pflugsohle nicht mächtiger geworden und auch die horizontalen Porensysteme als Schwächezonen sind weniger stark ausgeprägt. Folglich reagiert dieser Horizont auf eine Befahrung gleichmäßiger und elastischer als bei der Pflugvariante, weil die Grenzbereiche über und unter der noch vorhandenen Pflugsohle in der Gesamtheit der Bodenstruktur einheitlicher sind, was die Druckfortpflanzung der Spannungsmessungen beweist. Hierbei wird der ehemalige Pflugsohlenbereich weiterhin verdichtet und die Kontaktpunkte zum Unterboden erhöhen sich. Damit bleibt bis zum Übergang zwischen Pflugsohlenbereich und Unterboden ein kontinuierlicheres wenn auch dichteres Porensystem erhalten (Ehlers et al., 2000), welches in seiner Funktion zwar beeinträchtigt ist, aber immer noch funktionsfähig ist. Bei der Pflugvariante hingegen, wo die Poren in der Pflugsohle durch die Pflugschare verschmiert sind und parallel weiterhin verdichtet werden können, wird eine Staunässeschicht ausgebildet und damit der Gefahr einer inneren Erosion Preis gegeben (Hartge und Horn, 1999). Außerdem wird in der Pflugsohle der Pflugvariante durch ein unkontrolliertes Aufbrechen der Pflugsohle ein unkoordiniertes Porensystem geschaffen, welches nicht in der Lage ist, die Aufgaben der Porenfunktionen zu erfüllen. Eine besonders wichtige Rolle spielen in dem Zusammenhalten der Aggregate bzw. Bodenpartikel die Meniskenzugkräfte, die je nach Spannungsverhältnissen stabilisierend oder destabilisierend wirken können. Das hat zur Folge, dass bei einem nicht intakten Porensystem bei einer Belastung überschüssiges Porenwasser nicht entsprechend abgeleitet werden kann und demzufolge zu einer Mobilisierung der Bodenpartikel und damit zu einer Strukturminderung führt (Larson und Gupta, 1980b).

Die Stabilität bzw. Tragfähigkeit des stark verdichteten Bodenhorizontes ist in erster Linie nicht durch die Mächtigkeit bestimmt (Kézdi, 1973). Eine weniger mächtigere Pflugsohle kann solange genauso stabil wirken wie eine mächtigere Pflugsohle, wie die Eigenstabilität des Bodens noch nicht überschritten wird. Umso wichtiger scheint hierbei die Aggregation und die Kohäsion (Baumgartl, 1991) und damit die Elastizität im gesamten Boden zu sein.

Im Unterboden wird nach einer Befahrung auf Grund der strukturellen Veränderungen der Pflugvariante ein instabiles Bodensystem hinterlassen und damit der Weg für eine weitere und tieferreichende Verdichtung freigemacht, während bei der Mulchvariante der Unterboden kontinuierlich durch Zusammenlegung der Gefügeeinheiten aber in ein stabileres System überführt wird. Im Unterboden der Pflugvariante (d.h. in 60cm Tiefe) wird diese zusätzliche Verdichtung also durch ein unkontrolliertes Aufbrechen der Pflugsohle hervorgerufen und damit verstärkt, folgend mit einer Erhöhung der Vorbelastung, die ähnlich hoch ist wie in der kollabierten Pflugsohle. Dies bedeutet gleichzeitig, dass das gesamte Bodenpaket durch die intensive und erstmalige Belastung gleichmäßig verdichtet worden ist. Die Vorbelastung der Mulchvariante hingegen ändert sich durch eine Befahrung nur unwesentlich.

Eine weitere Befahrung über die aufgebrochene und dadurch partiell „gelockerte“ Pflugsohle der Pflugvariante muss dann auch schlagartig zu einer höheren Verdichtung im Unterboden führen (siehe Abbildung 5-1), sofern die eingetragenen wirksamen Lasten größer als diese „neue“ Stabilität ist (Hakansson und Petalkau, 1994). Bei der Mulchvariante wirkt sich eine wiederholte Befahrung weiterhin bis in den Unterboden verdichtend aus (Etana und Hakansson, 1994).

Beim Kollabieren der Plattenstruktur der Pflugvariante hat die Gefüegeometrie eine entscheidende Rolle. Die vertikal entnommenen Proben wiesen hierbei eine höhere Stabilität auf als die horizontal entnommenen Proben, obwohl die horizontalen Platten stabiler sein sollten (Hartge und Bohne, 1983). Dies deutet auf eine Anisotropie nicht nur hinsichtlich der Leitfähigkeiten hin, sondern auch auf die Bodenstabilität bezogen.

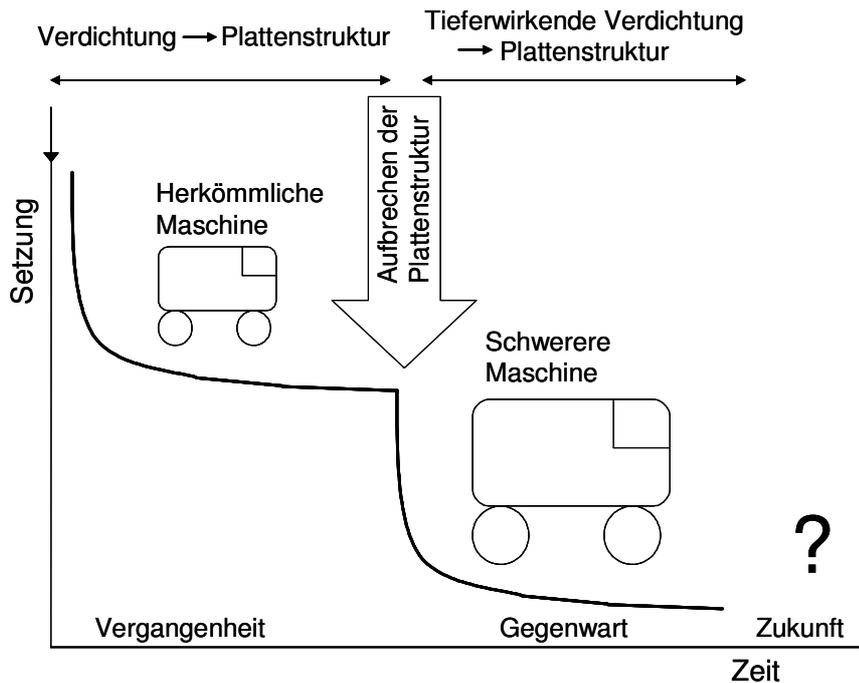


Abbildung 5-1 Folge einer erstmalig die Eigenstabilität überschreitende intensive Belastung durch die Verwendung einer schwereren Maschine

Die unteren Bodenhorizonte wiesen einen hohen Biomakroporenanteil auf, der hauptsächlich von Regenwürmern verursacht wurde. Trotzdem können sie keinen Aufschluss über die Aktivität der Regenwürmer geben (Lee, 1985, Joschko et al. 1989), da ältere Gänge mehrmals besiedelt werden können. Die Regenwurmgänge können durch ihre Abweichungen von der senkrechten Richtung in den stark verdichteten Bodenhorizonten die Bodenstabilität gefährden, da die horizontal liegenden Gänge instabil auf eine vertikale Belastung reagieren, während die vertikalen Gänge stabilisierend wirken (Ehlers, 1975). Die Regenwurmgänge haben aber außerdem eine wichtige Rolle beim Stofftransport (Edwards et al., 1988), wobei man hier hauptsächlich den präferentiellen Fluss auch als Folge der Anisotropie beachten muß. Folglich ist eine Änderung der Porenfunktionen durch eine Befahrung bei beiden Varianten mit stark verdichteten Bodenhorizonten schwer zu beurteilen, wenn ausschließlich Daten von vertikal entnommenen Proben vorliegen. Entscheidender bei der Beurteilung der Porenfunktionen sind die horizontal entnommenen Proben. Hierbei ist es möglich, eine Änderung der Leitfähigkeitsfunktionen durch unterschiedliche Belastungsintensitäten nachzuvollziehen, die mit der Vorbelastung korreliert.

Wie die vorliegende Arbeit zeigt, werden mit zwei verschiedenen Bearbeitungssystemen zwei verschiedene Bodenstrukturen geschaffen, die unterschiedlich auf Belastungen (mechanisch und hydraulisch) reagieren. Die Bodenverdichtung verursacht nicht nur kurzfristige Schäden (wie z.B. Ertragsverlust durch Staunässe, Erosion und beeinträchtigte Stoffflüsse), sondern auch langfristige Schäden (wie z.B. Ertragsverlust durch Verdichtung, Werteverlust des Ackerlandes durch Einschränkung der Nutzung). Die externen Einflussfaktoren der Bodenverdichtung (wie z.B. Radlasten, Reifeninnendruck, Kontaktflächendruck, Bewirtschaftungsform- und -zeitpunkt, und Radschlupf (Tijink et al., 2004)) müssen optimiert werden, um die internen Einflussfaktoren (Textur, organische Substanz, Bodenstruktur und -stabilität, Porengrößenverteilung und -kontinuität, Wassergehalt (Horn und Lebert, 1994)) zu begünstigen.

Die Feldversuche wurden mit Radlasten bis zu 9,7Mg durchgeführt; dahingegen werden in der Literatur geringere maximale Radlasten bis zu 5Mg empfohlen (Eriksson, 1975/1976; Hakansson, 1985; Petelkau und Dannowski, 1990), die der Bodenschonung dienen sollen, um eine nachhaltige Bodenstruktur zu erhalten. Generell scheint es schwierig, pauschal maximale Radlasten zu nennen, die auf die Bodenstruktur nicht schädigend wirken. Besser ist es, darauf zu achten, dass bei den laufenden Bodenbearbeitungen maschinenabhängig die Vorbelastung nicht überschritten wird, da ansonsten die Struktur zerstört wird. Der Einfluss von Kontaktflächendruck und Reifeninnendruck haben eine Auswirkung auf die Oberbodendeformation, aber im Unterboden bleibt weiterhin die Radlast der entscheidende Faktor (Danfors, 1994; Keller und Arvidsson, 2004), wie es bei den hohen Spannungseinträgen der Vorder- (schmalere Reifen)- und Hinterräder (breitere Reifen) gezeigt wurde. Durch eine Befahrung bei hohem Wassergehalt bilden sich kurzfristig positive Porenwasserdrücke, die vor allem im Oberboden destabilisierend wirken.

Aus den dargestellten Ergebnissen kann man aus zwei Themenbereichen folgende Rückschlüsse ziehen:

- Eine Belastung ruft stets eine Porenwassermobilisierung hervor, die den Boden stabilisieren bzw. destabilisieren kann. Dadurch bekommen die stabilisierenden Wassermeniskenkräfte zwischen den Aggregaten eine stärkere Bedeutung bei den Belastungsversuchen zur Ermittlung der Vorbelastung. Die zusätzliche Berücksichtigung des Wasserspannungsverlaufs während eines Ödometersversuchs ist hilfreich, um bei angemessener Auflastzeit pro Druckstufe die Aussage treffen zu können, bei annähernd welcher Druckstufe sich die Leitfähigkeit so stark erniedrigt, dass ein Aufsättigungsprozess, d.h. Destabilisierungsprozess eintritt.
- Eine konservierende Bodenbearbeitung trägt eher zur Nachhaltigkeit des Bodens bei. Hierbei ist die Bodenstruktur einheitlicher und widerstandsfähiger gegenüber mechanischen Belastungen und trägt dadurch zum Erhalt eines intakten Porensystems und deren Leitfähigkeitsfunktionen bei. Eine tiefere Bodenverdichtung und damit eine einhergehende Strukturänderung im Unterboden ist bei übermäßiger Belastung auch bei der konservierenden Bodenbearbeitung nicht abwendbar, jedoch bleibt sie für die analysierten Standorte bei der applizierten Maschinenaufast gleichmäßiger belastbar und in der Gesamtbetrachtung bleibt die Bodenstruktur stabiler. Bei der konventionellen Bearbeitungsvariante wird durch ein jährliches Wenden im Oberboden ein stets verdichtungsempfindlicher Bearbeitungshorizont geschaffen mit einer zusätzlichen stark plattigen Pflugsohle an der Unterseite. Dies stellt eine schlechte Kombination gegenüber der Kompensation von Belastungen dar, weil der lockere Oberboden hohe Spannungseinträge auf die Pflugsohle überträgt, die aber nicht elastisch genug auf diese Belastung reagieren kann. Somit resultieren die in die starre Pflugsohle eingetragenen Spannungen in einem unkontrollierten Aufbrechen der Pflugsohle in ungleich große Platten und Stücke, womit der Weg frei ist für einen hohen Spannungseintrag in den Unterboden bei wiederholten Befahrungen. Eine rasche Erhöhung der Unterbodenverdichtung ist die Folge. Unter allen Umständen, die bei einer Befahrung Spannungseinträge in den Boden beeinflussen können, ist und bleibt die maximale Radlast / Kontaktfläche der regulierende Faktor, die über die Folgen für die Bodenfunktionen entscheiden.

6 Zusammenfassung

Mit zunehmender Maschinenleistung in der Landwirtschaft steigen auch die Gesamtgewichte und damit die Radlasten. Dadurch steigt die Gefahr der Bodendegradation insbesondere durch Bodenverdichtung zunehmend an, denn mit zunehmenden Radlasten besteht auch eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass Eigenstabilitäten von landwirtschaftlich genutzten Böden überschritten werden, was mit irreversibler Strukturänderung einher geht. Das bedeutet, dass mit zunehmender Bodenverdichtung, auch in tieferen Horizonten, die Porenfunktionen und damit der Wasser- und Lufthaushalt dauerhaft beeinträchtigt werden und infolgedessen ein gehemmtes Wurzelwachstum mit niedrigen Stoffflüssen und Ertragseinbußen eintreten werden.

Das Hauptanliegen dieser Arbeit ist eine Beurteilung der Auswirkung einer Befahrung mit einer schweren Erntemaschine auf zwei Bodenbearbeitungssysteme (konventionell und konservierend), um sie dann anhand ihrer bodenphysikalischen Kennwerte zu vergleichen. Zur Versuchsdurchführung wurden an einer Tschernosem-Parabraunerde aus Löss in drei Bodentiefen Spannungsmessungen bei einer Überrollung mit einem 35Mg schweren Köpfrdebunker durchgeführt und anschließend Stechzylinderproben genommen. Stabilitäts- bzw. Strukturänderungsunterschiede durch eine erst- und einmalige Befahrung wurden für beide Bearbeitungsvarianten anhand bodenphysikalischer und mechanischer Kenngrößen, wie Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung, Luft- und gesättigte Wasserleitfähigkeit, Vorbelastung, Scherparameter und in situ Spannungsmessungen beurteilt.

Außerdem wurde ein methodischer Beitrag mit Schwerpunkt auf die Wasserspannungsänderung während der Belastung gesetzt, der zeigt, dass neben der Setzung auch die Vorbelastung zeitabhängig ist. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass nach über 10 Jahren Umstellung auf konservierende Bewirtschaftung die Pflugsohle bei der Mulchvariante noch immer sehr ausgeprägt ist, sie aber nicht mächtiger geworden ist. Bei beiden

Bearbeitungsvarianten haben durch eine Befahrung Strukturänderungen bis in 60cm Tiefe stattgefunden. Die Pflugvariante stellte sich mit ihrer stark ausgeprägten Horizontierung als instabiles Bodenstruktursystem heraus: der Bearbeitungshorizont lässt hohe Spannungseinträge durch, die räumlich begrenzt auf die Pflugsohle wirken. Die stark ausgeprägte und starre Pflugsohle ist bei den erstmaligen und deutlich höheren Lasteinträgen durch einen Rübenrodebunker nicht elastisch genug, die Belastung zu tragen und bricht in unregelmäßig große Stücke auseinander, was zu einer schlagartigen Unterbodenverdichtung bei zukünftigen Befahrungen führt. Die Mulchvariante zeigt als Folge der gleichen Befahrung eine kontinuierlichere Druckfortpflanzung in die Tiefe, verbunden mit einer weiteren Unterbodenverdichtung mit einer einheitlicheren Bodenstruktur. Gefährdungsmindernd ist ein intaktes Porensystem mit seinen stabilisierenden Wassermenisken auf die Bodenstruktur. Wie der Vergleich zeigt, reagieren beide Bearbeitungssysteme auf hohe Belastungen mit einer Zunahme von Unterbodenverdichtung und Strukturveränderung. Durch eine Erniedrigung der Radlasten lässt sich dieser Prozess nicht vermeiden, aber zumindest verlangsamen.

Summary

Importance of soil structure and matric potential for the stabilization of a Stagnic Luvisol in ploughing and no ploughing tillage systems

Use of larger machines in the agricultural sector increases the total weights and also the axleloads applied to soils. As axle loads increase there is a greater risk of soil compaction which leads to further soil degradation. Soil compaction is increased within both surface soils as well as deeper soil levels. The results is a disruption of soil pore connectivities and a long-term decrease in pore functions particularly affecting flow processes of soil solutions and gas diffusion. Reduced availability of water and nutrients combined with restricted oxygen diffusion reduces root growth and ultimately crop yields.

The aim of this research is to assess the changes in soil physical parameters caused by wheeling with heavy machines in two treatments (tillage and no tillage). Experiments included the measurement of *in situ* stress and strain values at three soil depths on a Stagnic Luvisol that originated from loess. Treatments included wheeling by a 35Mg heavy sugar beet harvester under both tillage and no tillage conditions. Structured soil samples were taken at three depths before and after wheeling. Changes in soil structure and structural stability before and after the application of one wheeling were assessed for both tillage treatments by measuring bulk density, porosity, air permeability, saturated water conductivity, precompression stress, and shear strength parameters as well as *in situ* stresses and strains.

A new method was developed to quantify the contribution of pore water pressure changes on structural stability during the compaction process. It could be noted that the settlement and the resulting precompression stress are time depending processes. As an overall conclusion it can be stated that the plough pan, developed by previous tillage, remained even 10 years after changing to no tillage. No tillage and tillage treatments have modified soil structure at least to a depth of 60cm by wheeling. Tillage treatments applying a plough to depths of 30cm developed a very strong plough pan which, however, collapsed due to

a single wheeling event with the sugar beet harvester causing an unstable soil structural system at that depth. It is assumed that the shear forces induced by the plough transmits stresses throughout the Ap horizon and into the plough pan. The extremely platy structure of the plough pan is not elastic enough to sustain these stresses resulting in a structural decomposition by breaking into nonuniform massive blocks of soil. Due to this process the risk becomes rather high for an intensive subsoil compaction. Wheeling on the no tillage treatments demonstrated a continuous distribution of stresses and strains into the deeper horizons. The mechanical energy was transmitted to the subsoil in a manner that slowly caused subsoil compaction of a more homogeneous soil structure system. However, both tillage treatments reacted to high stresses with resultant subsoil compaction. Reduced axle loads would not completely avoid subsoil compaction, yet it would reduce both the degree and depth of subsoil compaction on frequently wheeled agricultural fields.

Összefoglalás

A talajszerkezet és a hidraulikai feszültség, mint stabilizáló tényezők, jelentőségének vizsgálata csernozjom barna erdőtalajon szántásos és szántás nélküli művelési rendszerben

Az egyre inkább növekvő teljesítményű mezőgazdasági gépek megjelenésével nő a gépek összömege, ami maga után vonja a kerékterhelés növekedését is. Ezzel fokozódik a talajleromlás – elsősorban a talajtömörödés - veszélye, mivel megnő a valószínűsége annak, hogy a nehezebb kerékterhelés következtében a mezőgazdaságilag hasznosított talajok elveszítik stabilitásukat, ami egy visszafordíthatatlan szerkezetváltozást eredményezhet. Az egyre növekvő, és a mélyebb rétegekre is kiható talajtömörödés tartósan korlátozza a pórusfunkciókat és ezzel együtt a talaj víz- és levegőforgalmát. Ez a gyökérfejlődés akadályoztatásához vezet, ami rossz tápanyagforgalomban és alacsony termés hozamban mutatkozhat meg.

A dolgozat célja egy (egyszer alkalmazott) nehéz betakarítógép talajtulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata két eltérő (szántásos és szántás nélküli) talajművelési rendszerben, löszön kialakult csernozjom barna erdőtalajon. A kísérlet során három talajrétegben mértem a behatoló feszültségeket, melyeket egy 35Mg súlyú egymenetes cukorrépa betakarítógép váltott ki. Ezt követően bolygatatlan talajmintákat vettem a vizsgált talajrétegekből. A talaj stabilitásában és szerkezetében bekövetkezett változást a következő talajfizikai és mechanikai tényezőkkel mutattam ki: térfogatsúly, pórusméret-eloszlás, lég- és telítettségi vízvezetőképesség, előterhelés, nyírószilárdsági paraméterek (kohézió, belső súrlódási szög, húzófeszültség) és in situ feszültségmérés.

A fentieken túl módszert fejlesztettem ki az előterhelés értékének a meghatározására. Ennek lényege, hogy a talaj összenyomódása során a süllyedés mellett az előterhelés is időfüggő, ami a bekövetkezett hidraulikai feszültségváltozásra vezethető vissza. Az eredmények alapján a szántásos talajművelésről a szántás nélküli történő átállás után még több, mint 10 év

elteltével is kimutatható volt az eketalpként emlegetett tömör réteg jelenléte a talajban. A cukorrépa betakarítógéppel történő terhelés következtében végbemenő talajszerkezet-változás mindkét művelési módnál egészen 60 cm-ig igazolható volt. Kimutattam, hogy a szántásos kezelésben meglévő réteges eketalp tömörödöttség instabil talajszerkezetet eredményezett: a művelt talajréteg átengedte a nagy feszültségeket, ami további hatással volt az eketalpra. Az erősen kifejtett és merev eketalp réteg nem volt elég elasztikus ahhoz, hogy elbírja a betakarítógép által kifejtett előszöri és a korábbiaknál lényegesen nagyobb terhelést, ezért egyetlen nagyságú darabokra töredezett. Ez a talajállapot egy jövőbeli terhelésnél hirtelen bekövetkező altalaj-tömörödéshez vezethet. A szántás nélküli művelési módban a nehéz betakarítógéppel történő terhelés következtében egy folytonos feszültségeloszlás volt megfigyelhető a mélyebb talajrétegekben is. Ez szintén altalaj-tömörödéshez vezet, itt azonban a mélyebb rétegekben a talajszerkezet egyenletesebb változást mutatott, amely alapvetően az összefüggő pórusrendszert, valamint a stabilizáló vízmeniszkusz-erőket veszélyeztetette.

Összességében megállapítottam, hogy a nehéz betakarítógép hatására mindkét művelési módban talajszerkezet-változás lépett fel és erősödött az altalaj tömődöttsége. A kerékterhelés csökkentésével ez a káros folyamat nem kerülhető el, de legalább lelassítható.

7 Literaturverzeichnis

- Ahuja, L. R., K. E. Johnsen and G. C. Heathman (1995): Macropore transport of a surface-applied bromide tracer: Model evaluation and refinement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1234-1241.
- Alakukku, L. (1997): Long-term soil compaction due to high axle load traffic. Dissertation. Faculty of Agriculture and Forestry of the University of Helsinki, 55S.
- Alakukku, L. and P. Elonen (1994): Finnish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Tillage Res.* 29: 151-155.
- Allaire, S. E., S. C. Gupta, J. Nieber and J. F. Moncrief (2002): Role of macropore continuity and tortuosity on solute transport in soils: 1. Effects of initial and boundary conditions. *J. Cont. Hydr.* 58: 299-321.
- Anonym (1984): Geschichte der Zuckerrübe. Dr. Albert Bartens Verlag, Berlin-Nikolassee, 264 S.
- Anonym (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998, Artikel 1, Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. *Bundesgesetzblatt I*, 502.
- Assouline, A., J. Tavares-Filho and D. Tessier (1997): Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 390-398.
- Assouline, S. (2002): Modeling soil compaction under uniaxial compression. *Soil Sci. Am. J.* 66: 1784-1787.
- Bailey, A. C., C. E. Johnson and R. L. Schafer (1986): A model for agricultural soil compaction. *J. Agrig. Eng. Res.* 33: 257-262.
- Bailey, A. C., T.A. Nichols and C. E. Johnson (1988): Soil stress determination under wheel loads. *Trans. ASAE* 31(5): 1309-1314.
- Ball, B.C. (1981): Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. *J. Soil Sci.* 32: 483-498.
- Baumgartl, T. (1991): Spannungsverteilung in unterschiedlich texturierten Böden und ihre Bedeutung für die Bodenstabilität. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 128 S.
- Baumgartl, T. (2002): Prediction of tensile stresses and volume change with hydraulic models. *Advances in GeoEcology*, 35, Catena Verlag, 504-514.
- Baumgartl, T. and R. Horn (1999): Influence of mechanical and hydraulic stresses on hydraulic properties of swelling soils. Characterisation and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media. Van Genuchten, M., Leij, F. J. and Wu, L. Riverside, University of California, Riverside Publ.: 449-457.

- Bear, J. (1988): Dynamics of fluids in porous media, Dover Publication, Inc. New York. 784 S.
- Becher, H.H. (2004): Ist der Konzentrationsfaktor k eines aggregierten Bodens als steuernde Größe der mechanischen Druckverteilung in Böden eine Konstante? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 525-531.
- Beven, K.J. and R.F. Germann (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.* 18: 1311-1325.
- Bishop, A. W. (1961): The measurement of pore pressure in the triaxial test. In: Pore pressure and suction in soils, London, Butterworths, 438 S.
- Blackwell, P.S., J.P. Graham, J.V. Armstrong, M.A. Ward, K.R. Howse, C.J. Dawson and A.R. Butler (1986): Compaction of a silt loam soil by wheeled agricultural vehicles. I. Effects upon soil conditions. *Soil Tillage Res.* 7: 97-116.
- Bodenkunde, AG (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 392 S.
- Bolling, I. and W. Söhne (1982). Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. *Landtechnik*, 2: 54:57.
- Bölling, W. H. (1971). Zusammendrückung und Scherfestigkeit von Böden, Springer-Verlag. Wien, New York, 194 S.
- Boussinesq, M. J. (1885): Application des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides elastiques. Imprim. L. Danel, Lille.
- Burger, N., M. Lebert and R. Horn, Eds. (1988): Prediction of the compressibility of arable land. Impact of water and external forces on soil structure, *Catena Supplement*. 11: 141:151.
- Burt, E.C., R.K. Wood and A.C. Bailey (1987a): A three-dimensional system for measuring tire deformation and contact stresses. *Trans. ASAE* 30(2): 324-327.
- Casagrande, A. (1936): The determination of preconsolidation load and its practical significance. Discussion in Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Cambridge, 3: 60-64.
- Danfors, B. (1994): Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil Tillage Res.* 29: 135-144.
- Dexter, A. R. (1988): Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11: 199-238.
- Douglas, J.T. (1986): Macroporosity and permeability of some soil cores from England and France. *Geoderma* 37: 221-231.
- Douglas, J.T., M.G. Jarvis, K.R. Howse and M.J. Goss (1986): Structure of a silty soil in relation to management. *J. Soil Sci.* 3: 137-151.
- Dörner J. und R. Horn (2005): Anisotropie von Porenfunktionen und ihre Auswirkung auf die Wasserbewegung in einer Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holstein. *Mit. der DBG.* 106: 9-10.
- Drescher, J, R. Horn, and M. de Boodt, Eds. (1988): Interaction of structured soils with water and external forces. *Catena Supplement* 11.

- DVWK (1995): Mechanische Belastbarkeit von Mineralböden unter landschaftlicher Nutzung. I. Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung in Böden unter Ackernutzung auf ebenen oder leicht geneigten Flächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. 234: 11 S.
- Edwards, A. P. and J. M. Bremer (1967): Microaggregates in soils. *J. Soil Sci.* 18: 64-73.
- Edwards, W.M., L.D. Norton and C.E. Redmond (1988): Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 483-487.
- Ehlers, W. (1973): Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung in unbearbeiteten und bearbeiteten Lössböden. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 134(3): 193-207.
- Ehlers, W. (1975): Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soils. *Soil Sci.* 119: 242-249.
- Ehlers, W., D. Werner and T. Mähner (2000): Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163: 321-333.
- Ehlers, W., K. Schmidtke und R. Rauber (2003): Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 44: 9-18.
- Ehrmann, O. (1996): Regenwürmer in einigen südwestdeutschen Agrarlandschaften: Vorkommen, Entwicklung bei Nutzungsänderungen und Auswirkungen auf das Bodengefüge. *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Universität Hohenheim.* 35: 135 S.
- Eriksson J. (1975/1976): Influence of extremely heavy traffic on clay soil. *Grundförbättring*, 27/1: 33-51.
- Etana, A. and I. Hakansson (1994): Swedish experiments on persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil Tillage Res.* 29: 167-172.
- FAT Berichte (2001): Zuckerrüben: Erntetechnik und Bodenschutz. Nr. 567.
- Farkas Cs., Birkás M. und Murányi A. (1998): Untersuchungen des Eindringwiderstandes an Dauerbeobachtungsflächen. (auf Ungarisch) *Növénytermelés*, Vol. 47., pp. 199-212.
- Farkas, Cs., Gyuricza, Cs., László, P. and Birkás, M. (2000): Study of the influence of soil tillage on soil water regime. in: R. Horn, J.J.H. van den Akker and J. Arvidsson (eds.): *Subsoil compaction. Advances in Geocology 32.*, Catena Verlag, pp. 251-257.
- Fazekas, O. und R. Horn (2005): Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168: 60-67.
- Fredlund, D. G. and H. Rahardjo (1993): *Soil mechanics of unsaturated soils.* New York, Wiley & Sons. 517 S.

- Fritton, D.D. (2001): An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. *Soil Sci. Am. J.* 65: 678-684.
- Fröhlich, O. K. (1934): Druckausbreitung im Baugrund. Wien, Springer Verlag.
- Hakansson, I. (1985): Soil compaction research in Sweden. Proc. of Soil Compaction Conf. Ohio State University. Columbus, OH.
- Hakansson, I. and H. Petalkau (1994): Benefits of limited axle load. Soil Compaction in Crop Production, in: B. D. Soane and C. Van Ouwerkerk (Eds.), 479-499.
- Hakansson, I., W. B. Voorhees and H. Riley (1988): Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Tillage Res.* 11: 239-282.
- Hammel, J.E. (1994): Effect of high axle load traffic on subsoil physical properties and crop yields in the Pacific Northwest USA. *Soil Tillage Res.* 29: 195-203.
- Hartge, K. (1984): Vergleich der Verteilungen der Wasserleitfähigkeit und des Porenvolumens von waagrecht und senkrecht entnommenen Stechzylinderproben. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 147: 316-323.
- Hartge, K. und H. Bohne (1983): Einfluß der Gefügegeometrie auf Verdichtbarkeit des Bodens und auf Keimung von Roggen. *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 24: 11-18.
- Hartge, K. H. und R. Horn (1999): Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag. 304 S.
- Hartge, K. H. (1966): Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 7: 155-163.
- Hartge, K. H. und R. Horn (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. Stuttgart, 3.Auflage, Ferdinand Enke Verlag. 177 S.
- Hartge, K.H. (1986): A concept of compaction. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 149(4): 361-370.
- Hartung, J. (2002): Statistik. 13. Auflage, R. Oldenburg Verlag München Wien, 975 S.
- Hill, R.L. (1990): Long-Term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 161-166.
- Holmer Terra Dos (2004). Allgemeine Hinweise 1. KRBS T2 BJ. Auf Anfrage.
- Horn, R. (1981): Die Bedeutung der Aggregation von Böden für die mechanische Belastbarkeit. Schriftenreihe TU Berlin: 200 S.
- Horn, R. (1986): Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 149: 9-18.
- Horn, R. (2004): Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. *Soil Sci. Am. J.* 68: 1131-1137.

- Horn, R. and J. Rostek (2000): Subsoil Compaction processes - state of knowledge. Subsoil Compaction - Distribution, Processes and Consequences. R, Horn., J.H. van den Akker, J. Arvidsson 2000, Advances in Geocology. 32: 462 p.
- Horn, R. and M. Lebert (1994): Soil compactability and compressibility. 45-69. In: B. D. Soane and C. Van Ouwerkerk (ed.) Soil compaction in crop production. Elsevier, Amsterdam.
- Horn, R., C. E. Johnson, R. L. Semmel, R. L. Schafer und M. Lebert (1992): Räumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Böden - theoretische Betrachtungen und erste Ergebnisse. J. Plant Nutr. Soil Sci. 155: 269-274.
- Horn, R., J.H. van den Akker, and J. Arvidsson (eds) (2000): Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences. Advances in Geocology 32, 462 S.
- Horn, R., N. Burger, M. Lebert and G. Badewitz (1987): Druckfortpflanzung in Böden unter langsam fahrenden Traktoren. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 28: 94-102.
- Horn, R., T. Baumgartl, R. Kayser and S. Baasch (1995a): Effect of aggregate strength on changes in strength and stress distribution in structured bulk soils. Soil structure - in development and function. Advances in soil science. Hartge, K. H. and Stewart, R. Boca Raton, Lewis Publ.: 31-52.
- Horn, R., T. Baumgartl, S. Kühner, M. Lebert und R. Kayser (1991): Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. J. Plant Nutr. Soil Sci. 154: 21-26.
- Horn, R., T. Baumgartl, W. Gräsle and B. G. Richards (1995b): Stress induced changes of hydraulic properties in soils. Unsaturated soils. 1st. Int. Conference on unsaturated soils, Balkema Verlag, Paris.
- Iversen, B.V., P. Moldrup, P. Schjonning and P. Loll (2001): Air and water permeability in differently-textured soils at two measurement scales. Soil Sci. 166(10): 643-659.
- Johnson, C. E. (1994): SSTKIEL.EXE Program for 3D-stress transducer data analysis for the soil. Version 8/94.
- Joschko, M., H. Diestel and O. Larink (1989): Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurements. Biol. Fert. Soils 8: 191-196.
- Keller, T. and J. Arvidsson (2004): Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre infiltration pressure on stress propagation in soil. Soil Tillage Res. 79: 191-205.
- Kemper, W. D. and R. C. Rosenau (1984): Soil cohesion as affected by time and water content. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 1001:1006.
- Kevin, P. and W. McCarthy Kirk Brown (1992): Soil gas permeability as Influenced by Soil Gas-Filled Porosity. Soil Sci. Soc. Am. J. 56(4): 997-1003.

- Kézdi, A (1952): Talajmechanika (Bodenmechanik). Budapest, Tankönyvkiadó. 560 S.
- Kézdi, A (1964). Bodenmechanik 1, VEB Verlag für Bauwesen Berlin. 424 S.
- Kézdi, A (1969). Handbuch der Bodenmechanik Band 1. Budapest, Akadémiai Kiadó. 259 S.
- Kezdi, A. (1973): Stabilisierte Erdstaßen. VEB Berlin. 327 S.
- Kirby, J.M. (1991). The influence of soil deformations on the permeability to air. *J. Soil Sci.* 42: 227-235.
- Kirby, J.M. and B.G. Blunden (1991): Interaction of soil deformations, structure and permeability. *Aust. J. Soil Res.* 29: 891-904.
- Klinkenberg, L.J. (1941): The permeability of porous media to liquids and gases. *Amer. Petrol. Inst. Drilling. prod. Pract.:* 200-213.
- Kmoch, H.G. und H. Hanus (1965): Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 111(1): 1-10.
- Koolen, A. J. and H. Kuipers (1983): *Agricultural Soil Mechanics*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo. 241 S.
- Kühner, S. (1997): Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. Schriftreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Heft: Universität Kiel. 231 S.
- Larson, W. E. and S. C. Gupta (1980b). Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1127-1132.
- Larson, W.E., Gupta, S.C., and Useche, R.A. (1980a): 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. Dissertation, Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Bd. 12.
- Lebert, M., N. Burger and R. Horn (1989): Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. in: Larson, W. E., Blake, G. R., Allmaras, R. R., Voorhees, W. B. and Gupta, S. C. (eds): *Mechanics and related processes in structured agricultural soils.* 73-80. NATO ASI series. E. Applied Sciences. Kluwer Academic Publishers.
- Lee, K.E. (1985): *Earthworms. Their ecology and relationships with soils and land use*, Academic Press, Sydney. 411 S.
- Logsdon, S.D., R.R. Allmaras, W.W. Nelson and W.B. Voorhees (1992): Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads. *Soil Tillage Res.* 23: 95-110.
- Logsdon, S.D., T.C. Kasspar and C.A. Cambardella (1999): Depth-Incremental soil properties under no-till or chisel management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 197-200.

- Meinecke, K. (1954): Über die modernen Rübenrodeverfahren. Schriftenreihe der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Kiel. 55 S.
- Nichols, T.A., A. C. Bailey, C. E. Johnson and R. D. Grisso (1987): A Stress State Transducer for soil. *Trans. ASAE* 30(5): 1237-1241.
- Ouwerkerk, C. and F. R. van Boone (1970): Soil-physical aspects of zero-tillage experiments. *Neth. Agric. Sci.* 18: 247-261.
- Pagliai M., and R. Jones (eds) (2002): Sustainable land management environmental protection - a soil physical approach. *Adv. In Geoecology*, 35, Catena, Reiskirchen.
- Pagliai, M., G. Guidi and M. La Marca (1980): Macro- and micromorphometric of soil dextran interaction. *J. Soil Sci.* 31: 493-504.
- Peth, S. (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten. Schriftenreihe des Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Heft Universität Kiel. 160 S.
- Rogers, J.S. and H.M. Selim (1989): Water flow through layered anisotropic bedded soil with subsurface drains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 18-24.
- Roloff, G. and W. E. Larson (1989): Strength of low and variable charge soils. *Mechanics and related processes in structured agricultural soils*. Larson, W. E., Blake, G. R., Allmaras, R. R., Voorhees, W. B. and Gupta, S. C., Kluwer Academic Publishers. NATO ASI Series, E: Applied Sciences: 59-72.
- Roseberg, R.J. and E.L. McCoy (1992): Tillage- and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: Air permeability assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1261-1267.
- Salire, E. V., J. E. Hammel and J. H. Hardcastle (1994): Compression of intact subsoil under short-duration loading. *Soil Tillage Res.* 31: 235-248.
- Schaap, M. G. and F. J. Leij (1998): Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science* 193: 765-779.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. and van Genuchten M. Th. (1998): Neutral network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 847-855.
- Scheffer/Schachtschabel (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage., Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 3-8274-1324-9. 593 S.
- Schjonning, P. (1989): Long-term reduced cultivation. II. Soil pore characteristics as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. *Soil Tillage Res.* 15: 91-103.
- Schlichting, E., M. E. Blume and K. Stahr (1995): *Bodenkundliches Praktikum*. Berlin, Wien, Oxford, Edinburgh, Boston, London, Melbourne, Paris, Yokohama, Blachwell Wissenschafts-Verlag.
- Semmel, H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Dissertation, Schriftenreihe des Inst. f. Pflanzenern. u. Bodenkunde der CAU zu Kiel, Bd. 26.

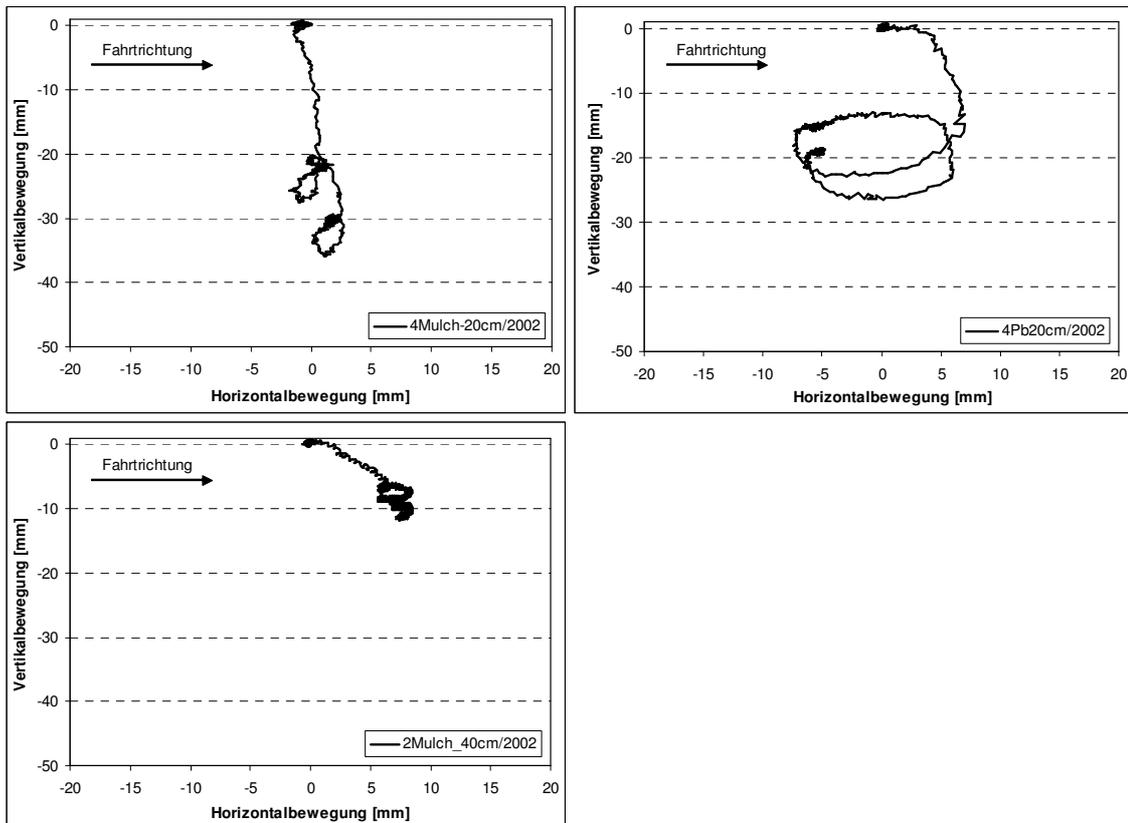
- Snyder, V. A. and R. D. Miller (1985): Tensile strength of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 49: 58-65.
- Soane, B. D. (1990): The role organic matter in soil compactibility: A review some partical aspects. *Soil Tillage Res.* 16: 179-201.
- Soane, B. D. and van Ouwerkerk, C. (eds) (1994): *Soil compaction in crop production*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 662 S.
- Soane, B. D., J. W. Dickson and P. S. Blackwell (1982): Compaction by agricultural vehicles: A review III. – Incidence and control of compaction in crop production. *Soil and Tillage Research* 2: 2-36.
- Soane, B. D., P. S. Blackwell and J. W. Dickson. (1981): Compaction by agricultural vehicles: A review II. - Compaction under tyres and other running gear. *Soil and Tillage Res.* 1: 373-400.
- Söhne, W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundl. Landtechnik* 5: 49-63.
- Taylor, J.H., E.C. Burt and A. C. Bailey (1980): Effect of total load on subsoil compaction. *Trans. ASAE* 23(3): 568-570.
- Terzaghi, K. und P. Jelinek (1954): *Theoretische Bodenmechanik*. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg.
- Tigges, U. (2000): Untersuchungen zum mehrdimensionalen Wassertransport unter besonderer Berücksichtigung der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit. Schriftenreihe des Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Heft Universität Kiel. 145 S.
- Tijink, F. G. J. und G. Spoor (2004): Technische Leitlinien zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtung. *Zuckerindustrie*, 129/9: 647-652.
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades (1982): Organic matter and water stable aggregates in soil. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- van Genuchten, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- van Ouwerkerk, C. van and F. R. Boone (1970): Soil-physical aspects of zero-tillage experiments. *Neth. J. Agric. Sci.* 18: 247-261.
- Voorhees, W. B., C. G. Senst and W. W. Nelson (1978): Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the nortern Corn Belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 728-733.
- Voorhees, W.B. and M.J. Lindstrom (1984): Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 152-156.
- Wiermann, C. (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lössbürtiger Ackerstandorte. Dissertation, Schriftenreihe des Inst. f. Pflanzenern. u. Bodenkunde der CAU zu Kiel, Bd. 45.
- Zuckerindustrie (2005): www.zuckerindustrie.de

Anhang

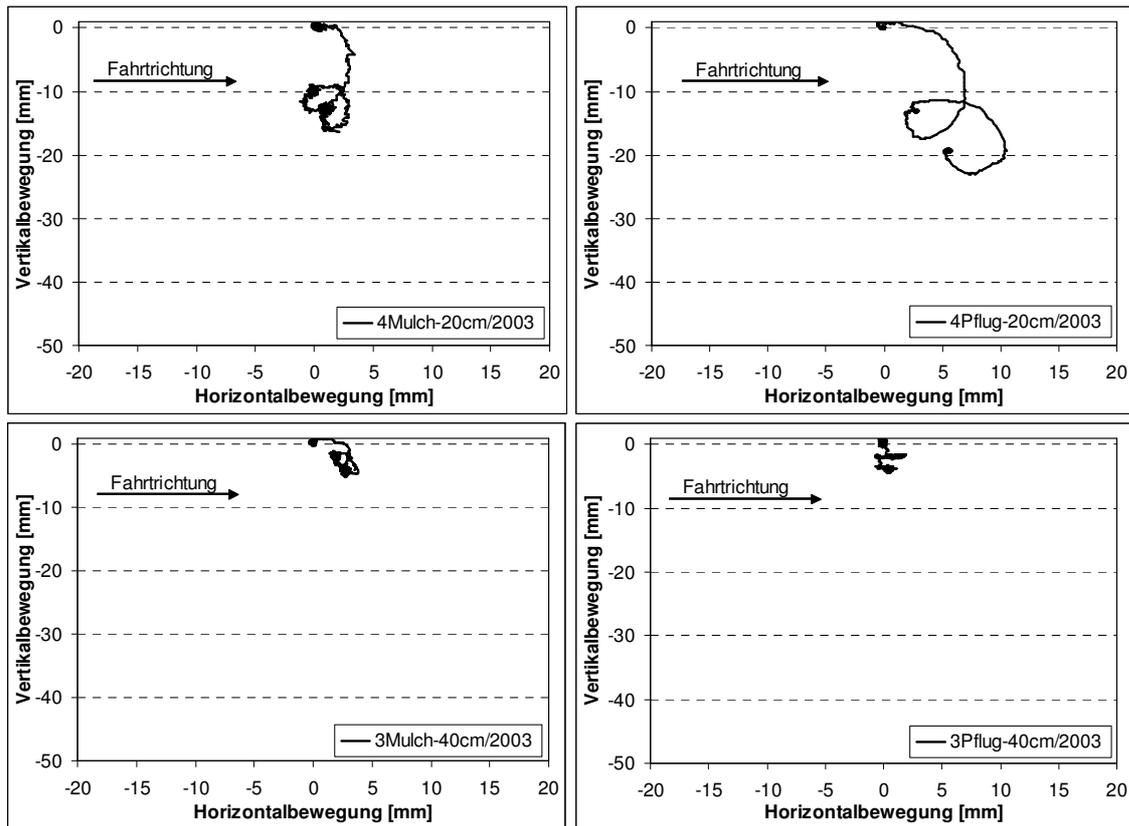
Anhang

Anhang 1 Wassergehalt in unterschiedlichen Tiefen und Bearbeitungsvarianten bei den Befahrungsterminen Nov. 2002 und 2003

Tiefe / Variante	Nov. 2002		Nov. 2003		
	Wassergehalt [Gew%]	St.Abw	Wassergehalt [Gew%]	St.Abw	
12cm	Pub	22,1	1,4	22,5	0,3
	Pb	21,7	1,0	21,8	2,0
	Mub	19,7	0,6	20,1	1,2
	Mb	20,6	1,7	23,2	0,6
35cm	Pub	20,6	0,9	21,7	0,9
	Pb	20,3	1,0	19,4	0,2
	Mub	20,6	1,2	23,7	3,2
	Mb	20,6	1,4	20,9	0,6
60cm	Pub	20,2	0,7	19,9	0,2
	Pb	19,8	1,1	23,1	0,9
	Mub	20,0	1,0	21,3	0,7
	Mb	19,1	1,7	20,0	0,6



Anhang 2 zur Abbildung 4-4 Bodenbewegung durch Befahrungen bei Pflug- und Mulchvarianten in unterschiedlichen Tiefen (Nov. 2002)



Anhang 3 zur Abbildung 4-4 Bodenbewegung durch Befahrungen bei Pflug- und Mulchvarianten in unterschiedlichen Tiefen (Nov. 2003)

Anhang 4 zur Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 Veränderung der Regenwurmgänge nach einer Befahrung

Tiefe / Variante	Nov. 2002		Nov. 2003		
	Mittelwert	St.Abw.	Mittelwert	St.Abw.	
12cm	Pub	17,1 ab A	8,53	10,2 a A	6,50
	Pb	13,0 ab A	6,11	3,1 a A	0,50
	Mub	25,1 b A	4,80	10,4 a A	6,53
	Mb	10,2 a A	2,67	9,2 a A	3,85
35cm	Pub	28,2 a AB	10,63	29,0 a A	21,23
	Pb	18,9 a A	10,36	20,0 a B	8,13
	Mub	35,0 a A	13,94	18,0 a A	17,95
	Mb	17,1 a A	11,11	21,8 a AB	11,52
60cm	Pub	27,4 ab B	14,77	10,8 a A	5,07
	Pb	19,1 ab A	5,08	27,1 ab B	4,91
	Mub	40,1 b A	14,60	20,7 ab A	11,67
	Mb	25,9 ab A	16,13	24,5 b B	4,74

Anhang 5 Lagerungsdichte aus vertikaler Richtung entnommenen Stechzylinderproben (100cm³) (Die kleinen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe zwischen Behandlungen; die großen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Behandlung in unterschiedlichen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von 0,05)

Tiefe / Variante	Nov. 2002		Nov. 2003		Apr. 2002		
	Mittelwert	St.Abw.	Mittelwert	St.Abw.	Mittelwert	St.Abw.	
12cm	Pub	1,52 a A	0,01	1,54 a A	0,05	1,43 a A	0,03
	Pb	1,55 a A	0,03	1,56 a A	0,02	1,47 a A	0,05
	Mub	1,51 a A	0,07	1,55 a A	0,03	1,52 a A	0,03
	Mb	1,55 a A	0,08	1,56 a A	0,02	1,44 a A	0,04
35cm	Pub	1,50 a A	0,06	1,50 a A	0,07	1,50 a A	0,01
	Pb	1,55 a A	0,03	1,51 a A	0,03	1,49 a A	0,04
	Mub	1,47 a A	0,07	1,52 a A	0,04	1,52 a A	0,03
	Mb	1,50 a A	0,07	1,53 a A	0,06	1,48 a AB	0,02
60cm	Pub	1,55 a A	0,07	1,54 a A	0,03	1,53 a A	0,13
	Pb	1,55 a A	0,02	1,56 a A	0,03	1,45 a A	0,14
	Mub	1,46 a A	0,09	1,53 a A	0,04	1,53 a A	0,04
	Mb	1,51 a A	0,13	1,56 a A	0,04	1,54 a B	0,01

Anhang 6 Aggregatlagerungsdichte bei der 2. und 4. Feldwiederholung aus Nov. 2003 (Die kleinen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe zwischen Behandlungen; die großen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Behandlung in unterschiedlichen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von 0,05)

Tiefe / Variante	Nov. 2003 (2., 4. Wdh.)		
	Mittelwert	St.Abw.	
Pub 12	1,72 a A	0,00	
Pb 12	1,68 a A	0,08	
Mub 12	1,60 a A	0,11	
Mb 12	1,58 a A	0,02	
Pub 35	1,64 a A	0,10	
Pb 35	1,64 a A	0,06	
Mub 35	1,59 a A	0,15	
Mb 35	1,61 a A	0,07	
Pub 60	1,64 a A	0,04	
Pb 60	1,71 a A	0,08	
Mub 60	1,67 a A	0,02	
Mb 60	1,59 a A	0,08	

Anhang 7 Porengrößenverteilung an Gesamtproben (St. Zyl.: 100cm³) (Die kleinen Buchstaben bedeuten bei GPV signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe zwischen Behandlungen; die großen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Behandlung in unterschiedlichen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von 0,05) Durchmesser: wGP: >50µm (pF1,8), eGP: 50-10µm (pF1,8-2,5); MP: 10-0,2µm (pF2,5-4,2); FP: <0,2 µm (pF>4,2).

Tiefe / Variante		LK / wGP [Vol%]		nFK / eGP [Vol%]		nFK / MP [Vol%]		
		Mittelwert	St.Abw.	Mittelwert	St.Abw.	Mittelwert	St.Abw.	
Nov. 2002	12cm	Pub	6,3%	1,3%	1,1%	0,3%	17,2%	1,4%
		Pb	3,1%	1,5%	1,1%	0,5%	19,2%	0,9%
		Mub	6,8%	3,9%	1,5%	0,3%	17,5%	2,3%
		Mb	3,0%	0,8%	2,1%	0,6%	18,6%	2,2%
	35cm	Pub	7,6%	1,8%	2,1%	0,2%	14,7%	0,7%
		Pb	5,9%	1,1%	2,3%	0,3%	15,4%	0,8%
		Mub	9,1%	2,2%	2,4%	0,2%	15,8%	1,4%
		Mb	6,8%	1,3%	2,6%	0,9%	17,2%	2,2%
	60cm	Pub	6,2%	2,5%	1,8%	0,2%	17,1%	3,1%
		Pb	6,7%	0,3%	2,3%	0,4%	18,0%	0,7%
		Mub	8,2%	1,0%	2,5%	0,3%	16,9%	2,7%
		Mb	6,5%	3,7%	1,9%	1,1%	19,6%	2,7%
Nov. 2003	12cm	Pub	4,2%	1,9%	3,0%	0,4%	19,0%	0,3%
		Pb	2,5%	1,0%	2,4%	0,2%	19,9%	0,2%
		Mub	4,3%	1,3%	3,8%	0,5%	17,6%	1,5%
		Mb	2,5%	1,0%	3,3%	0,3%	19,2%	0,9%
	35cm	Pub	8,2%	1,8%	2,5%	0,6%	13,9%	1,2%
		Pb	6,8%	1,6%	3,4%	0,8%	14,1%	0,8%
		Mub	7,1%	1,3%	3,2%	0,7%	15,7%	0,7%
		Mb	6,7%	2,6%	2,9%	0,1%	15,9%	0,8%
	60cm	Pub	6,2%	1,1%	3,0%	0,6%	14,9%	1,2%
		Pb	6,1%	1,8%	2,6%	0,4%	15,2%	0,5%
		Mub	6,4%	1,4%	3,7%	1,1%	15,5%	0,2%
		Mb	5,2%	1,5%	3,4%	0,3%	15,8%	1,5%
Apr. 2002	5cm	Pub	7,6%	0,7%	2,7%	0,5%	20,6%	0,1%
		Pb	7,0%	3,0%	2,6%	0,3%	19,8%	0,4%
		Mub	5,3%	0,2%	3,2%	1,1%	20,4%	0,9%
		Mb	7,7%	1,6%	2,6%	0,5%	22,8%	0,5%
	40cm	Pub	8,3%	0,9%	3,4%	0,3%	15,4%	1,3%
		Pb	6,3%	0,4%	3,0%	0,1%	12,7%	2,0%
		Mub	7,2%	0,8%	3,0%	0,1%	16,5%	0,7%
		Mb	8,6%	1,8%	3,9%	0,6%	18,1%	1,1%
	60cm	Pub	6,2%	4,1%	2,8%	0,4%	16,1%	2,8%
		Pb	8,9%	2,0%	2,4%	0,7%	13,8%	2,0%
		Mub	8,6%	0,9%	2,1%	0,0%	15,1%	2,9%
		Mb	6,4%	1,4%	3,2%	0,3%	16,3%	1,1%

folge Anhang 7

	Tiefe / Variante		nFK (eGP+MP) [Vol%]		pWP / FP [Vol%]		GPV [Vol%]		
			Mittelwert	St.Abw.	Mittelwert	St.Abw.	Mittelwert		St.Abw.
Nov. 2002	12cm	Pub	18,3%	1,3%	17,3%	0,9%	42,3%	a A	0,5%
		Pb	20,4%	0,7%	17,3%	0,6%	40,8%	a A	1,2%
		Mub	19,0%	2,2%	16,9%	0,5%	42,7%	a A	2,7%
		Mb	20,7%	2,7%	17,4%	0,2%	41,1%	a A	3,0%
	35cm	Pub	16,8%	0,7%	18,3%	1,5%	42,7%	a A	2,3%
		Pb	17,7%	0,5%	17,4%	0,6%	41,0%	a A	1,2%
		Mub	18,2%	1,5%	16,7%	2,3%	44,0%	a A	2,9%
		Mb	19,8%	2,9%	16,5%	2,7%	43,1%	a A	2,5%
	60cm	Pub	18,9%	3,0%	15,9%	3,0%	41,0%	a A	2,7%
		Pb	20,3%	0,4%	14,1%	1,0%	41,2%	a A	0,9%
		Mub	19,4%	2,8%	16,9%	5,2%	44,5%	a A	3,4%
		Mb	21,5%	2,0%	14,6%	2,2%	42,7%	a A	4,9%
Nov. 2003	12cm	Pub	22,0%	0,6%	15,4%	0,8%	41,6%	a A	1,8%
		Pb	22,3%	0,2%	15,8%	0,4%	40,6%	a A	0,7%
		Mub	21,4%	1,7%	15,5%	0,6%	41,1%	a A	1,0%
		Mb	22,4%	0,9%	15,7%	0,8%	40,6%	a A	0,7%
	35cm	Pub	16,4%	1,0%	18,4%	2,2%	43,0%	a A	2,8%
		Pb	17,5%	1,1%	18,4%	1,8%	42,7%	a B	1,2%
		Mub	18,9%	0,3%	16,3%	0,7%	42,2%	a A	1,7%
		Mb	18,7%	0,9%	16,4%	0,8%	41,8%	a A	2,4%
	60cm	Pub	17,8%	1,7%	17,4%	2,7%	41,4%	a A	1,0%
		Pb	17,9%	0,3%	16,7%	1,1%	40,7%	a A	1,0%
		Mub	19,3%	1,2%	16,1%	1,3%	41,8%	a A	1,6%
		Mb	19,2%	1,2%	16,3%	0,9%	40,7%	a A	1,5%
Apr. 2002	5cm	Pub	23,3%	0,5%	14,6%	0,1%	45,5%	a A	1,2%
		Pb	22,4%	0,7%	14,8%	0,3%	44,2%	a A	2,0%
		Mub	23,6%	2,0%	13,9%	1,6%	42,7%	a A	0,6%
		Mb	25,4%	1,0%	12,2%	0,7%	45,3%	a A	1,4%
	40cm	Pub	18,8%	1,5%	16,0%	2,0%	43,1%	a A	0,5%
		Pb	15,7%	1,9%	21,4%	3,2%	43,4%	a A	1,7%
		Mub	19,5%	0,6%	15,4%	0,8%	42,1%	a A	1,0%
		Mb	22,0%	0,5%	13,3%	0,7%	43,9%	a AB	0,6%
	60cm	Pub	18,8%	2,4%	16,8%	3,1%	41,8%	a A	4,8%
		Pb	16,2%	2,7%	19,7%	5,8%	44,8%	a A	5,1%
		Mub	17,2%	2,8%	15,8%	3,3%	41,6%	a A	1,4%
		Mb	19,5%	1,5%	15,6%	0,5%	41,5%	a B	0,4%

Anhang 8 Porenverteilung am Gesamtporenvolumen (GPV=100%) (St.Zyl.: 100cm³) (Die kleinen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe zwischen Behandlungen; die großen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Behandlung in unterschiedlichen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von 0,05)

Tiefe / Variante	LK / wGP [%]			nFK / eGP [%]			nFK / MP [%]				
	Mittelwert		St.Abw.	Mittelwert		St.Abw.	Mittelwert		St.Abw.		
Nov. 2002	12cm	Pub	14,8%	a A	3,0%	2,7%	a A	0,7%	40,6%	a A	3,2%
		Pb	7,7%	a A	3,6%	2,8%	a A	1,3%	47,1%	a A	1,6%
		Mub	15,6%	a A	8,0%	3,5%	a A	1,0%	41,1%	a A	5,8%
		Mb	7,3%	a A	1,5%	5,0%	a A	1,1%	45,2%	a A	2,1%
	35cm	Pub	17,6%	a A	3,3%	4,9%	a B	0,5%	34,6%	a A	3,3%
		Pb	14,3%	a B	2,3%	5,7%	a B	0,9%	37,5%	a B	2,4%
		Mub	20,5%	a A	3,8%	5,5%	a B	0,7%	36,1%	a A	5,2%
		Mb	15,7%	a B	2,2%	5,9%	a A	2,0%	40,1%	a A	6,2%
	60cm	Pub	14,8%	a A	4,9%	4,5%	a B	0,3%	42,2%	a A	9,6%
		Pb	16,3%	a B	0,6%	5,6%	a B	0,8%	43,8%	a B	2,6%
		Mub	18,5%	a A	1,0%	5,5%	a B	0,7%	38,5%	a A	8,5%
		Mb	14,7%	a B	6,5%	4,6%	a A	2,7%	46,3%	a A	7,4%
Nov. 2003	12cm	Pub	9,9%	a A	4,3%	7,2%	ab A	0,9%	45,7%	ab A	1,2%
		Pb	6,1%	a A	2,5%	5,9%	ab A	0,6%	49,1%	b C	0,7%
		Mub	10,3%	a A	3,2%	9,3%	c A	1,2%	42,7%	ab A	3,9%
		Mb	6,1%	a A	2,4%	8,0%	bc A	0,7%	47,3%	ab A	3,1%
	35cm	Pub	18,9%	a B	3,1%	5,9%	a A	1,1%	32,6%	a B	5,1%
		Pb	15,9%	a B	3,5%	7,8%	a B	1,8%	33,1%	a A	1,6%
		Mub	16,7%	a A	2,6%	7,5%	a A	1,6%	37,3%	a A	2,3%
		Mb	15,7%	a B	5,2%	6,9%	a A	0,6%	38,1%	a B	4,1%
	60cm	Pub	14,8%	a AB	2,4%	7,2%	a A	1,5%	35,9%	a A	3,2%
		Pb	15,0%	a B	4,2%	6,5%	a AB	1,1%	37,5%	a B	1,6%
		Mub	15,2%	a A	2,9%	9,0%	a A	2,7%	37,2%	a A	1,3%
		Mb	12,7%	a AB	3,1%	8,3%	a A	0,9%	39,0%	a AB	4,4%
Apr. 2002	5cm	Pub	16,6%	a A	1,1%	5,9%	a A	0,9%	45,3%	a A	1,0%
		Pb	15,7%	a A	6,1%	5,9%	a A	0,9%	44,9%	a A	2,9%
		Mub	12,3%	a A	0,3%	7,5%	a A	2,4%	47,7%	a C	1,5%
		Mb	17,0%	a AB	3,1%	5,8%	a A	1,3%	50,3%	a A	2,6%
	40cm	Pub	19,3%	a A	1,9%	7,8%	a B	0,5%	35,8%	a A	2,5%
		Pb	14,6%	a A	0,3%	6,9%	a A	0,1%	29,4%	a A	5,7%
		Mub	17,2%	a B	1,4%	7,1%	a A	0,1%	39,3%	a B	2,6%
		Mb	19,5%	a B	3,9%	8,9%	a A	1,3%	41,3%	a A	3,1%
	60cm	Pub	14,4%	a A	8,2%	6,6%	a AB	0,3%	39,1%	a A	11,2%
		Pb	19,8%	a A	2,2%	5,5%	a A	2,2%	31,3%	a A	8,0%
		Mub	20,7%	a B	1,5%	5,0%	a A	0,1%	36,5%	a A	8,1%
		Mb	15,4%	a A	3,1%	7,7%	a A	0,9%	39,3%	a A	3,1%

folge Anhang 8

Tiefe / Variante		nFK (eGP+MP) [%]			pWP / FP [%]			
		Mittelwert		St.Abw.	Mittelwert		St.Abw.	
Nov. 2002	12cm	Pub	43,3%	a A	3,0%	40,8%	a A	2,2%
		Pb	49,9%	a B	2,0%	42,5%	a A	2,1%
		Mub	44,6%	a A	6,0%	39,8%	a A	3,4%
		Mb	50,1%	a A	3,2%	42,5%	a A	3,3%
	35cm	Pub	39,5%	a A	3,4%	42,9%	a B	2,4%
		Pb	43,2%	a A	2,0%	42,5%	a B	1,4%
		Mub	41,6%	a A	5,9%	37,9%	a B	3,5%
		Mb	46,0%	a A	7,1%	38,3%	a A	5,6%
	60cm	Pub	46,6%	a A	9,4%	38,6%	a B	5,9%
		Pb	49,3%	a B	1,8%	34,3%	a B	1,8%
		Mub	44,1%	a A	8,9%	37,5%	a B	8,5%
		Mb	50,9%	a A	6,6%	34,4%	a A	5,4%
Nov. 2003	12cm	Pub	52,9%	a B	1,1%	37,2%	a A	3,4%
		Pb	54,9%	a C	0,8%	38,9%	a A	1,7%
		Mub	52,0%	a A	3,9%	37,6%	a A	0,9%
		Mb	55,3%	a B	3,1%	38,6%	a A	1,7%
	35cm	Pub	38,5%	a A	4,9%	42,6%	a A	3,1%
		Pb	40,9%	a A	2,2%	43,2%	a A	4,6%
		Mub	44,8%	a A	1,1%	38,5%	a A	2,0%
		Mb	45,0%	a A	4,7%	39,3%	a A	0,7%
	60cm	Pub	43,1%	a A	4,3%	42,1%	a A	6,4%
		Pb	44,0%	a B	1,7%	41,0%	a A	3,2%
		Mub	46,2%	a A	3,7%	38,6%	a A	2,9%
		Mb	47,2%	a AB	4,1%	40,0%	a A	1,2%
Apr. 2002	5cm	Pub	51,2%	a A	0,1%	32,1%	a A	0,9%
		Pb	50,7%	a A	3,8%	33,6%	a A	2,2%
		Mub	55,2%	a B	3,9%	32,5%	a A	4,2%
		Mb	56,1%	a A	3,9%	27,0%	a A	0,8%
	40cm	Pub	43,6%	a A	3,0%	37,2%	a A	5,0%
		Pb	36,3%	a A	5,8%	49,1%	a A	5,6%
		Mub	46,4%	a AB	2,5%	36,4%	a AB	1,1%
		Mb	50,2%	a A	1,8%	30,2%	a A	2,1%
	60cm	Pub	45,7%	a A	10,9%	39,9%	a A	2,7%
		Pb	36,7%	a A	10,2%	43,4%	a A	8,0%
		Mub	41,4%	a A	8,2%	37,9%	a B	6,7%
		Mb	47,0%	a A	4,0%	37,6%	a A	0,9%

Anhang 9 Luftleitfähigkeit (St. Zyl.: 236cm^3) (Die kleinen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe zwischen Behandlungen; die großen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Behandlung in unterschiedlichen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von 0,05)

Tiefe / Variante		kl [cm/d] Mittelwert	log kl Mittelwert	St.Abw.	Orientierung V / H	
Nov. 2002	12cm	Pub	198,66	2,30 a A	0,14	V
		Pb	125,72	2,10 a A	0,19	V
		Mub	121,12	2,08 a A	0,38	V
		Mb	87,40	1,94 a A	0,19	V
	35cm	Pub	537,88	2,73 a A	0,05	V
		Pb	503,99	2,70 a B	0,15	V
		Mub	435,73	2,64 a B	0,42	V
		Mb	310,66	2,49 a B	0,09	V
	60cm	Pub	342,58	2,53 a A	0,35	V
		Pb	497,02	2,70 a B	0,11	V
		Mub	591,71	2,77 a B	0,20	V
		Mb	357,42	2,55 a B	0,31	V
Nov. 2003	12cm	Pub	54,54	1,63 a A	0,35	V
		Pb	67,96	1,77 a A	0,30	V
		Mub	46,45	1,63 a A	0,21	V
		Mb	39,77	1,41 a A	0,50	V
	35cm	Pub	189,26	2,23 a B	0,25	V
		Pb	321,45	2,44 ab B	0,27	V
		Mub	543,76	2,70 ab B	0,21	V
		Mb	590,78	2,75 b B	0,15	V
		Pub	17,85	1,16 a A	0,33	H
		Pb	13,80	1,11 a A	0,21	H
		Mub	13,45	1,12 a A	0,10	H
		Mb	15,31	1,16 a A	0,17	H
	60cm	Pub	223,88	2,35 a B	0,07	V
		Pb	308,40	2,45 ab B	0,23	V
		Mub	569,69	2,74 b B	0,13	V
		Mb	407,52	2,60 ab B	0,11	V
Pub		19,59	1,26 a A	0,18	H	
Pb		15,22	1,06 a A	0,45	H	
Mub		12,41	1,09 a A	0,07	H	
Mb		18,43	1,19 a A	0,32	H	
Apr. 2002	5cm	Pub	278,10	2,43 a A	0,18	V
		Pb	452,73	2,37 a A	0,78	V
		Mub	224,63	2,12 a A	0,69	V
		Mb	177,40	2,22 a A	0,23	V
	40cm	Pub	411,52	2,60 a A	0,14	V
		Pb	371,22	2,54 a A	0,25	V
		Mub	850,74	2,90 a A	0,25	V
		Mb	819,89	2,91 a A	0,01	V
	60cm	Pub	488,52	2,64 a A	0,28	V
		Pb	890,60	2,92 a A	0,23	V
		Mub	905,05	2,88 a A	0,38	V
		Mb	746,24	2,87 a A	0,01	V

Anhang 10 zur Abbildung 4-21: Luftleitfähigkeitskoeffizienten als Ergebnis der nach und vor der Belastung bei unterschiedlichen Auflaststufen bei vertikal und horizontal entnommenen Proben aus Nov. 2003 (Die normalen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Behandlung und Tiefe zwischen Auflaststufen; die kursiven Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Auflaststufe unterschiedlicher Varianten bei einem Signifikanzniveau von 0,05)

Tiefe / Variante	Auflast [kPa]	log kl - Vertikal			log kl - Horizontal			
		Mittelwert		St.Abw.	Mittelwert		St.Abw.	
12cm	Pub	20	0,99	b a	0,01	/		
		70	0,94	b a	0,03			
		100	0,72	ab a	0,23			
		200	0,40	ab a	0,51			
		400	0,65	a a	0,16			
	Pb	20	1,15	a a	4,68			
		70	0,87	a a	0,12			
		100	0,47	a a	0,80			
		200	0,31	a a	0,42			
		400	0,45	a a	0,09			
	Mub	20	0,91	a a	0,16			
		70	0,92	a a	0,28			
		100	0,95	a a	0,11			
		200	0,71	a a	0,36			
		400	0,57	a a	0,21			
	Mb	20	1,04	c a	0,11			
		70	0,81	bc a	0,05			
		100	0,78	bc a	0,23			
		200	0,43	ab a	0,39			
		400	0,56	a a	0,04			
35cm	Pub	20	1,04	b a	0,10	1,01	b a	0,05
		70	0,99	b a	0,01	0,94	b a	0,03
		100	0,96	b a	0,05	0,87	b a	0,08
		200	0,89	ab a	0,13	0,38	a a	0,27
		400	0,71	a a	0,15	0,35	a a	0,24
	Pb	20	1,00	b a	0,01	1,00	b a	0,04
		70	0,97	b a	0,01	0,90	b a	0,04
		100	0,95	b a	0,01	0,69	ab a	0,15
		200	0,80	ab a	0,06	0,30	a a	0,39
		400	0,71	a a	0,21	0,44	a a	0,15
	Mub	20	1,00	a a	0,01	0,99	b a	0,03
		70	1,00	a a	0,05	0,94	b a	0,02
		100	0,84	a a	0,13	0,85	b a	0,01
		200	0,89	a a	0,18	0,48	a a	0,19
		400	0,68	a a	0,20	0,49	a a	0,09
	Mb	20	1,00	b a	0,01	0,97	b a	0,06
		70	0,98	b a	0,02	0,92	b a	0,04
		100	0,90	b a	0,07	0,87	b a	0,04
		200	0,69	a a	0,08	0,52	a a	0,09
		400	0,67	a a	0,15	0,49	a a	0,28
60cm	Pub	20	0,98	b a	0,02	0,92	b a	0,10
		70	0,95	b ab	0,04	0,90	b a	0,03
		100	0,86	ab a	0,09	0,89	b a	0,04
		200	0,88	b a	0,15	0,64	a a	0,08
		400	0,66	a a	0,09	0,51	a a	0,16
	Pb	20	1,01	b a	0,04	1,06	a a	0,23
		70	0,97	ab ab	0,04	0,93	a a	0,07
		100	0,96	ab a	0,03	0,77	a a	0,59
		200	0,87	a a	0,13	0,50	a a	0,46
		400	0,86	a a	0,02	0,49	a a	0,47
	Mub	20	1,00	b a	0,01	0,99	b a	0,01
		70	0,90	b a	0,08	0,94	b a	0,02
		100	0,98	b a	0,07	0,71	ab a	0,22
		200	0,68	a a	0,18	0,65	ab a	0,34
		400	0,63	a a	0,21	0,34	a a	0,18
	Mb	20	1,00	b a	0,01	0,98	b a	0,02
		70	0,99	ab b	0,01	0,92	b a	0,03
		100	0,96	ab a	0,02	0,85	b a	0,17
		200	0,90	ab a	0,10	0,39	a a	0,20
		400	0,80	a a	0,16	0,44	a a	0,25

Anhang 11 Gesättigte Wasserleitfähigkeit an vertikal und horizontal entnommenen Proben (St. Zyl.: 100cm³) (Die kleinen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe zwischen Behandlungen; die großen Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Behandlung in unterschiedlichen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von 0,05)

Tiefe / Variante	Gemessen				Modelliert				Orientierung V / H		
	kf [cm/d] Mittelwert	log kf Mittelwert		St.Abw.	kf [cm/d] Mittelwert	log kf Mittelwert		St.Abw.			
Nov. 2002	12cm	Pub	55,96	1,75	b B	0,37	10,68	1,03	ab A	0,06	V
		Pb	6,66	0,82	ab A	0,71	6,77	0,83	a A	0,08	V
		Mub	19,77	1,30	ab A	1,01	12,48	1,06	b A	0,20	V
		Mb	1,07	0,03	a A	0,40	7,75	0,88	ab A	0,11	V
	35cm	Pub	11,44	1,06	a A	0,28	14,16	1,14	a A	0,11	V
		Pb	11,61	1,07	a A	0,53	12,16	1,08	a B	0,10	V
		Mub	27,65	1,44	a A	0,53	17,57	1,23	a A	0,14	V
		Mb	18,43	1,27	a B	0,26	13,80	1,13	a B	0,11	V
	60cm	Pub	15,54	1,19	a A	0,51	11,02	1,02	a A	0,16	V
		Pb	23,32	1,37	a A	0,08	13,68	1,13	a B	0,10	V
		Mub	34,71	1,54	a A	0,43	16,97	1,22	a A	0,11	V
		Mb	8,08	0,91	a B	0,36	13,38	1,07	a B	0,25	V
Nov. 2003	12cm	Pub	10,07	0,80	a A	0,57	10,23	0,99	a A	2,87	V
		Pb	2,34	0,34	a A	0,19	7,19	0,85	a A	1,13	V
		Mub	4,51	0,54	a A	0,40	10,70	1,02	a A	1,83	V
		Mb	2,12	0,32	a A	0,09	8,13	0,90	a A	1,68	V
	35cm	Pub	114,26	1,91	a B	0,41	15,61	1,18	a A	4,55	V
		Pb	111,86	1,89	a B	0,42	14,49	1,16	a B	2,77	V
		Mub	123,84	1,84	a B	0,61	14,27	1,15	a A	2,67	V
		Mb	51,24	1,66	a B	0,28	13,26	1,10	a A	4,35	V
		Pub	14,52	1,08	a A	0,29					H
		Pb	10,95	0,95	a A	0,32					H
		Mub	8,74	0,90	a A	0,22					H
		Mb	10,70	1,02	a A	0,10					H
	60cm	Pub	50,77	1,64	a B	0,27	12,42	1,09	a A	2,46	V
		Pb	140,92	2,09	a B	0,29	11,51	1,06	a B	1,98	V
		Mub	134,28	1,96	a B	0,54	13,78	1,13	a A	2,24	V
		Mb	106,90	1,88	a B	0,41	11,60	1,06	a A	2,50	V
Pub		11,94	1,04	a A	0,19					H	
Pb		9,81	0,94	a A	0,24					H	
Mub		17,99	1,15	a A	0,33					H	
Mb		18,46	1,26	a A	0,09					H	
Apr. 2002	5cm	Pub	35,02	1,09	a A	1,04	16,14	1,20	a A	0,08	V
		Pb	16,05	0,97	a A	0,69	14,69	1,15	a A	0,15	V
		Mub	5,45	0,40	a A	0,86	11,55	1,05	a A	0,12	V
		Mb	3,30	0,51	a A	0,09	16,43	1,21	a A	0,07	V
	40cm	Pub	254,83	2,25	a A	0,54	16,74	1,22	a A	0,04	V
		Pb	28,03	1,44	a A	0,11	13,43	1,13	a A	0,04	V
		Mub	217,77	2,34	a A	0,02	14,28	1,15	a A	0,06	V
		Mb	146,00	1,97	a A	0,63	15,37	1,19	a A	0,11	V
	60cm	Pub	161,69	2,20	a A	0,10	13,25	1,08	a A	0,29	V
		Pb	385,69	2,59	b A	0,03	17,73	1,24	a A	0,14	V
		Mub	335,22	2,52	b A	0,12	14,51	1,16	a A	0,06	V
		Mb	134,67	2,13	a A	0,03	13,17	1,12	a A	0,04	V

Anhang 12 Koeffizient der Wasser- und Luftpermeabilität zwischen horizontal und vertikal entnommenen Proben aus Nov. 2003 (St.Zyl.: 100cm³) (Die kleinen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe zwischen Behandlungen; die großen Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede innerhalb einer Behandlung in unterschiedlichen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von 0,05)

Tiefe / Variante	log Kf H/V				log KI H/V				
	Mittelwert			St.Abw.	Mittelwert			St.Abw.	
35cm	Pub	0,57	a	A	0,29	0,85	a	A	0,21
	Pb	0,50	a	A	0,26	0,80	a	A	0,10
	Mub	0,49	a	A	0,15	0,74	a	A	0,13
	Mb	0,62	a	A	0,14	0,81	a	A	0,13
60cm	Pub	0,64	a	A	0,14	0,84	a	A	0,09
	Pb	0,45	a	A	0,12	0,77	a	A	0,12
	Mub	0,59	a	B	0,13	0,80	a	A	0,07
	Mb	0,67	a	A	0,13	0,84	a	A	0,23

Anhang 13 Mit Normalspannung berechnete Vorbelastungswerte bei allen Probenahmeterminen und Tiefen bei vertikal (V) und horizontal (H) entnommenen Proben bei pF1,8 Vorentwässerung

Tiefe	Variante	Vorbelastung		St. Abw.	Orientierung	
		[kPa]				
Nov. 2002	12cm	Pub	67,5	ab A	19,1	V
		Pb	47,8	a A	14,5	V
		Mub	80,3	b A	3,3	V
		Mb	58,2	ab A	12,7	V
	35cm	Pub	149,2	a B	9,7	V
		Pb	121,9	a B	6,7	V
		Mub	122,2	a A	36,8	V
		Mb	123,5	a C	15,3	V
	60cm	Pub	106,1	a AB	21,8	V
		Pb	109,3	a B	13,5	V
		Mub	93,1	a A	30,1	V
		Mb	90,0	a B	4,3	V
Nov. 2003	12cm	Pub	83,6	b A	7,9	V
		Pb	56,1	a A	10,3	V
		Mub	82,4	ab A	10,7	V
		Mb	78,0	ab A	17,9	V
	35cm	Pub	134,9	a B	21,0	V
		Pb	119,5	a B	5,0	V
		Mub	112,8	a A	33,2	V
		Mb	111,0	a B	7,1	V
		Pub	146,7	a A	35,1	H
		Pb	107,8	a B	6,3	H
		Mub	128,3	a A	6,9	H
		Mb	121,7	a A	36,1	H
	60cm	Pub	97,3	a A	7,0	V
		Pb	120,7	a B	20,1	V
		Mub	96,5	a A	10,1	V
		Mb	99,8	a B	13,3	V
Pub		118,3	b A	13,2	H	
Pb		65,9	a A	5,0	H	
Mub		105,9	ab A	15,1	H	
Mb		106,0	ab A	30,7	H	
Apr. 2002	5cm	Pub	60,8	a A	14,5	V
		Pb	51,9	a A	25,6	V
		Mub	68,7	a A	3,8	V
		Mb	46,8	a A	15,3	V
	40cm	Pub	128,8	a A	28,0	V
		Pb	109,5	a A	9,7	V
		Mub	104,3	a A	36,3	V
		Mb	102,0	a A	26,9	V
	60cm	Pub	81,3	a A	6,6	V
		Pb	99,7	a A	0,9	V
		Mub	86,2	a A	51,1	V
		Mb	91,7	a A	35,8	V

Anhang 14 Zugspannung bei allen Probenahmeterminen und Tiefen bei vertikal (V) und horizontal (H) entnommenen Proben bei pF1,8 Vorentwässerung

	Tiefe	Variante	Zugspannung			Orientierung
			[kPa]		St. Abw.	
Nov. 2002	12cm	Pub	29,7	a A	2,4	V
		Pb	58,9	b B	6,0	V
		Mub	28,3	a B	4,8	V
		Mb	31,1	a A	1,6	V
	35cm	Pub	52,8	c B	2,2	V
		Pb	35,9	b A	5,1	V
		Mub	24,8	a AB	3,7	V
		Mb	30,4	ab A	3,6	V
	60cm	Pub	23,7	a A	5,5	V
		Pb	29,6	a A	4,8	V
		Mub	20,4	a A	2,6	V
		Mb	25,2	a A	4,5	V
Nov. 2003	12cm	Pub	29,7	a A	1,6	V
		Pb	41,5	b A	2,7	V
		Mub	31,7	ab A	4,0	V
		Mb	41,7	b A	8,6	V
	35cm	Pub	61,9	b B	10,4	V
		Pb	43,8	a A	3,4	V
		Mub	32,4	a A	5,0	V
		Mb	36,4	a A	2,9	V
		Pub	60,5	c B	5,7	H
		Pb	35,8	a A	4,0	H
		Mub	39,4	ab A	1,7	H
		Mb	45,7	b B	2,6	H
	60cm	Pub	33,8	ab A	4,6	V
		Pb	39,7	b A	5,2	V
		Mub	31,9	a A	4,6	V
		Mb	34,0	ab A	2,3	V
Pub		38,7	a A	4,7	H	
Pb		34,5	a A	3,7	H	
Mub		35,6	a A	4,9	H	
Mb		32,6	a A	2,9	H	
April 2002	12cm	Pub	30,8	a A	0,7	V
		Pb	30,2	a A	0,6	V
		Mub	32,8	a A	6,6	V
		Mb	28,4	a A	1,4	V
	35cm	Pub	50,3	d B	0,2	V
		Pb	38,3	c B	2,5	V
		Mub	22,6	a A	1,1	V
		Mb	29,7	b A	1,7	V
	60cm	Pub	25,5	a A	4,9	V
		Pb	35,9	a AB	1,1	V
		Mub	22,0	a A	0,7	V
		Mb	29,2	a A	5,9	V

Anhang 15 Regressionsgleichungen

Abbildung	Regressionsgleichung	R ²
4-15	$0,29x+1,19$	0,0428
4-17	12cm: $-0,0028x+1,576$	0,7849
	35cm: $-0,0023x+1,6544$	0,3967
	60cm: $-0,0026x+1,5947$	0,3774
4-18	$0,1293x+0,0392$	0,0847
4-20	$0,0759x+1,5641$	0,0096
4-22	$0,0921x+1,7645$	0,0043
4-25	V: $0,9981x-0,0513$	0,5112
	H: $0,5511x-3,7305$	0,3165
4-26	V 12cm: $0,0156x-8,1393$	0,0003
	V 35cm: $1,1164x+0,7065$	0,5280
	V 60cm: $-0,6205x+11,116$	0,5473
	H 35cm: $0,559x-3,7303$	0,3856
	H 60cm: $0,5475x-3,6993$	0,2953
4-27	wG kf: $26,307x-0,0421$	0,6076
	wG kl: $11,159x+1,0572$	0,2972
	eG kf: $-2,7709x+1,149$	0,0006
	eG kl: $-0,8768x+1,698$	0,0002
	MP kf: $-26,799x+5,7995$	0,5699
	MP kl: $-12,556x+3,73$	0,3401
	GPV kf: $22,604x-7,9808$	0,2282
	GPV kl: $7,001x-1,236$	0,0595
4-46	□ : $-0,0055x+19,351$	0,8768
	△ : $-0,0042x+17,715$	0,9079
	○ : $-0,003x+17,481$	0,7831
	◇ : $-0,0044x+17,184$	0,7704
4-47	□ : $-0,0006x+25,869$	0,6095
	△ : $-0,0003x+27,622$	0,6728
	○ : $-0,0011x+24,798$	0,943
	◇ : $-0,0006x+17,994$	0,6194
4-49	$0,8356x+0,2513$	0,9435
4-50	$0,9407x+4,2017$	0,9896
4-51	$0,6216x+45,314$	0,6399
4-52	$0,9748x+3,1484$	0,7997
4-53	Pv 5cm: $0,2025x+67,529$	0,0601
	Pv 35cm: $0,6416x+51,034$	0,5309
	Pv 60cm: $0,3489x+63,511$	0,3773
	c 5cm: $1,9752x-13,268$	0,5904
	c 35cm: $0,816x+6,1947$	0,8580
	c 60cm: $1,0714x+1,4802$	0,7740

Danksagung

Mein erster herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Rainer Horn, der mich nach einem Kurzzeitforschungsaufenthalt in Kiel in jeder Hinsicht unterstützt hat, in seinem Institut zu promovieren. Er überließ mir die Anfertigung dieses interessanten Themas und gab mir mit seinem steten Interesse und konstruktiven Beiträgen viel Vertrauen in meiner Arbeit.

Bei dem Institut für Zuckerrübenforschung in Göttingen möchte ich mich für die zur Verfügungsstellung des Versuchsfeldes, speziell auch für die gute Zusammenarbeit bei den Befahrungs- und Probenahmeterminen, bei Dr. Heinz-Josef Koch und seinen Mitarbeitern bedanken.

Was wäre mit einem guten Thema ohne finanzielle Basis? Für die großzügige finanzielle Unterstützung meiner wissenschaftlichen Arbeit und damit die Ermöglichung eines Auslandsaufenthaltes als Stipendiatin bedanke ich mich bei der Konrad-Adenauer-Stiftung.

Mein Dank gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen des Institutes, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Für die Diskussionsbereitschaft ein großer Dank an Dr. PD Thomas Baumgartl. Besonders hat mich Sabine Hamann besonnen und tatkräftig in meiner Arbeit unterstützt. Auf der „Titanic“ wäre sie mein „Rettungsring“ gewesen.

Die gegenseitige fachliche und moralische Unterstützung durch meinen guten Freund, José Dörner, besonders in der Endphase der Zusammenstellung dieser Arbeit, werde ich nie vergessen. Außerdem bedanke ich mich für das stetige Interesse und die aufmunternden Worte meiner guten Freunde, Dori und Emi. Dankiii!

Köszönöm Anyukámnak és Borznak, hogy mindvégig kitartottak mellettem és lelkiileg támogattak így a távolból is. Köszönök mindent!

...ich danke ganz herzlich meinem Stefan!

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Orsolya Fazekas

Geburtsdatum und -ort: 03.04.1975 in Budapest, Ungarn

Nationalität: ungarisch

Familienstand: ledig

Berufs- und Schulpraxis

2005 *Promotion*

2002-2005 *Wissenschaftliche Mitarbeiterin* am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
(*Stipendiatin* der Konrad-Adenauer-Stiftung)

1998-2002 *Wissenschaftliche Mitarbeiterin* im Forschungsinstitut für Bodenkunde und Agrochemie der Ungarischen Akademie für Wissenschaften
(freigestellt für die Promotion ab 2002)

2001 *Dipl. Ing. für Agrarwirtschaft und -ökonomie*

1998-2001 Szent István Universität in Gödöllő (ehemals Universität für Agrarwissenschaften); Fakultät für Wirtschafts- und Volkswissenschaft; Fachrichtung Agrarwirtschaft und Agrarökonomie

1998 *Ing. für Bodenmelioration*

1995-1998 Universität für Agrarwissenschaften in Debrecen; Hochschulfakultät für landwirtschaftliche Wasser- und Umweltwirtschaft; Fachrichtung landwirtschaftliche Wasserwirtschaft

1994 *Technikerin für städtische Wasserwirtschaft und Wasserbau*

1993 *Abitur*

1989-1994 Ervin Baktay Fachmittelschule für Wasserwirtschaft und Wasserbau in Dunaharaszti

1981-1989 Grundschule in Budapest

